



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

Διδακτορική Διατριβή

Υδρογεωλογική έρευνα με χρήση σύγχρονων διαχειριστικών εργαλείων
στο πλαίσιο της ποιοτικής και ποσοτικής παρακολούθησης
του υπόγειου υδατικού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου (Θεσσαλία)

Ιωάννης Α. Βρουχάκης

Επιβλέπων Καθηγητής:

Γεώργιος Σταμάτης, Ομότιμος Καθηγητής ΓΠΑ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Γεώργιος Σταμάτης, Ομότιμος Καθηγητής ΓΠΑ

Ανδρέας Παναγόπουλος, Διευθυντής Ερευνών, ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ

Ελένη Ζαγγανά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Πανεπιστήμιο Πατρών

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

Διδακτορική Διατριβή

Υδρογεωλογική έρευνα με χρήση σύγχρονων διαχειριστικών εργαλείων
στο πλαίσιο της ποιοτικής και ποσοτικής παρακολούθησης
του υπόγειου υδατικού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου (Θεσσαλία)

Hydrogeological research using modern management tools in the framework
of qualitative and quantitative monitoring of the groundwater system of
Tirnavos sub-basin (Thessaly)

Ιωάννης Α. Βρουχάκης

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Ανδρέας Παναγόπουλος, Διευθυντής Ερευνών, ΕΛΓΟ – ΔΗΜΗΤΡΑ

Ελένη Ζαγγανά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Πανεπιστήμιο Πατρών

Φώτιος-Κωνσταντίνος Πλιάκας, Καθηγητής, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Γεώργιος Καρατζάς, Καθηγητής, Πολυτεχνείο Κρήτης

Χρίστος Καραβίτης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Ιωάννης Παπανικολάου, Αναπληρωτής Καθηγητής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Μαρία Ψυχογιού, Επίκουρη Καθηγήτρια, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Υδρογεωλογική έρευνα με χρήση σύγχρονων διαχειριστικών εργαλείων στο πλαίσιο της ποιοτικής και ποσοτικής παρακολούθησης του υπόγειου υδατικού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου (Θεσσαλία)

*Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής
Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Γεωλογίας*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία του εκμεταλλεύσιμου συνολικού όγκου γλυκού νερού, το οποίο κυκλοφορεί στον πλανήτη. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μικρότερη ευαισθησία στη ρύπανση και τη μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης των υπόγειων υδάτων, έναντι των επιφανειακών, αναδεικνύουν την τεράστια σημασία τους σε παγκόσμιο κοινωνικοοικονομικό επίπεδο. Το μέγεθος της σημασίας τους ωστόσο επιβάλλει και τη μέγιστη δυνατή προσπάθεια προστασίας τους. Όσον αφορά την ελληνική επικράτεια, οι Τεταρτογενείς αλλουβιακές λεκάνες αποτελούν τον βασικό χώρο συγκέντρωσης των υπόγειων υδάτων, που χρησιμοποιούνται κύρια για την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Με γνώμονα όλα τα παραπάνω επιλέχθηκε η υπολεκάνη Τυρνάβου, η οποία χωροθετείται στο βορειοδυτικό άκρο της ανατολικής θεσσαλικής πεδιάδας, ως μια από τις πιο αντιπροσωπευτικές αλλουβιακές λεκάνες στον ελληνικό χώρο, με σκοπό την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ποιοτική και ποσοτική παρακολούθηση του υπόγειου υδατικού της δυναμικού.

Η εξέταση των γεωλογικών, υδρολογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής, βασίστηκε τόσο στην προϋπάρχουσα βάση δεδομένων, όσο και στα πρωτογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Για το σκοπό αυτό έλαβε χώρα εκτενής απογραφή παραγωγικών γεωτρήσεων αλλά και σημείων παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης, έτσι ώστε να συσταθεί ένα αξιόπιστο δίκτυο παρακολούθησης. Από το αρχικά καταγεγραμμένο δίκτυο, το οποίο αποτελούνταν από περισσότερες των 350 γεωτρήσεων, προέκυψε, με τη χρήση αλγορίθμου πολυκριτηριακής ανάλυσης, δίκτυο παρακολούθησης των ποιοτικών και των ποσοτικών χαρακτηριστικών της που συστάθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής. Κατά το χρονικό διάστημα 2016-2018, πραγματοποιήθηκαν 4 καμπάνιες δειγματοληψιών (εναλλαγές υγρών-ξηρών περιόδων), για την παρακολούθηση των βασικών υδροχημικών παραμέτρων, καθώς και 2 καμπάνιες για τη συλλογή δειγμάτων ισοτόπων. Παράλληλα με τις δειγματοληψίες αυτές έλαβαν χώρα και 5 σετ μετρήσεων της υπόγειας στάθμης. Από την επεξεργασία των ποσοτικών δεδομένων και τη βοήθεια σύγχρονων εργαλείων χωρικής ανάλυσης δεδομένων των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, προέκυψε ότι τα εντονότερα προβλήματα πτώσης στάθμης από το 1973 έως σήμερα, μετατοπίζονται σταδιακά προς το νότιο-νοτιοανατολικό τμήμα της υπολεκάνης, προς τη συνέχεια δηλαδή της ανατολικής θεσσαλικής πεδιάδας. Ωστόσο, δεν μπορεί να παραλειφθεί το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια διαφαίνεται μια σχετική επανάκαμψη του συστήματος της υπόγειας στάθμης, κυρίως στα δυτικά και βόρεια τμήματα της υπολεκάνης.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα της περιοχής έρευνας, αναφορικά με την ποιοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων, αφορά στις αυξημένες συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων, οι οποίες ωστόσο εντοπίστηκαν σε συγκεκριμένα τμήματα της υπολεκάνης και στις 4 περιόδους δειγματοληψιών, γεγονός που αποδόθηκε σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των περιοχών αυτών. Η χρησιμοποίηση ευρέως διαδεδομένων αλλά και πρότυπων δεικτών ποιότητας, έδειξε ότι σε γενικές γραμμές πρόκειται για νερά κατάλληλα για άρδευση, καλού επιπέδου περιβαλλοντικής κατάταξης και στη συντριπτική πλειοψηφία τους, κατάλληλα (ως προς τις προσδιοριζόμενες παραμέτρους της

παρούσας έρευνας και μόνο) για ανθρώπινη κατανάλωση. Από την υδροχημική ανάλυση προέκυψαν περιοχές επικράτησης συγκεκριμένων υδροχημικών χαρακτήρων νερού, οι οποίοι με τη σειρά τους ανέδειξαν τις κυρίαρχες υδροχημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στις περιοχές αυτές. Τα αποτελέσματα της εκτεταμένης στατιστικής επεξεργασίας (βασικά περιγραφικά στοιχεία, ανάλυση συσχέτισης, πολυμεταβλητές μέθοδοι) ήρθαν να επιβεβαιώσουν τα μέχρι τότε υδροχημικά δεδομένα αλλά και να προσδιορίσουν παραμέτρους που δρουν πανομοιότυπα, βοηθώντας έτσι στον εντοπισμό πιθανών υδροχημικών διεργασιών ή/και πηγών που τις επηρεάζουν.

Με βάση τις ισοτοπικές αναλύσεις των δειγμάτων του υπόγειου νερού δημιουργήθηκε η Τοπική Ισοτοπική Γραμμή για την περιοχή έρευνας, από τη σύγκριση της οποίας με άλλες ευρύτερης κλίμακας (Θεσσαλίας, Ελλάδας, Παγκόσμιας), προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για τις ιδιοσυνθήκες της περιοχής. Ωστόσο, το κρίσιμο στοιχείο που προέκυψε από την περαιτέρω επεξεργασία των ισοτοπικών δεδομένων, αφορούσε στο μηχανισμό τροφοδοσίας του υπόγειου υδατικού συστήματος. Κι αυτό γιατί με τα νέα αυτά στοιχεία τροφοδοσίας, επαναπροσδιορίζονται τα μέχρι τώρα δεδομένα σχετικά με τους μηχανισμούς λειτουργίας και υδροδυναμικής εξέλιξης του υπό μελέτη συστήματος.

Το σύνολο των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων, με τη βοήθεια του ολοκληρωμένου αριθμητικού κώδικα MODFLOW, με τον οποίο επαληθεύθηκε, βελτιώθηκε και ποσοτικοποιήθηκε το ευρύτερο εννοιολογικό καθεστώς της περιοχής. Τα αποτελέσματα της ρύθμισης, σε συνθήκες μόνιμης αλλά και μη μόνιμης ροής, καθώς και η επαλήθευση του μοντέλου ήταν άκρως ικανοποιητικά. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια, το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της απόκρισης του συστήματος, υπό το πρίσμα διάφορων εναλλακτικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής. Με βάση τα αποτελέσματα, προτάθηκε ένας ορθολογικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος, ο οποίος δοκιμάστηκε σε μια νέα προσομοίωση και τα αποτελέσματα του ήταν ενθαρρυντικά. Η πρόταση αυτή φαίνεται να διασφαλίζει, ως ένα βαθμό, τη βιωσιμότητα των υπόγειων υδατικών πόρων της περιοχής και κατά συνέπεια τη βελτίωση της περιφερειακής οικονομίας. Ωστόσο, καθώς η ευρύτερη περιοχή αποτελεί ένα πολύπλοκο και ευαίσθητο υδρογεωλογικό περιβάλλον, στο οποίο τα φαινόμενα υπερεκμετάλλευσης είναι εμφανή, οι παρεμβάσεις πρέπει να είναι καίριες και προς διάφορες κατευθύνσεις.

Επιστημονική περιοχή: Υδρογεωλογική έρευνα

Λέξεις κλειδιά: Υδρογεωλογία, υδροχημική εξέλιξη, ποιοτική-ποσοτική παρακολούθηση, μοντέλο υπόγειας, ροής, Τύρναβος

Hydrogeological research using modern management tools in the framework of qualitative and quantitative monitoring of the groundwater system of Tirnavos sub-basin (Thessaly)

*Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering
Laboratory of Minerology and Geology*

ABSTRACT

Groundwater accounts for the vast percentage of the total exploitable freshwater volume currently available on the planet. This fact, combined with the lower sensitivity to pollution and the greater storage capacity of groundwater, compared to surface water, highlight their paramount importance at the global socio-economic level. The magnitude of their importance, however, demands the greatest possible effort to protect them. As far as the Greek territory is concerned, the Quaternary alluvial basins are the main groundwater hosting environments, where high potential aquifer systems are developed and their resources primarily used for irrigated agriculture. Based on the above, the Tirnavos sub-basin was selected, which is situated at the northwestern end of the eastern Thessaly plain, as one of the most representative alluvial basins in Greece, in order to develop a methodology for the qualitative and quantitative monitoring of its water potential.

The examination of the geological, hydrological and hydrogeological characteristics of the area was based on both the historical database, as well as on primary data collected in the framework of this study. An extensive inventory of active boreholes and groundwater monitoring points was prepared, in order to design a reliable monitoring network. From the initially recorded network, which consisted of more than 350 boreholes, an operational network for monitoring the qualitative and quantitative characteristics of the aforementioned area was derived, using an algorithm that is based on multi-criteria analysis of 14 factors. Four (4) sampling campaigns (representative of the wet and the dry conditions) were carried out, during the timeframe 2016-2018, to monitor the basic hydrochemical parameters, as well as 2 campaigns for the collection of isotope samples. Along with these sample collections, 5 sets of groundwater level measurements took place.

The processing of the quantitative data and the use of modern tools for spatial analysis of data of Geographic Information Systems revealed that the most intense level drop problems from 1973 until today, are gradually shifting to the south-southeastern part of the sub-basin, i.e. to the continuation of eastern Thessaly plain. However, the fact that in recent years there has been a relative recovery of the groundwater heads distribution, especially in the western and northern parts of the basin, cannot be ignored.

The biggest problem of the research area, with regards to the quality of groundwater, is the increased concentrations of nitrate ions, which were detected in specific parts of the sub-basin in all four sampling periods, which was attributed to specific characteristics of these areas. The use of widespread but also standard quality indicators, showed that in general these are waters suitable for irrigation, of good environmental classification level and most of them suitable, (according to the parameters defined in this study only), for human consumption. The hydrochemical analysis resulted to the recognition of areas of predominance of specific hydrochemical water characteristics, which in turn highlighted the dominant hydrochemical processes that take place in these areas. The results of the extensive statistical processing (basic descriptive data, correlation analysis, multivariate methods) confirmed the hydrochemical data available until then, but also identified parameters that act identically, thus enabling the identification of possible hydrochemical processes and/or sources that affect them.

Based on the isotopic analysis of the groundwater samples, the Local Isotopic regression Line for the research area was compiled, from the comparison of which to other larger scales' (Thessaly, Greece, World) lines, useful conclusions were deduced for the hydrodynamic conditions of the area. However, the crucial element that emerged from the further processing of the isotopic data was related to the recharge mechanism of the groundwater system. This is because this new insight, leads to the redefinition of the so far explanation for the mechanisms of operation and hydrodynamic evolution of the system under study, that in turn trigger viewpoints for alternative management scenario.

All results obtained were used to simulate groundwater flow, with the help of the integrated numerical code MODFLOW, which was used to verify, improve and quantify the wider conceptual model of the area. The results of the calibration, in both steady and transient flow conditions, as well as the verification of the model were highly satisfactory. Hence, this model was then used to simulate the system's response, in the light of various alternative climate change scenarios. Based on the results, a rational approach to the problem was proposed, which was tested in a new simulation with encouraging results. The proposed approach appears to ensure, to some extent, the sustainability of the region's groundwater resources and, thus, the improvement of the regional economy. However, since the wider area is a complex and sensitive hydrogeological environment, where the effects of overexploitation are evident, diverse and intensive interventions must be made.

Scientific area: Hydrogeological research

Keywords: Hydrogeology, hydrochemical evolution, qualitative - quantitative monitoring, groundwater flow model, Tirnavos

Η έγκριση της παρούσας διατριβής από την Εξεταστική Επιτροπή και το Γενικό Τμήμα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών δεν προϋποθέτει και την αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, Άρθρο 202, παρ. 2).

Με την άδεια μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από το λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της.

*Στην οικογένειά μου
και σε όσους πίστεψαν σ'αυτήν την προσπάθεια*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έναρξη της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2016 με τον ορισμό της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, ύστερα από τη συνεδρίαση των μελών της Γενικής Συνέλευσης Ειδικής Σύνθεσης, του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής (Α.Φ.Π. & Γ.Μ.). Η υλοποίηση της διήρκησε έξι χρόνια, ένα χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο είχα την τύχη να γνωρίσω και να συνεργαστώ με νέους ανθρώπους αλλά και να έρθω πιο κοντά με παλιούς γνώριμους φίλους και συνεργάτες. Όπως κάθε διδακτορική διατριβή, αποτελεί μια προσωπική δουλειά ωστόσο, η περάτωσή της δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την ουσιαστική βοήθεια σε επιστημονικό, πρακτικό και ηθικό επίπεδο από ένα σύνολο ατόμων τους οποίους και ευχαριστώ θερμά. Πιο συγκεκριμένα:

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Α.Φ.Π. & Γ.Μ. του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Γεώργιο Σταμάτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος της διατριβής αλλά και για τις καίριες υποδείξεις και συμβουλές του, τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο, καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Του εύχομαι να είναι πάντα γερός εκπληρώνοντας πράγματα που τον γεμίζουν και τον κάνουν ευτυχισμένο.

Από βάθους καρδιάς, οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ, στον Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού ΔΗΜΗΤΡΑ Δρ Ανδρέα Παναγόπουλο, για την αμέριστη καθοδήγησή και στήριξή του. Μια πολύπλευρη στήριξη σε επιστημονικό, προσωπικό, ηθικό και πρακτικό επίπεδο από τον επί 17 χρόνια συνάδελφο και συνεργάτη σε πλήθος ερευνητικών έργων, ο οποίος με πίστεψε και μου δώσε τις ευκαιρίες να εντρυφήσω ουσιαστικά πάνω στο αντικείμενο της υδρογεωλογίας. Η συμβολή του στην παρούσα διατριβή ήταν καθοριστική, τόσο στα αρχικά στάδια αποσαφήνισης του υδρογεωλογικού υποβάθρου της περιοχής έρευνας, όσο και στα επόμενα στάδια βαίνοντας προοδευτικά προς την ολοκλήρωση της προσπάθειας αυτής, με την καθοδήγηση του προς την επίλυση των προβλημάτων που προέκυπταν.

Ευχαριστώ θερμά την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών κα Ελένη Ζαγγανά, ως μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής για τις εύστοχες υποδείξεις και διευκρινίσεις κυρίως σε θέματα που αφορούσαν το κομμάτι της ισοτοπικής υδρογεωλογίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, κ. Φώτιο Πλιάκα, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, κ. Γεώργιο Καρατζά Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Χρίστο Καραβίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Α.Φ.Π. & Γ.Μ. του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, κ. Ιωάννη Παπανικολάου Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Α.Φ.Π. & Γ.Μ. του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και κα Μαρία Ψυχογιού Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Α.Φ.Π. & Γ.Μ. του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την τιμή που μου κάνανε να μετέχουν στην Επιτροπή καθώς και για τις παρατηρήσεις και υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ θερμά, τον Διευθυντή του Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας κ. Δημήτριο Γκουντελίτσα, το στέλεχος του Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου κ. Κωνσταντίνο Ντάλλα, το στέλεχος του Τ.Ο.Ε.Β. Αμπελώνα κ. Κωνσταντίνο Ζαρογιάννη, το στέλεχος του Τ.Ο.Ε.Β. Δαμασίου κ. Απόστολο Νιτσιούλη, για την παραχώρηση όλων των δεδομένων που τους ζήτησα αλλά και για τη διάθεση των υδρονομέων τους, οι οποίοι με προσωπικό χρόνο με βοήθησαν σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας, τους οποίους και

ευχαριστώ επίσης. Η άρτια εκτέλεση των εργασιών πεδίου δε θα ήταν εφικτή χωρίς την ανιδιοτελή βοήθεια των ανθρώπων αυτών, οι οποίοι ανέχτηκαν και τις όποιες υποδείξεις μου σχετικά με την τήρηση των αναλυτικού πρωτοκόλλου δειγματοληψιών.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φίλους συναδέλφους του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων της Ερευνητικής Μονάδας Σίνδου, του ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ, κ. Αντώνιο Τερζίδη, κ. Σάββα Τσολακίδη, κα Ιωάννα Ζεϊμπέκη, κα Αναστασία Παπαθανασίου τόσο για τη συνοδεία και βοήθειά τους στις εργασίες πεδίου, όσο και για την ηθική στήριξή τους κατά τη διάρκεια της διατριβής. Ευχαριστώ πολύ τους Δρ Βασίλειο Πισινάρα, Εντεταλμένο Ερευνητή του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων, για την πολύτιμη καθοδήγησή του σε κρίσιμα θέματα και ιδιαίτερα στο κομμάτι της μαθηματικής προσομοίωσης, όπως επίσης και τον Δρ Ευάγγελο Τζιρίτη, Εντεταλμένο Ερευνητή του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων, για τις χρήσιμες συμβουλές του στο κομμάτι της υδροχημικής ανάλυσης αλλά και την υποστήριξή του στις δημοσιεύσεις των εργασιών. Επίσης, στο προσωπικό του Εργαστηρίου Φυσικοχημικών Δοκιμών του Ινστιτούτου και ιδιαίτερος στην Δρ Βασιλική Κυνηγοπούλου, οφείλω θερμό ευχαριστώ καθώς επωμίστηκαν την υλοποίηση των υδροχημικών αναλύσεων των δειγμάτων, αναφορικά με τα κύρια ιόντα και τα βαρέα μέταλλα. Ιδιαίτερο ευχαριστώ και προς τον Δρ Ευάγγελο Χατζηγιαννάκη, Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου, ο οποίος ήταν εκείνος που με παρότρυνε να ξεκινήσω τη διατριβή αλλά και για τη συνεχή συμβουλευτική του υποστήριξη σε θέματα που άπτονται του Γεωπονικού αντικειμένου. Ευχαριστώ εγκάρδια όλο το υπόλοιπο προσωπικό του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων για τη φιλοξενία, τη στήριξη και την αγάπη που μου έδειξαν, όχι μόνο κατά τη διάρκεια της διατριβής, αλλά και τα 17 χρόνια παρουσίας μου στις εγκαταστάσεις της Σίνδου.

Επιπλέον, πολλές ευχαριστίες προς τη Διεύθυνση Υδάτων Θεσσαλίας, τον Οργανισμό Πληρωμών & Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού & Εγγυήσεων και την Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, για την παροχή πλήθους δεδομένων απαραίτητων για τη διεκπεραίωση της παρούσας έρευνας, καθώς και το Εργαστήριο Υδρολογίας του Πανεπιστημίου του Lubeck στη Γερμανία, για τη διεξαγωγή των ισοτοπικών αναλύσεων στα δείγματα νερού της περιοχής έρευνας.

Για το τέλος αφήνω όλους τους φίλους και το στενό οικογενειακό μου περιβάλλον, τους οποίους ευχαριστώ από καρδιάς, για την ουσιαστική βοήθεια και την ηθική στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, χρόνια με γεγονότα πρωτόγνωρα σε παγκόσμιο επίπεδο, που εύχομαι να ξεπεραστούν σύντομα. Ιδιαίτερη μνεία για τη σύζυγό μου Ιφιγένεια Μεταξά, την οποία ευχαριστώ τόσο για τη στήριξη και την υπομονή της όλα αυτά τα χρόνια, όσο και για την πολύτιμη βοήθεια της στην επιμέλεια του παρόντος κειμένου. Τα παιδιά μου, Αντώνη και Πηνελόπη, τα ευχαριστώ εγκάρδια, και μόνο για την ύπαρξή τους, από την οποία αντλώσα και αντλώ δύναμη καθημερινά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT	iii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	vii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	xiii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xvii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	xix
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	2
1.3 ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	6
1.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ	8
2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	11
2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ – ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	11
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	15
2.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	17
2.4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ	20
3 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ-ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ-ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ	24
3.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ	24
3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ	28
3.3 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	32
3.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ	34
4 ΓΕΩΛΟΓΙΑ	42
4.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	42
4.1.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ	42
4.1.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ	44
4.1.3 ΜΕΤΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	46
4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	47
4.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	53
4.4 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	57
4.4.1 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟΥ – ΟΛΟΚΑΙΝΟΥ	57
4.4.2 ΤΕΚΤΟ-ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ ΤΥΡΝΑΒΟΥ	59
5 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	62
5.1 ΓΕΝΙΚΑ	62
5.2 ΔΙΚΤΥΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	62
5.2.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	64
5.2.1.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	69
5.2.1.2 Θερμοκρασία	72
5.2.1.3 Σχετική Υγρασία	76
5.2.1.4 Εξάτμιση - Εξατμισοδιαπνοή	77
5.3 ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	84
5.3.1 ΠΗΝΕΙΟΣ ΠΟΤΑΜΟΣ	85
5.3.2 ΤΙΤΑΡΗΣΙΟΣ ΠΟΤΑΜΟΣ	95
5.4 ΑΛΛΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΩΜΑΤΑ	97
5.4.1 ΚΟΥΣΜΠΑΣΑΝΙΩΤΙΚΟ ΡΕΜΑ	97
5.4.2 ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΙΟΥ	97
6 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	99
6.1 ΓΕΝΙΚΑ	99
6.2 ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ	100
6.3 ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ	104

6.3.1. ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	105
6.3.2. ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	108
6.3.3 ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	112
6.4. ΠΗΓΕΣ	118
7 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ.....	122
7.1 ΓΕΝΙΚΑ	122
7.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	122
7.2.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	123
7.2.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	127
7.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ	130
7.3.1 ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ - ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΩΝ	130
7.3.2 ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ	139
7.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΟΦΟΡΙΑΣ	145
7.5 ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΗΓΩΝ	157
7.5.1 ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΗΓΩΝ	157
7.5.2 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΠΗΓΩΝ	169
7.6 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ	172
8 ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ	200
8.1 ΓΕΝΙΚΑ	200
8.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	200
8.2.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	201
8.2.1.1 Ανάπτυξη αλγορίθμου πολυκριτηριακής ανάλυσης.....	203
8.2.1.2 Ανάλυση παραμέτρων αλγορίθμου.....	206
8.2.1.3 Εφαρμογή αλγορίθμου	213
8.2.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	219
8.3 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	221
8.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ	222
8.5 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	223
8.5.1 ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ	224
8.5.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΩΝ.....	225
8.6 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	227
8.6.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ (T _w).....	227
8.6.2 ΔΙΑΛΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟΥ (DO)	230
8.6.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (EC)	234
8.6.4 ΕΝΕΡΓΟΣ ΟΞΥΤΗΤΑΣ (pH)	238
8.6.5 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ (Eh).....	241
8.6.6 ΟΛΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ	245
8.6.7 ΣΥΝΟΛΟ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ (TDS).....	248
8.7 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	249
8.7.1 ΑΣΒΕΣΤΙΟ (Ca ²⁺)	249
8.7.2 ΜΑΓΝΗΣΙΟ (Mg ²⁺).....	252
8.7.3 ΝΑΤΡΙΟ (Na ⁺)	255
8.7.4 ΚΑΛΙΟ (K ⁺).....	258
8.7.5 ΟΞΙΝΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (HCO ₃ ⁻)	261
8.7.6 ΘΕΙΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (SO ₄ ²⁻)	264
8.7.7 ΧΛΩΡΙΟ (Cl ⁻).....	267
8.7.8 ΝΙΤΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (NO ₃ ⁻).....	270
8.8 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ.....	273
8.8.1 ΧΑΛΚΟΣ (Cu).....	273
8.8.2 ΣΙΔΗΡΟΣ (Fe).....	276

8.8.3 ΜΑΓΓΑΝΙΟ (Mn)	280
8.8.4 ΜΟΛΥΒΔΟΣ (Pb)	284
8.9 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	287
8.9.1 ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ.....	288
8.9.2 ΔΕΙΚΤΕΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ	301
9 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ & ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ.....	306
9.1 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΝΕΡΟΥ.....	306
9.1.1 ΔΕΙΚΤΗΣ Poseidon (PoS Index).....	308
9.1.2 SAR (Sodium Absorption Ratio) & Διάγραμμα Wilcox.....	318
9.1.3 ΠΟΣΙΜΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	321
9.2 ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	323
9.2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑ RIPER.....	323
9.2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑ DUROV	327
9.3 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	335
9.3.1 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	337
9.3.2 ΚΥΡΙΑ ΙΟΝΤΑ	340
9.3.3 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ.....	351
9.3.4 ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ	356
10 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	357
10.1 ΓΕΝΙΚΑ	357
10.2 ΒΑΣΙΚΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ	357
10.2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (EC)	360
10.2.2 ΕΝΕΡΓΟΣ ΟΞΥΤΗΤΑ (pH)	363
10.2.3 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ (TDS)	366
10.2.4 ΑΣΒΕΣΤΙΟ (Ca ²⁺)	369
10.2.5 ΜΑΓΝΗΣΙΟ (Mg ²⁺).....	371
10.2.6 ΝΑΤΡΙΟ (Na ⁺)	373
10.2.7 ΚΑΛΙΟ (K ⁺).....	375
10.2.8 ΟΞΙΝΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (HCO ₃ ⁻).....	377
10.2.9 ΘΕΙΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (SO ₄ ²⁻)	379
10.2.10 ΧΛΩΡΙΟ (Cl ⁻).....	381
10.2.11 ΝΙΤΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (NO ₃ ⁻).....	383
10.2.12 ΧΑΛΚΟΣ (Cu)	385
10.2.13 ΣΙΔΗΡΟΣ (ΟΛΙΚΟΣ) (Fe)	387
10.2.14 ΜΑΓΓΑΝΙΟ (Mn)	389
10.2.15 ΜΟΛΥΒΔΟΣ (Pb)	391
10.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ (CORRELATION ANALYSIS)	393
10.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	400
10.4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ (PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS).....	401
10.4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΔΩΝ (CLUSTER ANALYSIS)	412
10.4.3 ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ (STEPWISE DISCRIMINANT ANALYSIS).....	418
11 ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	422
11.1 ΓΕΝΙΚΑ	422
11.2 ΣΤΑΘΕΡΑ ΙΣΟΤΟΠΑ.....	422
11.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΣΟΤΟΠΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ	425
11.4 ΣΧΕΣΗ δ ¹⁸ O - δ ² H - ΜΕΤΕΩΡΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ	426
11.5 ΤΟΠΙΚΗ ΜΕΤΕΩΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ.....	430
11.6 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΟΤΟΠΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ.....	434
12 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΙΕΣΕΩΝ	443
12.1 ΓΕΝΙΚΑ	443

12.2 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	443
12.2.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ	444
12.2.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ	446
12.3 ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	446
12.3.1 ΑΣΤΙΚΑ ΛΥΜΑΤΑ	448
12.3.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	448
12.3.3 ΕΣΤΑΥΛΙΣΜΕΝΗ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΑ	450
12.3.4 ΧΩΡΟΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΩΝ (Χ.Υ.Τ.Α.)	451
12.3.5 ΕΞΟΥΡΚΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ	451
12.3.6 ΕΝΤΑΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	451
12.4 ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	453
12.5 ΥΔΡΟΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ	460
12.6 ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΥΔΑΤΟΣ	461
12.6.1 ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΑΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	461
12.6.2 ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	462
12.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ	463
12.7.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΑ	463
12.7.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ	463
12.8 ΜΟΝΤΕΛΟ DPSIR	465
12.8.1 ΓΕΝΙΚΑ	465
12.8.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ DPSIR ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	467
13 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ	478
13.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	478
13.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ	478
13.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	480
13.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟ-ΛΕΚΑΝΗ ΤΥΡΝΑΒΟΥ	484
13.4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	484
13.4.2 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	484
13.4.3 Ο ΚΩΔΙΚΑΣ MODFLOW – ΕΞΙΣΩΣΗ ΡΟΗΣ	489
13.4.2.1 Αριθμητική προσέγγιση του μαθηματικού μοντέλου	491
13.4.2.2 Βασικά πακέτα λογισμικού του κώδικα MODFLOW	494
13.4.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	496
13.4.4.1 Διακριτοποίηση της περιοχής έρευνας	496
13.4.4.2 Οριακές συνθήκες	499
13.4.4.3 Υδραυλικές παράμετροι	504
13.4.4.4 Αρχικές συνθήκες	507
13.4.4.5 Προσαρμογή υδατικού ισοζυγίου στην ευρύτερη περιοχή προσομοίωσης	509
13.4.5 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	513
13.4.5.1 Ρύθμιση σε συνθήκες μόνιμης ροής (Steady state calibration)	515
13.4.5.2 Ρύθμιση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (Transient state calibration)	521
13.4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	535
13.4.7 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	538
13.4.8 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ	541
13.4.9 ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ	546
13.4.10 ΆΛΛΑ ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	550
14 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	554
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	571
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	588
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2	630

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Λεκάνες Απορροής Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας και οριοθέτηση περιοχής έρευνας.	12
Εικόνα 2.2. Κυριότεροι οικισμοί της περιοχής (googleearth)	13
Εικόνα 2.3. Πανοραμική άποψη της υπολεκάνης Τυρνάβου ΝΑ διεύθυνσης, πάνω από το όρος Μελούνα στα δυτικά κράσπεδα της περιοχής.....	15
Εικόνα 2.4. Πανοραμική άποψη της υπολεκάνης Τυρνάβου προς δυτικά, πάνω από το νότιο τμήμα του Κάτω Ολύμπου στο ΒΑ τμήμα της περιοχής.....	15
Εικόνα 2.5. Καστρί Τυρνάβου (Η πιθανή θέση της αρχαίας Φάλαννας).	17
Εικόνα 2.6. Περιοχές Natura 2000, στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (Τροποποιημένος χάρτης από την 1η Αναθεώρηση Σ.Δ.Λ.Α.Π. Υ.Δ. Θεσσαλίας (ΕΛ08) 2017).....	18
Εικόνα 2.7. Αρδευτικό δίκτυο και οριοθέτηση των Τ.Ο.Ε.Β. της περιοχής και έρευνας.	21
Εικόνα 3.1. Απεικόνιση πορείας των ποταμών Πηνειού και Τιταρήσιου πριν και κατά την είσοδό τους στην υπολεκάνη Τυρνάβου.....	26
Εικόνα 3.2. Γεωμορφολογική απεικόνιση της υπολεκάνης Τυρνάβου ως τμήμα της Ανατολικής Θεσσαλικής πεδιάδας.	29
Εικόνα 3.3. Τρισδιάστατη απεικόνιση μορφολογικού αναγλύφου της περιοχής έρευνας (α) και της ευρύτερης περιοχής (β).	30
Εικόνα 3.4. Χάρτης μορφολογικών κλίσεων υπολεκάνης Τυρνάβου.	31
Εικόνα 3.5. Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής έρευνας.	33
Εικόνα 3.6. Χωρική κατανομή των καλλιεργειών της περιοχής έρευνας (ΟΠΕΚΕΠΕ 2015).	39
Εικόνα 4.1. Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών (Τροποποιημένο από Mountrakis et al. 1983).....	48
Εικόνα 4.2. Ψηφιοποιημένος γεωλογικός χάρτης περιοχής έρευνας, βασισμένος στα φύλλα γεωλογικού χάρτη Λάρισα (Πλαστήρας 1982) και Γόννοι (Μιγκίρος 1980), με παρεμβάσεις ομογενοποίησης.	51
Εικόνα 4.3. Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολεκάνης Τυρνάβου, όπως αυτή διαμορφώθηκε από την επεξεργασία των φύλλων χάρτη, 1/50.000 του ΙΓΜΕ, Λάρισα (Πλαστήρας 1982) και Γόννοι (Μιγκίρος 1980).	52
Εικόνα 4.4. Απλουστευμένη στρωματογραφική στήλη των σχηματισμών της περιοχής έρευνας (Papaoroulios 1995).	53
Εικόνα 4.5. Λιθολογικές τομές γεωτρήσεων LB76 (δυτικό περιθώριο) και ΕΛ45 (ανατολικό τμήμα) εντός της περιοχής έρευνας.	54
Εικόνα 4.6. Γεωλογική τομή κατά μήκος της υπολεκάνης Τυρνάβου (Papaoroulios 1995).	56
Εικόνα 4.7. Απλοποιημένος μορφολογικός χάρτης Ανατολικής Θεσσαλίας. Τα σύμβολα + και - δείχνουν τα τμήματα που προεξέχουν και εκείνα που καταβυθίζονται υπό το βάρος των ιζημάτων (Helly et al. 2000).	58
Εικόνα 4.8. Κύρια ρήγματα τα οποία ενεργοποιήθηκαν κατά την περίοδο επέκτασης Πλειστοκαίνου – Μ. Ολοκαίνου και προκάλεσαν την κατεύθυνση Α-Δ της υπολεκάνης Τυρνάβου. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της επέκτασης ενώ τα σύμβολα + και - τα τμήματα που προεξέχουν και εκείνα που καταβυθίζονται υπό το βάρος των ιζημάτων (Helly et al. 2000 με τροποποιήσεις).	59
Εικόνα 4.9. Τεκτο-ιζηματογενετικός κύκλος της υπολεκάνης Τυρνάβου (Helly et al. 2000). (α) Αρχικές σταθερές συνθήκες (β) Τεκτονική έξαρση και ενεργοποίηση των ρηγμάτων της υπολεκάνης (γ) Επαγωγική ιζηματογένεση λόγω της ανάσχεσης των ρηγμάτων της Γυρτώνης και της Ροδιάς.....	61
Εικόνα 5.1. Διαθέσιμοι και επιλεγμένοι μετεωρολογικοί σταθμοί Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας.	64
Εικόνα 5.2. (Α) Κλίμα της Ελλάδας σύμφωνα με την κλιματική ταξινόμηση Κέππεν-Γκάικερ (Korpen 1936, Korpen & Geiger 1968) και (Β) Υετόγραμμα Ελλάδας (Ε.Μ.Υ. 1971-2000).	65
Εικόνα 5.3. Σταθμοί μέτρησης στάθμης και παροχής των ποταμών Πηνειού και Τιταρήσιου για την περιοχή έρευνας.	87
Εικόνα 5.4. Αριστερά: Γενική άποψη τεχνητής λίμνης Αργυροπούλιου (www.ypethe.gr). Δεξιά: Εικόνα της λίμνης δίπλα στην εμφάνιση των πηγών Μάτι Τυρνάβου.	98
Εικόνα 5.5. Θυρόφραγμα Λίμνης Αργυροπούλιου (ampelwnaslarisas.blogspot.com).....	98
Εικόνα 6.1. Υδρολιθολογικός χάρτης υπολεκάνης Τυρνάβου (Σύμφωνα με τη «Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας» (Καραθοκύρης κ.α. 2014).....	103
Εικόνα 6.2. Ισοπαχείς καμπύλες βαθύτερου αλλουβιακού υδροφόρου (Sogreah 1974) και απλοποιημένη γεωλογική τομή με τη δομή του αλλουβιακού υδροφόρου συστήματος (τροποποιημένη από Papaoroulios 1995).	106
Εικόνα 6.3. Ανάπτυξη του καρστικού συστήματος Δαμασίου-Τυρνάβου στο δυτικό περιθώριο της περιοχής έρευνας.	112
Εικόνα 6.4. Μεθοδολογία ανάλυσης δοκιμών άντλησης.	116
Εικόνα 6.5. Χωρική κατανομή των υπολογιζόμενων τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας K (m/d) (Papaoroulios 1995).	116
Εικόνα 6.6. Χωρική κατανομή των υπολογιζόμενων τιμών της αποθηκευτικότητας S (Papaoroulios 1995).	117
Εικόνα 6.7. Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας των καρστικών πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας (χωρίς κλίμακα, Κωνσταντινίδης 1986).	120
Εικόνα 6.8. Εμφάνιση των πηγών Μάτι Τυρνάβου στο ΒΔ τμήμα της περιοχής έρευνας.	120
Εικόνα 6.9. Εμφάνιση πηγών Αγίας Άννας βόρεια της πόλης του Τυρνάβου.	121
Εικόνα 7.1. Καταγραφή διόρθωσης εδάφους στη θέση SR39 (repair=r ₁ +r ₂).	124
Εικόνα 7.2. Δίκτυο παρακολούθησης υπόγειας στάθμης για την περιοχή μελέτης.	126
Εικόνα 7.3. Πιεζομετρικός χάρτης φρεατίας υδροφορίας (Α) για τον Οκτώβριο του 1973 (Sogreah 1974) και (Β) για τον Οκτώβριο 1993 (Papaoroulios 1995).	130

Εικόνα 7.4. Πιεζομετρικός χάρτης ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος 2016), (α) πριν τη διόρθωση του υψομέτρου και (β) μετά τη διόρθωση του υψομέτρου με το RTK-GPS.	140
Εικόνα 7.5. Πιεζομετρικός χάρτης υγρής περιόδου (Απρίλιος-Μάιος 2017), (α) πριν τη διόρθωση του υψομέτρου και (β) μετά τη διόρθωση του υψομέτρου με το RTK-GPS.	140
Εικόνα 7.6. Πιεζομετρικός χάρτης ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος 2017), (α) πριν τη διόρθωση του υψομέτρου και (β) μετά τη διόρθωση του υψομέτρου με το RTK-GPS.	141
Εικόνα 7.7. Πιεζομετρικός χάρτης υγρής περιόδου (Απρίλιος-Μάιος 2018), (α) πριν τη διόρθωση του υψομέτρου και (β) μετά τη διόρθωση του υψομέτρου με το RTK-GPS.	141
Εικόνα 7.8. Πιεζομετρικές καμπύλες και γραμμές ροής υπόγειου νερού για τις τέσσερις κύριες περιόδους δειγματοληψίας.	143
Εικόνα 7.9. Πιεζομετρικές καμπύλες ξηρής περιόδου για τα τρία έτη αναφοράς: 1973 (Sogreah 1974), 1993 (Panagoroulos 1995) και 2017 (Vrouhakis et.al. 2017).	148
Εικόνα 7.10. Ισοβαθείς καμπύλες ξηρής περιόδου για τα τρία έτη αναφοράς: 1973 (Sogreah 1974), 1993 (Panagoroulos 1995) και 2017 (Vrouhakis et.al. 2017).	149
Εικόνα 7.11. Μεταβολή του βάθους της υπόγειας στάθμης το 1993 σε σχέση με το 1973. Θετικές τιμές αντιστοιχούν σε αύξηση του βάθους (πτώση στάθμης), ενώ αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε μείωση του βάθους (άνοδο της στάθμης).	151
Εικόνα 7.12. Μεταβολή του βάθους της υπόγειας στάθμης το 2017 σε σχέση με το 1993. Θετικές τιμές αντιστοιχούν σε αύξηση του βάθους (πτώση στάθμης), ενώ αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε μείωση του βάθους (άνοδο της στάθμης).	154
Εικόνα 7.13. Συνολική μεταβολή του βάθους της υπόγειας στάθμης το 2017 σε σχέση με το 1973. Θετικές τιμές αντιστοιχούν σε αύξηση του βάθους (πτώση στάθμης), ενώ αρνητικές τιμές αντιστοιχούν μείωση του βάθους (άνοδο της στάθμης).	156
Εικόνα 7.14. Μηχανισμοί λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος, όπως αυτά προκύπτουν από τα πιεζομετρικά δεδομένα.	157
Εικόνα 7.15. Μοναδιαίο υδρογράφημα και επιμέρους στοιχεία του (Σούλιος 1985).	158
Εικόνα 7.16. Τυπικά παραδείγματα από την ανάλυση της καμπύλης στείρευσης, των πηγών Μάτι Τυρνάβου, σε δύο τμήματα.	166
Εικόνα 7.17. Σχηματική απεικόνιση πλευρικών εισροών και εκροών για την περιοχή μελέτης και το καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου.	175
Εικόνα 7.18. (Α) Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 1985 (Δ/ση Υδάτων Θεσσαλίας), (Β) Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 2017 (πρωτογενή δεδομένα). Με κόκκινη στικτή έλλειψη, η περιοχή υπολογισμού της υδραυλικής κλίσης για τον υπολογισμό των πλευρικών εισροών από τα ιζήματα των δύο ποταμών, ενώ με πράσινη, η περιοχή υπολογισμού της υδραυλικής κλίσης για τον υπολογισμό των πλευρικών εισροών από τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους.	183
Εικόνα 7.19. (Α) Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 1985 και περιοχή υπολογισμού υδραυλικής κλίσης στα θόρεια κράσπεδα (κόκκινη στικτή έλλειψη), στην ανατολική περιοχή της υπολεκάνης (πράσινη στικτή έλλειψη), στην επέκταση της υπολεκάνης στα ΝΑ (κίτρινη στικτή έλλειψη) και (Β) Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 2017 και υπολογισμός (i) υδραυλικής κλίσης για στα θόρεια κράσπεδα (κόκκινη στικτή έλλειψη), στα ανατολικά (πράσινη στικτή έλλειψη), στα ΝΑ (κίτρινη στικτή έλλειψη), (ii) γινομένου $L \times D$ για την τροφοδοσία από την Όσσα.	185
Εικόνα 7.20. Χωρική κατανομή συντελεστή κατείδυσης και διαχωρισμός ζωνών με βάση τα πολύγωνα Thiesen (Τροποποιημένο από Panagoroulos 1995).	187
Εικόνα 8.1. Αρχικό καταγεγραμμένο δίκτυο γεωτρήσεων και τελικό δίκτυο παρακολούθησης υπόγειων υδάτων, ύστερα από την εφαρμογή του αλγορίθμου πολυκριτηριακής ανάλυσης.	217
Εικόνα 8.2. Συνολικό δίκτυο παρακολούθησης υπολεκάνης Τυρνάβου.	218
Εικόνα 8.3. Χωρική κατανομή θερμοκρασίας υπόγειου νερού ($^{\circ}\text{C}$) για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).	228
Εικόνα 8.4. Χωρική κατανομή θερμοκρασίας υπόγειου νερού ($^{\circ}\text{C}$) για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2017 (αριστερά) και Απριλίου 2018 (δεξιά).	229
Εικόνα 8.5. Χωρική κατανομή διαλυμένου οξυγόνου (mg/L) για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).	232
Εικόνα 8.6. Χωρική κατανομή διαλυμένου οξυγόνου (mg/L) για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2017 (αριστερά) και Απριλίου 2018 (δεξιά).	233
Εικόνα 8.7. Χωρική κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\mu\text{S/cm}$) για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).	236
Εικόνα 8.8. Χωρική κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\mu\text{S/cm}$) για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2017 (αριστερά) και Απριλίου 2018 (δεξιά).	237
Εικόνα 8.9. Χωρική κατανομή του pH για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).	239
Εικόνα 8.10. Χωρική κατανομή του pH για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2017 (αριστερά) και Απριλίου 2018 (δεξιά).	240
Εικόνα 8.11. Χωρική κατανομή του Eh (mV) για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).	243
Εικόνα 8.12. Χωρική κατανομή του Eh (mV) για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).	244
Εικόνα 8.13. Χωρική κατανομή δειγμάτων νερού υγρής περιόδου με βάση την σκληρότητα τους.	247
Εικόνα 8.14. Χωρική κατανομή δειγμάτων νερού ξηρής περιόδου με βάση την σκληρότητα τους.	247
Εικόνα 8.15. Χωρική κατανομή των Ca^{2+} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).	251

Εικόνα 8.16. Χωρική κατανομή των Ca^{2+} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών)	252
Εικόνα 8.17. Χωρική κατανομή των Mg^{2+} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	254
Εικόνα 8.18. Χωρική κατανομή των Mg^{2+} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	255
Εικόνα 8.19. Χωρική κατανομή των Na^+ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	257
Εικόνα 8.20 Χωρική κατανομή των Na^+ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	258
Εικόνα 8.21. Χωρική κατανομή των K^+ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	260
Εικόνα 8.22. Χωρική κατανομή των K^+ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	261
Εικόνα 8.23. Χωρική κατανομή των HCO_3^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	263
Εικόνα 8.24. Χωρική κατανομή των HCO_3^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	264
Εικόνα 8.25. Χωρική κατανομή των SO_4^{2-} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	266
Εικόνα 8.26. Χωρική κατανομή των SO_4^{2-} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	267
Εικόνα 8.27. Χωρική κατανομή των Cl^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	269
Εικόνα 8.28. Χωρική κατανομή των Cl^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	270
Εικόνα 8.29. Χωρική κατανομή των NO_3^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	272
Εικόνα 8.30. Χωρική κατανομή των NO_3^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	273
Εικόνα 8.31. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Cu ($\mu g/L$) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	275
Εικόνα 8.32. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Cu ($\mu g/L$) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	276
Εικόνα 8.33. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Fe ($\mu g/L$) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	279
Εικόνα 8.34. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Fe ($\mu g/L$) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	280
Εικόνα 8.35. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Mn ($\mu g/L$) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	283
Εικόνα 8.36. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Mn ($\mu g/L$) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	284
Εικόνα 8.37. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Pb ($\mu g/L$) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).....	286
Εικόνα 8.38. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Pb ($\mu g/L$) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	287
Εικόνα 8.39. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου Mg^{2+}/Ca^{2+} , υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.....	290
Εικόνα 8.40. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου Mg^{2+}/Ca^{2+} , υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.....	290
Εικόνα 8.41. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $Mg^{2+}+Ca^{2+}/Na^++K^+$, υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.....	291
Εικόνα 8.42. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $Mg^{2+}+Ca^{2+}/Na^++K^+$, υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.....	292
Εικόνα 8.43. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου Na^+/K^+ , υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.....	293
Εικόνα 8.44. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου Na^+/K^+ , υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.....	294
Εικόνα 8.45. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου SO_4^{2-}/K^+ , υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.....	295
Εικόνα 8.46. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου SO_4^{2-}/K^+ , υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.....	295
Εικόνα 8.47. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $(Ca^{2+}+Mg^{2+}) / (SO_4^{2-}+HCO_3^-)$, υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.....	298
Εικόνα 8.48. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $(Ca^{2+}+Mg^{2+}) / (SO_4^{2-}+HCO_3^-)$, υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.....	298
Εικόνα 9.1. Χωρική κατανομή των υδροχημικών περιφερειών ξηρής (αριστερά) και υγρής περιόδου (δεξιά) σύμφωνα με την ταξινόμηση των δειγμάτων στα αντίστοιχα διαγράμματα Piper.....	326
Εικόνα 9.2. (Α) Ταξινόμηση των δειγμάτων της ξηρής περιόδου (μέσος όρος των δύο ξηρών περιόδων) κατά Durov και (Β) αποτύπωση των υδροχημικών περιφερειών βάσει της χωρικής κατανομής των υδροχημικών ομάδων που προκύπτουν κατά Durov. .	330
Εικόνα 9.3. (Α) Ταξινόμηση των δειγμάτων της υγρής περιόδου (μέσος όρος των δύο υγρών περιόδων) κατά Durov και (Β) αποτύπωση των υδροχημικών περιφερειών βάσει της χωρικής κατανομής των υδροχημικών ομάδων που προκύπτουν κατά Durov. .	332
Εικόνα 9.4. Δίκτυο παρακολούθησης επιφανειακών υδάτων (Πηνιός-Τιταρήσιος).....	336
Εικόνα 9.5. Χωροχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των κατιόντων για τα επιφανειακά ύδατα της υπολεκάνης Τυρνάθου (Πηνιός και Τιταρήσιος).....	346
Εικόνα 9.6. Χωροχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των ανιόντων για τα επιφανειακά ύδατα της υπολεκάνης Τυρνάθου (Πηνιός και Τιταρήσιος).....	350
Εικόνα 9.7. Χωροχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των ανιόντων για τα επιφανειακά ύδατα της υπολεκάνης Τυρνάθου (Πηνιός και Τιταρήσιος).....	355
Εικόνα 10.1. Τυπικό θηκόγραμμα (Frigge et al. 1989).....	359
Εικόνα 10.2. Χωρική κατανομή εργαστηριακών τιμών EC ($\mu S/cm$) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	363
Εικόνα 10.3. Χωρική κατανομή του pH εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	366

Εικόνα 10.4. Χωρική κατανομή των TDS (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).....	369
Εικόνα 10.5. Χωρική κατανομή των scores για την ΚΣ1 (αριστερά) και την ΚΣ2 (δεξιά) για την υγρή περίοδο δειγματοληψίας (Μέσος όρος περιόδων Απρίλιος-Μάιος 2017 & Απρίλιος-Μάιος 2018).....	410
Εικόνα 10.6. Χωρική κατανομή των scores για την ΚΣ3 (αριστερά) και την ΚΣ4 (δεξιά) για την υγρή περίοδο δειγματοληψίας (Μέσος όρος περιόδων Απρίλιος-Μάιος 2017 & Απρίλιος-Μάιος 2018).....	410
Εικόνα 10.7. Χωρική κατανομή των scores για την ΚΣ1 (αριστερά) και την ΚΣ2 (δεξιά) για την ξηρή περίοδο δειγματοληψίας (Μέσος όρος περιόδων Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2016 & Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2017).....	411
Εικόνα 10.8. Χωρική κατανομή των scores για την ΚΣ3 (αριστερά) και την ΚΣ4 (δεξιά) για την ξηρή περίοδο δειγματοληψίας (Μέσος όρος περιόδων Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2016 & Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2017).....	411
Εικόνα 10.9. Χωρική κατανομή ομάδων και υπό-ομάδων, όπως αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή της Ιεραρχικής Ανάλυσης Συστάδων.....	417
Εικόνα 11.1. Δομή του πυρήνα για τα ισότοπα του Υδρογόνου και του Οξυγόνου.....	423
Εικόνα 11.2. Σχηματική απεικόνιση του «rainout effect», τροποποιημένο από τους Coplen et al. 2000 & Ματιάτο 2010).	427
Εικόνα 11.3. Παγκόσμια Μετεωρική Γραμμή Νερού (Craig 1961)	427
Εικόνα 11.4. Δίκτυο δειγματοληψίας ισότοπων για τις 2 περιόδους δειγματοληψίας (Απρίλιος 2018 & Σεπτέμβριος 2018).....	430
Εικόνα 11.5. Χωρική κατανομή δ ¹⁸ O για τα υπόγεια νερά κατά την περίοδο Απριλίου 2018.	435
Εικόνα 11.6. Κύριες (A-E) και δευτερεύουσες (Z-H) ζώνες διάρρηξης της Όσσας (Σταμάτης & Μιγκίρος 2004).....	437
Εικόνα 11.7. Υπέρθεση της τεκτονικής δομής και των διευθύνσεων ροής του ορεινού όγκου της Όσσας (Σταμάτης & Μιγκίρος 2004) στον χάρτη χωρικής κατανομής του δ ¹⁸ O της περιοχής έρευνας για τον Απρίλιο του 2018.	438
Εικόνα 11.8. Αντικλινική δομή της Όσσας και κλίσεις των στρωμάτων (Σταμάτης & Μιγκίρος 2004).	439
Εικόνα 11.9. Μηχανισμοί τροφοδοσίας του υπό μελέτη συστήματος, όπως προκύπτουν από την ανάλυση των ποιοτικών και ισοτοπικών δεδομένων.....	442
Εικόνα 12.1. Βιομηχανικές μονάδες και Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.	449
Εικόνα 12.2. Ποτάμια υδατικά σώματα, βάσει Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών ΥΔ Θεσσαλίας (Ε.Γ.Υ. 2013), για την υπολεκάνη Τυρνάβου.	452
Εικόνα 12.3. Χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων (NO ₃ ⁻) στην περιοχή έρευνας για τον Σεπτέμβριο του 2016 (αριστερά) και τον Σεπτέμβριο του 2017 (δεξιά).	456
Εικόνα 12.4. Χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων (NO ₃ ⁻) στην περιοχή έρευνας για τον Απρίλιο του 2017 (αριστερά) και τον Απρίλιο του 2018 (δεξιά).	457
Εικόνα 12.5. Κατανομή των βαμβακοκαλλιιεργειών στην περιοχή έρευνας με βάση τα στοιχεία του Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. (2015).....	459
Εικόνα 12.6. Χωρική κατανομή του Eh (mV) Απριλίου 2017.	460
Εικόνα 12.7. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας DPSIR, τροποποιημένο από (www.grida.no/resources/8124)	466
Εικόνα 13.1. Στάδια ανάπτυξης μοντέλου προσομοίωσης (ASTM D5447-93).....	482
Εικόνα 13.2. Εννοιολογικό μοντέλο υπόγειας ροής (εισροές-εκροές) της περιοχής μελέτης.....	487
Εικόνα 13.3. Εννοιολογικό μοντέλο υδροχημικής εξέλιξης της περιοχής μελέτης.	489
Εικόνα 13.4. Τρισδιάστατη απεικόνιση κανάθου προσομοίωσης με το κεντρικό κελί και τα γειτονικά του (McDonald & Harbaugh 1988, Harbaugh et al. 2000).....	491
Εικόνα 13.5. Ροή νερού μεταξύ δύο διαδοχικών κελιών του πλέγματος (McDonald & Harbaugh 1988, Harbaugh et al. 2000).	492
Εικόνα 13.6. Το πλέγμα διακριτοποίησης της ευρύτερης περιοχής έρευνας.....	497
Εικόνα 13.7. Καθορισμός οριακών συνθηκών για την περιοχή έρευνας.	504
Εικόνα 13.8. Χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας K (m/day) για το στρώμα 1 του μοντέλου.	505
Εικόνα 13.9. Χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας K (m/day) για το στρώμα 2 του μοντέλου.	506
Εικόνα 13.10. Χωρική κατανομή της ειδικής απόδοσης Sy για το στρώμα 1 του μοντέλου.	507
Εικόνα 13.11. Χωρική κατανομή της ειδικής υδροχωρητικότητας (Ss) και της ειδικής απόδοσης (Sy) για το στρώμα 2 του μοντέλου.	507
Εικόνα 13.12. Ζώνες τροφοδοσίας από τη βροχόπτωση με βάση την κατανομή του συντελεστή κατείσδυσης (Panagoroulos, 1995, Panagoroulos et al. 2015).....	516
Εικόνα 13.13. Χωρική κατανομή γεωτρήσεων άντλησης για τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής (steady state).....	517
Εικόνα 13.14. Σύγκριση μεταξύ της προσομοιωμένης και της μετρημένης πιεζομετρίας του υπό-πίεση υδροφόρου κατά τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.....	520
Εικόνα 13.15. Σύγκριση μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρημένων τιμών πιεζομετρίας του υπό-πίεση υδροφόρου κατά τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.....	529
Εικόνα 13.16. Σύγκριση μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρημένων τιμών πιεζομετρίας του υπό-πίεση υδροφόρου κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου.....	541

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Κύριες υδρολογικές λεκάνες και κύριοι ποταμοί ή ρέματα του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας,	11
Πίνακας 2.2. Δημογραφικά στοιχεία περιοχής (ΕΛ.ΣΤΑΤ. απογραφή 2011).....	14
Πίνακας 2.3. Περιοχές του Δικτύου Natura 2000 στην ευρύτερη περιοχή έρευνας	18
Πίνακας 3.1. Κατανομή της επιφάνειας της υπολεκάνης σε σχέση με τις μορφολογικές κλίσεις	31
Πίνακας 3.2. Μορφομετρικές παράμετροι λεκάνης απορροής ποταμού Τιταρήσιου.....	34
Πίνακας 3.3. Επιφάνεια κάλυψης καλλιεργειών της υπολεκάνης Τυρνάβου (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. 2015).	38
Πίνακας 3.4. Επιφάνεια κάλυψης καλλιεργειών της υπολεκάνης Τυρνάβου (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. 2015).	40
Πίνακας 5.1. Στοιχεία επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών.	63
Πίνακας 5.2. Μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής έρευνας (1955-2001).....	66
Πίνακας 5.3. Μέσες τιμές των μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (1981-2018) για κάθε έναν από τους 4 επιλεγμένους σταθμούς. ..69	
Πίνακας 5.4. Μέσος όρος μέσων μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας (1980-2001) και υψόμετρο μετεωρολογικών σταθμών για την εξαγωγή της θερμοβαθμίδας.....	75
Πίνακας 5.5. Εξαγωγή της τιμής του συντελεστή L_d για το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού Λάρισας (39.646), με βάση τις βιβλιογραφικές τιμές αναφοράς για τα γεωγραφικά πλάτη 39° και 40°.	81
Πίνακας 5.6. Σύνοψη διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής για την περιοχή έρευνας.....	84
Πίνακας 7.1. Αριθμός σταθμημετρήσεων ανά περίοδο, εντός και περιμετρικά της υπολεκάνης.....	129
Πίνακας 7.2. Βάθη στάθμης P14Λ & P2T3α πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη σταθεροποίηση της πτώσης στάθμης	136
Πίνακας 7.3. Αποτελέσματα από την ανάλυση των υδρογραμμάτων των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας (με γκρι φόντο δεδομένα από Ραπαγορούλιος 1995).	163
Πίνακας 7.4. Βροχόπτωση ανά σταθμό για τα δύο έτη αναφοράς	178
Πίνακας 7.5. Βροχόπτωση ανά υψομετρική ζώνη (Σύμφωνα με Ραπαγορούλιος 1995).	178
Πίνακας 7.6. Μέσες τιμές παροχής για τα δύο έτη αναφοράς.....	181
Πίνακας 7.7. Σύνολο δεδομένων για τον υπολογισμό της απευθείας κατείσδυσης από τη βροχόπτωση στην αλλουβιακή υπολεκάνη. 188	
Πίνακας 7.8. Δημογραφικά στοιχεία περιοχής ανά Δημοτική Ενότητα (ΕΛΣΤΑΤ, απογραφή 1981, 2011).	189
Πίνακας 7.9. Δημογραφικά στοιχεία περιοχής ανά ΤΟΕΒ (ΕΛΣΤΑΤ, απογραφή 1981, 2011).	189
Πίνακας 7.10. Υπολογισμός κατανάλωσης νερού ύδρευσης.	191
Πίνακας 7.11. Υπολογισμός υδατικού ισοζυγίου για το έτος αναφοράς 1985.	198
Πίνακας 7.12. Υπολογισμός υδατικού ισοζυγίου για το έτος αναφοράς 2017.	199
Πίνακας 8.1. Εξεταζόμενα κριτήρια και συντελεστές βαρύτητας του αλγόριθμου επιλογής θέσεων δειγματοληψίας.	204
Πίνακας 8.2. Κατηγορίες για κάθε παράμετρο που συμμετέχει στον αλγόριθμο επιλογής των θέσεων δειγματοληψίας.....	205
Πίνακας 8.3. Υπολογιζόμενη βαθμολογία για τις υπό αξιολόγηση γεωτρήσεις εντός της περιοχής έρευνας	214
Πίνακας 8.4. Γεωτρήσεις που απορρίφθηκαν παρά την σχετικά υψηλή τους αξιολόγηση.....	215
Πίνακας 8.5. Υπολογιζόμενη βαθμολογία για τις υπό αξιολόγηση γεωτρήσεις εκτός της περιοχής έρευνας	215
Πίνακας 8.6. Διαχωρισμός δειγμάτων ανά περίοδο δειγματοληψίας.	221
Πίνακας 8.7. Μέθοδοι προσδιορισμού και πρωτόκολλο διαπίστευσης ανά παράμετρο (Ι.Ε.Υ.Π.).	224
Πίνακας 8.8. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τις 4 περιόδους δειγματοληψίας.	234
Πίνακας 8.9. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών του pH για τις 4 περιόδους δειγματοληψίας.	238
Πίνακας 8.10. Ταξινόμηση υπόγειων υδάτων με βάση την ολική σκληρότητα (Sawyer et al. 1994).	245
Πίνακας 8.11. Ταξινόμηση νερού βάσει τιμών του TDS κατά Davis & De Wiest 1996.	248
Πίνακας 8.12. Τιμές Ιοντικού λόγου Na^+/Cl^- των θέσεων δειγματοληψίας του υπόγειου νερού για τις δύο περιόδους.....	296
Πίνακας 8.13. Διαβαθμίσεις στην ποιότητα του νερού με βάση το συντελεστή Revelle (Revelle 1946).	299
Πίνακας 8.14. Συντελεστής Revelle για τα υπόγεια νερά ξηρής και υγρής περιόδου για την περιοχή έρευνας.	300
Πίνακας 8.15. Τιμές δεικτών κορεσμού για τα κυριότερα ορυκτά των γεωτρήσεων της υγρής περιόδου.	302
Πίνακας 8.16. Τιμές δεικτών κορεσμού για τα κυριότερα ορυκτά των γεωτρήσεων της ξηρής περιόδου.....	303
Πίνακας 9.1. Παράμετροι υπολογισμού του δείκτη PoS για την υπολεκάνη Τυρνάβου, ταξινόμηση με βάση την τοξικότητα, μερική βαθμολογία και συντελεστής βαρύτητας	311
Πίνακας 9.2. Κατηγορίες, υποκατηγορίες και χρωματική απόχρωση για τον δείκτη PoS.	313
Πίνακας 9.3. Χαρακτηρισμός δειγμάτων και υπολογισμένη βαθμολογία του δείκτη PoS για την περιοχή έρευνας (ξηρή - υγρή περίοδος).	314
Πίνακας 9.4. Διαβαθμίσεις στην κατάταξη του αρδευτικού νερού (Wilcox 1955).	319
Πίνακας 9.5. Θέσεις δειγματοληψίας και οι αντίστοιχες παράμετροι στις οποίες παρατηρήθηκαν υπερβάσεις των ανώτατων ορίων ποσιμότητας με βάση το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017, για κάθε περίοδο δειγματοληψίας.....	322

Πίνακας 9.6. Αποτελέσματα φυσικοχημικών παραμέτρων επιφανειακών υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου.....	337
Πίνακας 9.7. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων επιφανειακών υδάτων (Πηνεϊός και Τιταρήσιος) για το σύνολο των δειγματοληψιών.	341
Πίνακας 10.1. Βασικοί περιγραφικοί στατιστικοί δείκτες των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων.	358
Πίνακας 10.2. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των υδροχημικών δεδομένων για την 1η περίοδο δειγματοληψίας (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2016). Με έντονη πορτοκαλί απόχρωση μέτρια συσχέτιση (θετική ή αρνητική) ενώ με κόκκινη απόχρωση ισχυρή συσχέτιση (θετική ή αρνητική).....	395
Πίνακας 10.3. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των υδροχημικών δεδομένων για την 2η περίοδο δειγματοληψίας (Απρίλιος-Μάιος 2017). Με έντονη πορτοκαλί απόχρωση μέτρια συσχέτιση (θετική ή αρνητική) ενώ με κόκκινη απόχρωση ισχυρή συσχέτιση (θετική ή αρνητική).....	396
Πίνακας 10.4. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των υδροχημικών δεδομένων για την 3η περίοδο δειγματοληψίας (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2017). Με έντονη πορτοκαλί απόχρωση μέτρια συσχέτιση (θετική ή αρνητική) ενώ με κόκκινη απόχρωση ισχυρή συσχέτιση (θετική ή αρνητική).....	397
Πίνακας 10.5. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των υδροχημικών δεδομένων για την 4η περίοδο δειγματοληψίας (Απρίλιος-Μάιος 2018). Με έντονη πορτοκαλί απόχρωση μέτρια συσχέτιση (θετική ή αρνητική) ενώ με κόκκινη απόχρωση ισχυρή συσχέτιση (θετική ή αρνητική).....	398
Πίνακας 10.6. Αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών για τα υδροχημικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (Απρίλιος-Μάιος 2017 και Απρίλιος-Μάιος 2018).....	404
Πίνακας 10.7. Αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών για τα υδροχημικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2016 και Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2018).	407
Πίνακας 10.8. Σημαντικές παράμετροι διάκρισης κατά την εφαρμογή της ΒΑΔΒ στους διάφορους συνδυασμούς ομάδων και υποομάδων.	419
Πίνακας 11.1. Αποτελέσματα ισοτοπικών αναλύσεων ¹⁸ O και ² H (δευτέριο) για όλα τα δείγματα.	431
Πίνακας 11.2. Υδροχημικές αναλύσεις ανθρακικών σχηματισμών Όσσας (μέση τιμή από 9 πηγές) και γεώτρησης LB214 (μέση τιμή 2 περιόδων).....	440
Πίνακας 12.1. Επιφανειακή ποσότητα ρύπων από σημειακές πηγές ρύπανσης στην υπολεκάνη Τυρνάβου (τόνοι/έτος).	447
Πίνακας 12.2. Εκτιμώμενα ρυπαντικά φορτία από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων στη λεκάνη απορροής Πηνεϊού και στην υπολεκάνη Τυρνάβου.	448
Πίνακας 12.3. Εκτιμώμενα ρυπαντικά φορτία βιομηχανικής προέλευσης στη λεκάνη απορροής Πηνεϊού και στην υπολεκάνη Τυρνάβου.	450
Πίνακας 12.4. Εκτιμώμενα ρυπαντικά φορτία της εσταυλισμένης κτηνοτροφικής δραστηριότητας στη λεκάνη απορροής Πηνεϊού και στην υπολεκάνη Τυρνάβου.	450
Πίνακας 12.5. Υδατικά σώματα που έχουν έστω μία δραστηριότητα με μέση ή υψηλή ένταση πίεσης από σημειακές πηγές ρύπανσης στην υπολεκάνη Τυρνάβου.	452
Πίνακας 12.6. Συνολικό ετήσιο φορτίο που απορρέει επιφανειακά στην υπολεκάνη Τυρνάβου, στη λεκάνη απορροής Πηνεϊού και σε ολόκληρο το ΥΔ Θεσσαλίας (από διάχυτες πηγές ρύπανσης).	453
Πίνακας 12.7. Ετήσιες απολήψεις ύδατος από τα επιφανειακά Υδατικά Συστήματα της υπολεκάνης Τυρνάβου.	462
Πίνακας 12.8. Ετήσια τροφοδοσία και απολήψεις από τα υπόγεια υδατικά συστήματα που αφορούν άμεσα την υπολεκάνη Τυρνάβου.	463
Πίνακας 12.9. Πίνακας ποιοτικής κατάστασης ΥΥΣ της υπολεκάνης Τυρνάβου.....	465
Πίνακας 12.10. Ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Αίτια) που αναλύονται στην εφαρμογή του μοντέλου DPSIR στην περιοχή έρευνας.	467
Πίνακας 13.1. Αρδευτικές ανάγκες ανά περιοχή για το 2017, όπως υπολογίσθηκαν στο Παράρτημα 2.	512
Πίνακας 13.2. Τιμές των στατιστικών παραμέτρων αξιολόγησης κατά τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.	517
Πίνακας 13.3. Σύγκριση παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου κατά τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.	521
Πίνακας 13.4. Τιμές των στατιστικών παραμέτρων αξιολόγησης κατά τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.	527
Πίνακας 13.5. Υδατικό ισοζύγιο του υδατικού συστήματος της περιοχής έρευνας για την περίοδο 2000-2012.	534
Πίνακας 13.6. Τιμές των στατιστικών παραμέτρων αξιολόγησης κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου.	539
Πίνακας 13.7. Μεταβολή μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις παρατήρησης κατά την εφαρμογή του δυσμενέστερου σεναρίου (WCS) κλιματικής αλλαγής κατά την περίοδο 2021-2040 (σύμφωνα με Arampatzis et al. 2018).	544
Πίνακας 13.8. Μεταβολή μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις παρατήρησης κατά την εφαρμογή του ευνοϊκότερου σεναρίου (BCS) κλιματικής αλλαγής κατά την περίοδο 2021-2040 (σύμφωνα με Arampatzis et al. 2018).	546
Πίνακας 13.9. Μεταβολή μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις παρατήρησης μετά την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, υπό το καθεστώς του δυσμενέστερου σεναρίου (WCS) κλιματικής αλλαγής (σύμφωνα με Arampatzis et al. 2018).	549

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1. Συνολική μεταβολή πληθυσμού μεταξύ 1991-2011 και μεταβολή ανά Δημοτική Ενότητα.....	14
Διάγραμμα 3.1. Σχηματική απεικόνιση κατανομής των μορφολογικών κλίσεων (%).	32
Διάγραμμα 3.2. Επιφάνεια κάλυψης (km ²) ανά χρήση γης για την περιοχή έρευνας με βάση το δίκτυο Corine Land Cover (2020).	35
Διάγραμμα 3.3. Ποσοστιαία κατανομή των χρήσεων γης για την περιοχή έρευνας με βάση το δίκτυο Corine Land Cover (2020).	35
Διάγραμμα 5.1. Γραφική απεικόνιση των μέσων τιμών των μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης για κάθε έναν από τους επιλεγμένους σταθμούς.	70
Διάγραμμα 5.2. Διάγραμμα βροχοβαθμίδας βασισμένη στη σχέση ύψους κατακρημνισμάτων και απόλυτου υψομέτρου για την ευρύτερη περιοχή έρευνας.	71
Διάγραμμα 5.3. Ομβροθερμικό διάγραμμα βασισμένο στο μέσο όρο των μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης του αντιπροσωπευτικού για την περιοχή μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας (1981-2018).	72
Διάγραμμα 5.4. Μέση μηνιαία θερμοκρασία για την περιοχή έρευνας (Σταθμός Λάρισας) για τη χρονική περίοδο 1970-2018 (στοιχεία EMY).	73
Διάγραμμα 5.5. Μέση μηνιαία θερμοκρασία για την περιοχή έρευνας (Σταθμός Λάρισας) για τη χρονική περίοδο 2016-2018 (στοιχεία από EMY).	74
Διάγραμμα 5.6. Μέση μηνιαία θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας (κόκκινη γραμμή) και της νύκτας (μπλε γραμμή) για τη χρονική περίοδο 1955-2018 (Πηγή: http://hikersbay.com/climate-conditions/greece/larissa).	74
Διάγραμμα 5.7. Διάγραμμα θερμοβαθμίδας βασισμένη στη σχέση θερμοκρασίας και απόλυτου υψομέτρου για την ευρύτερη περιοχή έρευνας.	76
Διάγραμμα 5.8. Μέση μηνιαία σχετική υγρασία για την περιοχή έρευνας (EMY 1970-2018).	77
Διάγραμμα 5.9. Μέση μηνιαία δυνητική εξάτμιση για την περιοχή έρευνας (Μετεωρολογικός σταθμός Λάρισας, 1977-2018 (www.emy.gr)).	78
Διάγραμμα 5.10. Απώλειες μεταφοράς μεταξύ σταθμών Αμυγδαλέας-Λάρισας για τον ποταμό Πηνειό (1960-1993).	89
Διάγραμμα 5.11. Ετήσια βροχόπτωση μετεωρολογικού σταθμού της Λάρισας (1972-2018).	91
Διάγραμμα 5.12. Απώλειες μεταφοράς μεταξύ σταθμών Κουτσόχερου-Λάρισας για τον ποταμό Πηνειό (2013-2015 & 2018-2019), Εθνικό δίκτυο παρακολούθησης υδατικών πόρων.	93
Διάγραμμα 5.13. Απώλειες μεταφοράς μεταξύ σταθμών Λάρισας-Γυρτώνης για τον ποταμό Πηνειό (από Panagoroulos 1995).	94
Διάγραμμα 7.1. Υδρογραφήματα πιεζομέτρων φρεάτιας (SR39b) και βαθιάς (SR39) υδροφορίας.	132
Διάγραμμα 7.2. Υδρογραφήματα καρστικών γεωτρήσεων και πιεζομέτρων στην περιοχή έρευνας.	134
Διάγραμμα 7.3. Υδρογράφημα βαθύτερου υδροφόρου (γεώτρηση LB99) στο κέντρο της υπολεκάνης και ετήσια βροχόπτωση σταθμού Λάρισας.	138
Διάγραμμα 7.4. Διαχρονική μεταβολή των συντελεστών στείρευσης των πηγών Μάτι Τυρνάθου και Αγίας Άννας.	167
Διάγραμμα 7.5. Μεταβολή του μέσου όρου των ετήσιων όγκων εκφόρτισης για τις πηγές Μάτι Τυρνάθου και Αγίας Άννας.	169
Διάγραμμα 7.6. Ετήσιοι όγκοι νερού που εκφορτίζονται από τις πηγές Μάτι Τυρνάθου και Αγίας Άννας.	169
Διάγραμμα 7.7. Διάγραμμα παροχών για τις πηγές Μάτι Τυρνάθου και Αγίας Άννας.	171
Διάγραμμα 8.1. Διάγραμμα Eh-pH – Όρια σταθερότητας του H ₂ O (Βουδούρης 2006, Misra 2012).	241
Διάγραμμα 8.2. Ταξινόμηση δειγμάτων υπόγειων υδάτων υγρής περιόδου (αριστερά) και ξηρής περιόδου (δεξιά) για την υπολεκάνη Τυρνάθου, βάση σκληρότητας κατά Sawyer et al. 1994.	246
Διάγραμμα 8.3. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Ca ²⁺ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	249
Διάγραμμα 8.4. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Mg ²⁺ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	253
Διάγραμμα 8.5. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Na ⁺ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	256
Διάγραμμα 8.6. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων K ⁺ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	259
Διάγραμμα 8.7. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων HCO ₃ ⁻ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	262
Διάγραμμα 8.8. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων SO ₄ ²⁻ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	265
Διάγραμμα 8.9. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων SO ₄ ²⁻ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	268
Διάγραμμα 8.10. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων NO ₃ ⁻ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	271
Διάγραμμα 8.11. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Cu στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	274
Διάγραμμα 8.12. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Fe στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	277
Διάγραμμα 8.13. Ιστόγραμμα συγκεντρώσεων Mn για το σύνολο των δειγμάτων της υπολεκάνης Τυρνάθου, σε σύγκριση με την ανώτατη παραμετρική τιμή (50 μg/L), βάσει ΦΕΚ 3282B/19-9-2017).	281
Διάγραμμα 8.14. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Pb στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.	285
Διάγραμμα 8.15. Συσχέτιση των συγκεντρώσεων των κατιόντων Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (meq/l) με τις συγκεντρώσεις των ανιόντων SO ₄ ²⁻ +HCO ₃ ⁻ για την ξηρή (αριστερά) και την υγρή (δεξιά) περίοδο.	297
Διάγραμμα 8.16. Ιστογράμματα συχνότητων των τιμών του δείκτη κορεσμού των κυριότερων ορυκτών για την υγρή και ξηρή περίοδο δειγματοληψίας.	304

Διάγραμμα 9.1. Λογικό διάγραμμα της μεθοδολογικής προσέγγισης του δείκτη PoS (Tziritis et al. 2014).....	310
Διάγραμμα 9.2. Αθροιστική συνεισφορά των παραμέτρων του δείκτη PoS στο επίπεδο ποιοτικής υποβάθμισης για το σύνολο των δειγμάτων ξηρής περιόδου.....	317
Διάγραμμα 9.3. Αθροιστική συνεισφορά των παραμέτρων του δείκτη PoS στο επίπεδο ποιοτικής υποβάθμισης για το σύνολο των δειγμάτων της ξηρής περιόδου.....	317
Διάγραμμα 9.4. Κατάταξη αρδευτικού νερού ξηρής περιόδου για την περιοχή έρευνας κατά Wilcox (1955).	320
Διάγραμμα 9.5. Κατάταξη αρδευτικού νερού υγρής περιόδου για την περιοχή έρευνας κατά Wilcox (1955).	321
Διάγραμμα 9.6. Piper και ταξινόμηση υπόγειου νερού.....	324
Διάγραμμα 9.7. Διαγράμματα Piper για την ξηρή (αριστερά) και για την υγρή (δεξιά) περίοδο	325
Διάγραμμα 9.8. Διάγραμμα Piper των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Αννάς για την ξηρή και την υγρή περίοδο δειγματοληψίας. ...	327
Διάγραμμα 9.9. Πρωτότυπο διάγραμμα Durog (αριστερά) και εκτεταμένο διάγραμμα Durog (δεξιά) (από Lloyd & Heathcote 1985 με παρεμβάσεις).....	328
Διάγραμμα 9.10. Υδροχημική τομή δια μέσου του υδατικού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου. Οι χρωματικές αποχρώσεις υποδηλώνουν την αλλαγή του υδροχημικού τύπου.	335
Διάγραμμα 9.11. Σύγκριση των συγκεντρώσεων των κατιόντων υπόγειων και επιφανειακών υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου (μέσες τιμές)	342
Διάγραμμα 9.12. Σύγκριση των συγκεντρώσεων των ανιόντων υπόγειων και επιφανειακών υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου (μέσες τιμές)	347
Διάγραμμα 9.13. Διάγραμμα Piper των επιφανειακών δειγμάτων όλων των περιόδων δειγματοληψίας για την υπολεκάνη Τυρνάβου.....	351
Διάγραμμα 9.14. Σύγκριση των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων (Cu, Fe, Mn) υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, για την υπολεκάνη Τυρνάβου (μέσες τιμές).....	353
Διάγραμμα 9.15. Κατάταξη επιφανειακών υδάτων Πηνειού (κόκκινα τρίγωνα) και Τιταρήσιου (πράσινα τρίγωνα) κατά Wilcox (1955).	356
Διάγραμμα 10.1. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για την EC.....	361
Διάγραμμα 10.2. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις EC. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης.	362
Διάγραμμα 10.3. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το pH.	364
Διάγραμμα 10.4. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις pH. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές	365
Διάγραμμα 10.5. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το TDS.	367
Διάγραμμα 10.6. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις TDS. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης.	368
Διάγραμμα 10.7. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Ca^{2+}	370
Διάγραμμα 10.8. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Ca^{2+} . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης.	371
Διάγραμμα 10.9. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Mg^{2+}	372
Διάγραμμα 10.10. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Mg^{2+} . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές	373
Διάγραμμα 10.11. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Na^+	374
Διάγραμμα 10.12. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Na^+ . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές	375
Διάγραμμα 10.13. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα K^+	376
Διάγραμμα 10.14. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις K^+ . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές	377
Διάγραμμα 10.15. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα HCO_3^-	378
Διάγραμμα 10.16. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις HCO_3^- . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο η απόμακρη τιμή.....	379

Διάγραμμα 10.17. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα SO_4^{2-}	380
Διάγραμμα 10.18. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις SO_4^{2-} . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.....	381
Διάγραμμα 10.19. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα Cl^-	382
Διάγραμμα 10.20. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Cl^- . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.....	383
Διάγραμμα 10.21. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα NO_3^-	384
Διάγραμμα 10.22. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις NO_3^- . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.....	385
Διάγραμμα 10.23. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Cu	386
Διάγραμμα 10.24. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Cu . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.....	387
Διάγραμμα 10.25. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το Fe	388
Διάγραμμα 10.26. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Fe . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.....	389
Διάγραμμα 10.27. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το Mn	390
Διάγραμμα 10.28. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Mn . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.....	391
Διάγραμμα 10.29. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το Pb	392
Διάγραμμα 10.30. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Pb . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.....	393
Διάγραμμα 10.31. Τρισδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών για τις τρεις Κύριες Συνιστώσες (Υγρή περίοδος).....	406
Διάγραμμα 10.32. Τρισδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών για τις τρεις Κύριες Συνιστώσες (Ξηρή περίοδος).....	409
Διάγραμμα 10.33. Δενδροδιάγραμμα ταξινόμησης των δειγμάτων του υπόγειου νερού, όπως αυτό προέκυψε από την εφαρμογή της Ιεραρχικής Ανάλυσης Συστάδων, για όλες τις περιόδους δειγματοληψίας (1, 2, 3, 4 δίπλα στους κωδικούς των δειγμάτων).....	416
Διάγραμμα 10.34. Κατανομή του αριθμού των δειγμάτων ως προς τις τιμές της εξίσωσης διάκρισης για την εφαρμογή της ΒΑΔΒ στις υπό-ομάδες 1.1 και 1.2.....	420
Διάγραμμα 10.35. Διασπορά των τιμών των δύο εξισώσεων διάκρισης που προέκυψαν από την εφαρμογή της ΒΑΔΒ μεταξύ της ομάδας 2 και των υποομάδων 1.1 και 1.2.....	420
Διάγραμμα 11.1. Τοπική Ισοτοπική Γραμμή Υπόγειων Υδάτων υπολεκάνης Τυρνάβου (LGIL) μαζί με (α) Μετεωρική Γραμμή Θεσσαλίας (ThMWL-Dotsika et al. 2010) (β) Ελληνική Μετεωρική Γραμμή (GrMWL-Argiriou & Lykoudis 2006) (γ) Παγκόσμια Μετεωρική Γραμμή (GMWL-Craig 1961).....	432
Διάγραμμα 11.2. Τοπική Ισοτοπική Γραμμή Επιφανειακών Υδάτων υπολεκάνης Τυρνάβου (LSIL) μαζί με (α) Μετεωρική Γραμμή Θεσσαλίας (ThMWL-Dotsika et al. 2010) (β) Τοπική Ισοτοπική Γραμμή Υπόγειων Υδάτων (LGIL) (γ) Παγκόσμια Μετεωρική Γραμμή (GMWL-Craig 1961).....	433
Διάγραμμα 12.1. Κατανομή ετήσιας επιβάρυνσης BOD, N και P από σημειακές πηγές για την υπολεκάνη Τυρνάβου.....	447
Διάγραμμα 12.2. Τιμές βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD), αζώτου (N) και φωσφόρου (P) στις επιφανειακές απορροές για κάθε κατηγορία διάχυτης πηγής ρύπανσης στην υπολεκάνη Τυρνάβου.....	455
Διάγραμμα 13.1. Σύγκριση προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών υπόγειας στάθμης για τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.....	519
Διάγραμμα 13.2. Σύγκριση προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών υπόγειας στάθμης για τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.....	528
Διάγραμμα 13.3. Χαρακτηριστικά υδρογραφήματα γεωτρήσεων, τα οποία προέκυψαν κατά το στάδιο ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.....	532
Διάγραμμα 13.4. Χαρακτηριστικά υδρογραφήματα γεωτρήσεων, τα οποία προέκυψαν κατά το στάδιο ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.....	533

Διάγραμμα 13.5. Γραφική απεικόνιση του υδατικού ισοζυγίου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (2000-2012).....	535
Διάγραμμα 13.6. Γραφική απεικόνιση των μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS), του κανονικοποιημένου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMS) και του συντελεστή συσχέτισης (R2) σε σχέση με τη μεταβολή του K.	537
Διάγραμμα 13.7. Γραφική απεικόνιση των μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS), του κανονικοποιημένου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMS) και του συντελεστή συσχέτισης (R2) σε σχέση με τη μεταβολή των Ss και Sy.	537
Διάγραμμα 13.8. Σύγκριση προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών υπόγειας στάθμης κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου.....	539

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Τα τελευταία χρόνια προκύπτει ολοένα και πιο έντονη η ανάγκη για αλλαγή πλεύσης αναφορικά με την στάση της ανθρωπότητας απέναντι στο περιβάλλον. Μια αλλαγή πλεύσης που δε βαραίνει αποκλειστικά τους ώμους αυτών που λαμβάνουν τις αποφάσεις, σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και τον κάθε άνθρωπο ξεχωριστά, καθώς μόνο με συλλογική προσπάθεια και ατομική ευθύνη είναι εφικτός ο στόχος αυτός, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί ένα ομορφότερο και ασφαλέστερο μέλλον.

Κυρίαρχος παράγοντας συνυφασμένος άμεσα με το περιβάλλον είναι το νερό, με την ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υδατικών αποθεμάτων να απασχολούν έντονα τις τελευταίες δεκαετίες την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. Αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας, καθώς έχει οικονομικές, υγειονομικές και κοινωνικές επεκτάσεις για κάθε χώρα, ιδιαίτερα δε για χώρες που στηρίζονται στον πρωτογενή τομέα παραγωγής και ανάπτυξης, όπως είναι η Ελλάδα.

Στο γενικότερο αυτό πλαίσιο, η παρούσα διατριβή αποσκοπεί στο να συμβάλει στην προαγωγή του περιβάλλοντος, με την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ποιοτική και ποσοτική παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων, που αποτελεί βασική ανάγκη στην κατεύθυνση προστασίας και αειφορικής διαχείρισης των υδατικών πόρων. Επιπρόσθετα, η αξιολόγηση της ποιότητας των υδατικών πόρων αποτελεί βασική προτεραιότητα της παρούσας έρευνας, καθώς η ολοένα μεγαλύτερη ζήτηση οδηγεί μοιραία στην ποιοτική υποβάθμιση των υδατικών πόρων. Το ζήτημα της ποιότητας των υδάτων αποτελεί μείζον πλέον θέμα για τους διεθνείς και εθνικούς οργανισμούς και φορείς θεσμοθέτησης, διαχείρισης και ελέγχου. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας ποιοτικής και ποσοτικής παρακολούθησης πραγματοποιήθηκε στην υπολεκάνη Τυρνάβου, η οποία αποτελεί τμήμα της πιο παραγωγικής λεκάνης του ελληνικού χώρου.

Με τη συλλογή πρωτογενών και την αξιοποίηση των προϋπάρχοντων δεδομένων, καθώς και με τη βοήθεια σύγχρονων διαχειριστικών εργαλείων γίνεται προσπάθεια να μελετηθούν τα γεωλογικά, υδρογεωλογικά και υδροχημικά στοιχεία της περιοχής, τα οποία και επηρεάζουν την ποιότητα και την ποσότητα των υδατικών πόρων. Παράλληλα, η σωστή οργάνωση των δεδομένων αυτών αποσκοπεί στη δημιουργία μιας καλά δομημένης τράπεζας πληροφοριών για την περιοχή έρευνας, η οποία θα είναι εύκολα προσβάσιμη από όλους.

Καθώς πρόκειται για υπολεκάνη εντατικής αγροτικής δραστηριότητας, τα φαινόμενα υπεράντλησης για την κάλυψη των αναπτυξιακών αναγκών ξεκίνησαν από τη δεκαετία του '80, συνεχίζονται μέχρι σήμερα, τουλάχιστον σε περιόδους ξηρασιών, και πιθανώς θα συνεχίσουν να υπάρχουν. Αναλύοντας τα διαχρονικά δεδομένα του υπόγειου υδατικού δυναμικού της υπολεκάνης, εκτιμάται η υδροδυναμική κατάσταση του συστήματος πριν

και κατά τη διάρκεια των έντονων φαινομένων υπεράντλησης, ενώ με βάση τα πρωτογενή δεδομένα εκτιμάται η τάση εξέλιξης του φαινομένου.

Άμεσα συνδεδεμένο με την υπεράντληση και την πτώση της υπόγειας στάθμης είναι το φαινόμενο της νιτρορρύπανσης. Η ρύπανση του υδροφόρου από νιτρικά άλατα είναι αποκλειστικά ανθρωπογενούς προέλευσης και στην παρούσα έρευνα δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στο να αναδειχθούν τα τμήματα εκείνα που είναι περισσότερο επιβαρυνμένα σε νιτρικά. Με τον τρόπο αυτόν επιχειρείται να διερευνηθούν τα ιδιαίτερα αίτια που έχουν οδηγήσει στη διαμόρφωση της κατάστασης αυτής, προκειμένου να καταστεί δυνατός ο σχεδιασμός στοχευμένων μέτρων αντιμετώπισης.

Εκτός από την ποιοτική υποβάθμιση, που προκαλείται από την υπερ-εκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού, σημαντικά ζητήματα προκύπτουν αναφορικά με τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης του υπόγειου ύδατος. Προκειμένου να επιλυθούν τα προβλήματα που προκύπτουν από την ανισορροπία αυτή, γίνεται προσπάθεια λεπτομερούς προσέγγισης του υδατικού ισοζυγίου, έτσι ώστε να ποσοτικοποιηθούν όλοι οι παράμετροι που το διαμορφώνουν, και στη συνέχεια να αντιμετωπισθεί, στοχευμένα πλέον, το πρόβλημα του προκύπτοντος ελλείματος στα υδατικά αποθέματα.

Ως επιστέγασμα, της έρευνας αυτής και των συμπερασμάτων που προκύπτουν, παρουσιάζονται εναλλακτικά μέτρα διαχείρισης και σενάρια προστασίας και ανάκαμψης του υπό μελέτη συστήματος, τα οποία όμως θα μπορούν να έχουν εφαρμογή και σε άλλα συστήματα παρόμοιων χαρακτηριστικών. Οι πολιτικές ορθής διαχείρισης ωστόσο είναι μια πολυπρισματική υπόθεση και δεν θα μπορούσαν να αποδοθούν μονόπλευρα. Στην παρούσα έρευνα διαμορφώνονται, παρουσιάζονται και προκρίνονται προτάσεις και σενάρια υπό την υδρογεωλογική σκοπιά. Παράλληλα παραθέτονται και εναλλακτικές λύσεις, οι οποίες σχετίζονται και με άλλες επιστήμες, προτείνονται ωστόσο από τη διεθνή βιβλιογραφία και μπορούν να υποστηριχθούν από την περιοχή έρευνας με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της.

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στην παράγραφο αυτή γίνεται συνοπτική αναφορά στα περιεχόμενα των κεφαλαίων από τα οποία δομείται η παρούσα διατριβή. Συγκεκριμένα:

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά το αντικείμενο και ο σκοπός της διδακτορικής διατριβής, ενώ στη συνέχεια, πέραν της δομής και των καινοτόμων στοιχείων, παρατίθεται συνοπτική αναδρομή των προγενέστερων μελετών, με την ευρύτερη έννοια, οι οποίες έχουν λάβει χώρα στην περιοχή έρευνας.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορα στοιχεία αναφορικά με την περιοχή έρευνας. Γενικά γεωγραφικά στοιχεία και στοιχεία διοικητικά σύμφωνα πάντα με την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία καθώς και κάποια ενδιαφέροντα στοιχεία αναφορικά με την ιστορία

της πόλης του Τυρνάβου και της εγγύτερης σε αυτόν περιοχής. Στο τέλος του Κεφαλαίου αυτού αναφέρονται η ταυτότητα των τριών Τ.Ο.Ε.Β. διαχείρισης του αρδευτικού νερού της περιοχής.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην γεωτεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής, η οποία σύμφωνα με τους ερευνητές πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια, από τα οποία προήλθε το γεωμορφολογικό ανάγλυφο και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής. Οι επικρατούσες χρήσεις γης, σύμφωνα με τον δίκτυο Corine Land Cover (2020), παρουσιάζονται στο τέλος αυτού του Κεφαλαίου.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται συνοπτική αναφορά των γεωλογικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής και ακολουθεί μια λεπτομερέστερη περιγραφή των σχηματισμών της κύριας περιοχής έρευνας. Αναφέρονται στη συνέχεια στοιχεία της γεωμετρίας των σχηματισμών και το Κεφάλαιο κλείνει με παράθεση της τεκτο-ιζηματογενετικής εξέλιξης της υπολεκάνης Τυρνάβου.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται υδρολογικά δεδομένα για την περιοχή έρευνας καθώς και στοιχεία του υδρολογικού δικτύου. Στο πρώτο μέρος αναφέρονται τα δεδομένα των κλιματικών σταθμών της περιοχής και τα στοιχεία που προκύπτουν από την επεξεργασία τους, ενώ στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται το δίκτυο παρακολούθησης της επιφανειακής απορροής στα δύο ποτάμια, Πηνειό και Τιταρήσιο. Στο τρίτο και τελευταίο μέρος του Κεφαλαίου, γίνεται αναφορά στα υπόλοιπα υδάτινα σώματα της περιοχής, πλην των δύο μεγάλων ποταμών.

Στο 6^ο Κεφάλαιο αναφέρονται τα υδρογεωλογικά δεδομένα της περιοχής έρευνας. Αρχικά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί κατατάσσονται με βάση τα υδρολιθολογικά τους χαρακτηριστικά και στη συνέχεια αναφέρονται τα δεδομένα σχετικά με τις υδροφορίες που αναπτύσσονται μέσα σε αυτούς. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των καρστικών πηγών, αναφέροντας τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Αναφορικά με το ποσοτικό κομμάτι των πηγών, τα στοιχεία που προκύπτουν παρουσιάζονται στο επόμενο Κεφάλαιο.

Το 7^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει όλα εκείνα τα δεδομένα που καθορίζουν την υδροδυναμική εξέλιξη του συστήματος. Γίνεται αναφορά στη σύνθεση και τεκμηρίωση του δικτύου παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης, καθώς και στο πρόγραμμα παρακολούθησης της. Πραγματοποιείται ανάλυση υδρογραφημάτων και εξαγωγή πιεζομετρικών χαρτών, ενώ με την χρήση των εργαλείων χωρικής ανάλυσης δεδομένων των Γ.Σ.Π. γίνεται αποτίμηση της υδροδυναμικής λειτουργίας και εξέλιξης του υπόγειου υδατικού συστήματος. Αναφέρονται στη συνέχεια τα ποσοτικά δεδομένα των δύο βασικών πηγών της περιοχής (Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας), ενώ στο τελευταίο μέρος του 7^{ου} Κεφαλαίου, γίνεται εκτενής υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου για δύο περιόδους αναφοράς.

Στο 8^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα υδροχημικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις των δειγμάτων του υπόγειου νερού, δίνοντας ωστόσο έμφαση τόσο στη σύνθεση του δικτύου παρακολούθησης, η οποία βασίστηκε στην εφαρμογή πρότυπου πολυκριττηριακού αλγορίθμου όσο και στο πρωτόκολλο δειγματοληψίας. Στη συνέχεια του

Κεφαλαίου, ακολουθεί ανάλυση και ανάπτυξη των μετρήσεων πεδίου και των εργαστηριακών αναλύσεων για τις φυσικοχημικές παραμέτρους, τα κύρια ιόντα και τα βαρέα μέταλλα, με ταυτόχρονη χωρική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Στο τέλος, με τη βοήθεια ιοντικών λόγων και δεικτών κορεσμού, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την προέλευση των χημικών στοιχείων από συγκεκριμένα πετρώματα.

Το Κεφάλαιο 9, αναφέρεται στην ποιοτική αξιολόγηση του νερού καθώς και στην υδροχημική του ταξινόμηση. Γίνεται διαχωρισμός της ποιοτικής αξιολόγησης, με βάση τη χρήση του νερού και χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχοι δείκτες κάθε φορά. Αναφορικά με την αρδευτική ποιοτική κατάσταση, ο δείκτης SAR και το συνεπακόλουθο διάγραμμα Wilcox, χρησιμοποιούνται, ενώ αναφορικά με την περιβαλλοντική ποιότητα ενός δείγματος νερού, χρησιμοποιείται ο πρότυπος για την περιοχή, δείκτης PoS. Γίνεται επίσης αναφορά, στις υπερβάσεις που παρατηρούνται στα δείγματα των υπογείων υδάτων, σε σχέση με τα θεσμοθετημένα για την Ελλάδα όρια, σχετικά με την ποιότητα νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση.

Για την υδροχημική ταξινόμηση των υπόγειων υδάτων χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα Piper, Durov (απλό και εκτεταμένο), απ' όπου προκύπτουν πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με την χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε κάθε τμήμα της υπολεκάνης Τυρνάβου.

Στο τελευταίο τμήμα του Κεφαλαίου αναλύονται τα αποτελέσματα των υδροχημικών αναλύσεων, των δειγμάτων επιφανειακών υδάτων, τα οποία αντιπροσωπεύουν τα δύο μεγάλα ποτάμια της περιοχής, τον Πηνειό και τον Τιταρήσιο. Στόχος τόσο η αξιολόγηση της ποιότητας αυτών όσο και η εξέταση της πιθανής σχέσης υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων στην περιοχή έρευνας.

Το Κεφάλαιο 10, περιλαμβάνει τη στατιστική ανάλυση των υδροχημικών δεδομένων. Αρχικά, αναλύονται τα βασικά περιγραφικά στατιστικά των δεδομένων και ακολούθως, πραγματοποιείται ανάλυση συσχέτισης μεταξύ όλων των αναλυόμενων χημικών παραμέτρων, για κάθε μία από τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας. Στο τελευταίο μέρος, χρησιμοποιούνται πιο σύνθετες μέθοδοι στατιστικής επεξεργασίας των υδροχημικών δεδομένων, όπως η ανάλυση συστάδων και η βηματική ανάλυση διακριτών βαθμίδων, βάσει των οποίων προκύπτουν χρήσιμα στοιχεία αλλά και επιβεβαιώνονται υπάρχοντα συμπεράσματα, σχετικά με τις υδροχημικές διαδικασίες που ελέγχουν τη διαμόρφωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων στην περιοχή έρευνας.

Το Κεφάλαιο 11, αφορά στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ισοτοπική υδρογεωλογία. Η λήψη δειγμάτων νερού και η ανάλυσή τους για τον προσδιορισμό ισοτόπων οξυγόνου και υδρογόνου, οδήγησαν στη σύνθεση της Τοπικής Ισοτοπικής Γραμμής των Υπογείων Υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου. Πραγματοποιήθηκε επεξεργασία και χωρική κατανομή των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων των ισοτόπων, βάσει της οποίας προέκυψαν σημαντικά στοιχεία αναφορικά με την

υδροδυναμική λειτουργία του υπόγειου υδατικού συστήματος. Παράλληλα ωστόσο, επιβεβαιώθηκαν τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την επεξεργασία και ανάλυση των πιεζομετρικών και υδροχημικών δεδομένων, όπως αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 12, γίνεται εκτενής αναφορά στην ανάλυση των πιέσεων τόσο για την ευρύτερη όσο και για την κύρια περιοχή έρευνας, σύμφωνα με το Άρθρο 5 της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60/EC) και ακολουθώντας το μοτίβο των Σχεδίων Διαχείρισης για το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (ΕΓΥ 2013, 2017). Δίδεται έμφαση στις διάχυτες πηγές ρύπανσης και ιδιαίτερα στις επιδράσεις των αζωτούχων ενώσεων στην περιοχή έρευνας, καθώς αυτές είναι η κυρίαρχη πηγή ρύπανσης σε μια άκρως παραγωγική περιοχή, που στηρίζεται στον αγροτικό τομέα, όπως είναι η υπολεκάνη Τυρνάβου.

Το 13^ο Κεφάλαιο, αποτελεί το επιστέγασμα όλων των προηγούμενων Κεφαλαίων, καθώς χρησιμοποιούνται τα προηγούμενα δεδομένα για την εφαρμογή και ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Το μαθηματικό μοντέλο ρυθμίστηκε βάσει των πρωτογενών δεδομένων σε συνθήκες μόνιμης ροής για το έτος 2017, ενώ χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά δεδομένα για το χρονικό διάστημα 2000-2012 προκειμένου να γίνει ρύθμιση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν στατιστικοί δείκτες, διαγράμματα συσχέτισης, αντιπαράθεση πιεζομετρικών χαρτών καθώς και σύγκριση των υπολογιζόμενων με τις προσομοιωμένες τιμές των παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου, ξεχωριστά για κάθε περίπτωση ρύθμισης. Στη συνέχεια έλαβε χώρα η επαλήθευση του μοντέλου για το χρονικό διάστημα 2013-2018, στο οποίο συμπεριλήφθηκαν τόσο πρωτογενείς μετρήσεις όσο και ιστορικά δεδομένα. Με τη χρήση του ρυθμισμένου πλέον μοντέλου, πραγματοποιήθηκε νέα προσομοίωση και εκτιμήθηκε η μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος υπό το καθεστώς διάφορων κλιματικών σεναρίων. Ακολούθως, προσομοιώθηκε και η περίπτωση της εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού, ως μέτρο αντιμετώπισης του δυσμενέστερου κλιματικού σεναρίου και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματά του. Στο τέλος του Κεφαλαίου, προτείνονται επιπρόσθετα μέτρα αποκατάστασης βασιζόμενα στις ιδιοσυνθήκες της περιοχής έρευνας και με οδηγό το Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών για το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (EL 08) (2014), καθώς και την 1^η Αναθεώρησή του (2017).

Το 14^ο και τελευταίο Κεφάλαιο, αποτελεί μια συνοπτική ανασκόπηση των εργασιών που υλοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή με ταυτόχρονη συζήτηση και σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα, τα οποία εξήχθησαν κατά τη διάρκεια και με την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας, παραθέτοντας ωστόσο προτάσεις και σκέψεις για μελλοντικές εργασίες βελτιστοποίησης, βασιζόμενες στα υπάρχοντα δεδομένα. Εξάλλου, αυτός είναι και ο γενικότερος σκοπός της έρευνας, η εξέλιξη κάποιων πραγμάτων αλλά και η δημιουργία ερεθισμάτων για περαιτέρω εξέλιξη, προάγοντας έτσι την εκάστοτε επιστήμη.

1.3 ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Τόσο η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας όσο και η υπολεκάνη Τυρνάβου έχουν γίνει αντικείμενο έρευνας από πλήθος ερευνητών, όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο. Ωστόσο, λόγω της έντονης εκμετάλλευσης που υπόκειται το υπόγειο υδατικό δυναμικό της Θεσσαλίας, ως η πλέον παραγωγική πεδιάδα της Ελλάδας, αποτελεί ένα ευαίσθητο και συνεχώς μεταβαλλόμενο υδατικό σύστημα. Η υπολεκάνη Τυρνάβου κατέχει ιδιαίτερη θέση στην ανατολική θεσσαλική πεδιάδα και παίζει ουσιαστικό ρόλο στη διαμόρφωση της ποιοτικής όσο και της ποσοτικής εξέλιξης των υδατικών πόρων της. Με γνώμονα τα παραπάνω, έλαβε χώρα η παρούσα έρευνα για την καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης, τη σύγκριση της με τα προηγούμενα χρόνια αλλά και τις προβλέψεις για τις μελλοντικές επικρατούσες συνθήκες. Στην προσπάθεια αυτή εφαρμόστηκαν πρότυπες για την περιοχή μέθοδοι, ολοκληρωμένες προσεγγίσεις σύνθεσης δικτύων παρακολούθησης και αξιολόγησης της περιβαλλοντικής ποιότητας των υδατικών πόρων και προέκυψαν σημαντικά νέα δεδομένα, το σύνολο των οποίων αποτελούν και τα καινοτόμα στοιχεία της παρούσας διατριβής. Πιο συγκεκριμένα και με τη σειρά που απαντώνται στη διατριβή:

- Έλαβε χώρα για πρώτη φορά στην ευρύτερη περιοχή αποτύπωση των απόλυτων υψομέτρων όλων των σημείων παρακολούθησης, με τη χρήση διαφορικού GPS υψηλής ακρίβειας. Το γεγονός αυτό συνετέλεσε σημαντικά στην αποσφαλμάτωση των αρχικών πιεζομετρικών χαρτών, καθώς οι αποκλίσεις από τις αρχικές μετρήσεις με τη χρήση συμβατικού GPS, σε κάποιες περιπτώσεις, έφθαναν και τα 10 m. Πρόκειται για μία σημαντική προσθήκη-μεταβολή, βάσει της οποίας προέκυψε και η αντίστοιχη ερμηνεία για την υδροδυναμική λειτουργία και εξέλιξη του υπόγειου υδατικού συστήματος.
- Με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών συγκεντρώθηκαν και επεξεργάστηκαν όλα τα ποσοτικά δεδομένα από το 1970 έως και το 2018 (συμπεριλαμβανομένων και των πρωτογενών). Με βάση την επεξεργασία αυτή ορίστηκαν τρεις περίοδοι αναφοράς και στη συνέχεια έλαβε χώρα πρότυπη σύγκριση των ποσοτικών δεδομένων των περιόδων αυτών. Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν, οπτικά αποτελέσματα σχετικά με την υδροδυναμική εξέλιξη του συστήματος.
- Η σύσταση του δικτύου παρακολούθησης των ποσοτικών και των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου συστήματος, πραγματοποιήθηκε μέσα από μια σύνθετη, όσο και πρότυπη για την περιοχή, διαδικασία επιλογής. Χρησιμοποιήθηκε πολυκριτηριακός αλγόριθμος δεκατεσσάρων (14) παραμέτρων, σύμφωνα με τον οποίο αξιολογήθηκαν όλα τα σημεία παρακολούθησης και επιλέχθηκαν, τελικά, τα καταλληλότερα με βάση τα κριτήρια που δόθηκαν και τα οποία εξυπηρετούσαν τους στόχους της παρούσας έρευνας. Οι δειγματοληψίες και οι σταθμημετρήσεις, του παραγόμενου από τον αλγόριθμο δικτύου παρακολούθησης, πραγματοποιήθηκαν βάσει αναλυτικού πρωτοκόλλου. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο συντάχθηκε σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων του ΕΛ.Γ.Ο. ΔΗΜΗΤΡΑ, στο

πλαίσιο προγενέστερων ερευνών και προσαρμόσθηκε στις ανάγκες της παρούσας έρευνας.

- Έλαβε χώρα περιβαλλοντική αξιολόγηση της ποιότητας των δειγμάτων του υπόγειου νερού με τη χρήση πρότυπου για την περιοχή δείκτη (Δείκτης PoS). Πρόκειται για μια εναλλακτική προσέγγιση αξιολόγησης και χαρακτηρισμού της ποιότητας των υπόγειων υδάτων, βάσει της οποίας γίνονται χρονικές συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών περιόδων δειγματοληψίας στην ίδια λεκάνη, αλλά και αξιολογήσεις μεταξύ λεκανών στις οποίες ασκούνται διαφορετικές πιέσεις και ελέγχονται από διάφορους μηχανισμούς.
- Εκτός των τακτικών δειγματοληψιών προς ανάλυση των υδροχημικών παραμέτρων, πραγματοποιήθηκαν για πρώτη φορά στη συγκεκριμένη περιοχή, δύο δειγματοληψίες προς ανάλυση των ισοτόπων ^{18}O και ^2H . Με βάση τις συγκεντρώσεις των ισοτόπων αυτών, συστάθηκε η Τοπική Ισοτοπική Γραμμή των Υπογείων Υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου. Ο συσχετισμός της γραμμής αυτής με τις ήδη υπάρχουσες ευρύτερης κλίμακας, απέδωσε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις ιδιοσυνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής.
- Από την επεξεργασία και τη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων των ισοτόπων, προέκυψαν σημαντικές ενδείξεις, οι οποίες εφόσον επιβεβαιωθούν, ανατρέπουν τα μέχρι τώρα δεδομένα σχετικά με την υδροδυναμική λειτουργία της συγκεκριμένης περιοχής, όπως αυτή έχει περιγραφεί μέχρι τώρα από παλαιότερους ερευνητές. Τα νέα αυτά δεδομένα στηρίχθηκαν στη συνδυαστική μεθοδολογία προσέγγισης που περιλάμβανε (α) τη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων των ισοτόπων, (β) την ρηξιγενή τεκτονική του ορεινού όγκου της Όσσας και (γ) τη σύγκριση των υδροχημικών αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με τα υδροχημικά δεδομένα παλαιότερης εργασίας.
- Αναπτύχθηκε και εφαρμόσθηκε μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής, βασισμένο σε όλα τα πρωτογενή δεδομένα της παρούσας έρευνας αλλά και σε προϋπάρχοντα στοιχεία που αντλήθηκαν από διάφορες πηγές. Σε σχέση με παλαιότερες προσπάθειες προσομοίωσης, αξιολογήθηκαν χρονοσειρές μεγάλης διάρκειας και προσεγγίστηκε η παράμετρος τροφοδοσίας του υπό μελέτη υδατικού συστήματος από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων βάσει των προσομοιώσεων καλά βαθμονομημένου χωρικά κατανεμημένου μοντέλου που συντέθηκε από ομάδες ερευνητών στο πλαίσιο σχετικά πρόσφατης ερευνητικής δραστηριότητας. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώθηκαν οι μηχανισμοί λειτουργίας και υδροδυναμικής εξέλιξης του υπόγειου υδατικού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου, σύμφωνα με τα επικαιροποιημένα στοιχεία. Επιβεβαιώθηκε στη συνέχεια ένα αξιόπιστο υδατικό ισοζύγιο, αντιπροσωπευτικό της σημερινής κατάστασης, και εκτιμήθηκε η μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος υπό το καθεστώς διάφορων κλιματικών σεναρίων.

1.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ

Η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας έχει γίνει αντικείμενο έρευνας κατά το παρελθόν από πολλούς Έλληνες και ξένους ερευνητές. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των μελετών αυτών, στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διατριβής αναφέρονται οι σημαντικότερες από αυτές, από τις οποίες και αντλήθηκαν πληροφορίες καθώς και αυτές οι οποίες εκπονήθηκαν στο στενότερο πλαίσιο του βόρειου τμήματος της ανατολικής πεδιάδας.

Οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας αποτυπώνονται σε δύο γεωλογικά φύλλα χάρτη (Γόννοι και Λάρισα) κλίμακας 1:50.000. Η γεωλογική χαρτογράφηση των φύλλων αυτών έγινε από τους Γεωλόγους του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) Δρ. Μιγκίρο (1979-1980) και Δρ. Πλαστήρα (1980-1982) αντίστοιχα και εκδόθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε το έτος 1985.

Η πρώτη χρονολογικά υδρογεωλογική μελέτη στην ευρύτερη περιοχή έγινε στο πλαίσιο του Προγράμματος Ανάπτυξης Υπόγειων Υδάτων Θεσσαλίας (ΠΑΥΥΘ) το 1972 με χρηματοδότηση από την Διεθνή Τράπεζα Επενδύσεων. Την υδρογεωλογική μελέτη του έργου εκπόνησε ο Γαλλικός οίκος Sogreah, ο οποίος ήταν και ο τεχνικός σύμβουλος, ενώ την υλοποίηση του έργου ανέλαβε η Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων του Υπουργείου Γεωργίας. Η μελέτη ολοκληρώθηκε το 1986 κατά την οποία έγιναν οι παρακάτω εργασίες:

- ανόρυξη 1,427 γεωτρήσεων (ερευνητικές, πιεζομετρικές και εκμετάλλευσης),
- εγκατάσταση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και ηλεκτροδότηση 1,130 γεωτρήσεων,
- κατασκευή υπόγειων αρδευτικών δικτύων σε 40,600 στρ.,
- εγκατάσταση επιφανειακών δικτύων τεχνητής βροχής, συνολικού μήκους 2,300 χλμ, σε 355,000 στρ.,
- κατασκευή στραγγιστικών - αποχετευτικών δικτύων 1,060 χλμ,
- κατασκευή αγροτικού – οδικού δικτύου 1,070 χλμ,
- αναδασμός σε 200,000 στρέμματα.

Ο Caruto (1990) μελέτησε λεπτομερώς τις τεκτονικές δομές και την κινηματική της Νεογενούς και Τεταρτογενούς παραμόρφωσης που υπέστησαν οι λεκάνες της Θεσσαλίας. Για τη γεωλογική χαρτογράφηση, ιδιαίτερα των Νεογενών και Τεταρτογενών σχηματισμών, αλλά και της λιθοστρωματογραφικής τους ακολουθίας, χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι γεωλογικοί χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε., οι οποίοι τροποποιήθηκαν, ολοκληρώθηκαν και γενικά βελτιώθηκαν. Το μεγαλύτερο μέρος των εργασιών πεδίου και ιδιαίτερα της τεκτονικής ανάλυσης αναλώθηκε στη μελέτη των εύθραυστων δομών που επηρεάζουν τόσο τα όρια των λεκανών όσο και των ιζηματογενών αποθέσεων.

Ο ίδιος ερευνητής σε σειρά εργασιών (1994, 1995, 2003, 2004) ασχολήθηκε με μια εξειδικευμένη και διεπιστημονική έρευνα, στην ανατολική Θεσσαλία, βασισμένη σε παλαιοσεισμολογικές, αρχαιολογικές και γεωφυσικές μεθόδους, ως προσπάθεια μιας ολιστικής προσέγγισης του προβλήματος της αναγνώρισης της ενεργής τεκτονικής καθώς

και τον γεωμετρικό χαρακτηρισμό των ρηγμάτων βελτιώνοντας έτσι τη γνώση για την τεκτονική της περιοχής.

Μια μεταπτυχιακή εργασία (Fitzsimons 1993) και μια διδακτορική διατριβή (Παναγόπουλος 1995) πραγματοποιήθηκαν στην εν λόγω περιοχή της υπολεκάνης Τυρνάβου κατά το παρελθόν. Ο πρώτος ασχολήθηκε διεξοδικά με την ανάλυση της υδροχημείας των υπόγειων υδάτων, χρησιμοποιώντας τις χημικές αναλύσεις του δικτύου παρακολούθησης που είχε συσταθεί για τις ανάγκες της αναφερόμενης διδακτορικής διατριβής. Η διδακτορική αυτή διατριβή αφορούσε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογική προσέγγιση διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων του αλλουβιακού υδατικού συστήματος του Τυρνάβου.

Το 2006 ανατέθηκε από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων στα συμπράττοντα μελετητικά γραφεία των: Παγώνη, Καϊμάκη, Καζάντζη, Μανωλόπουλου, Σιαπαρίνα και Χατζηδιαμαντή, το έργο με τίτλο «Μελέτη Κοστολόγησης Αρδευτικού Νερού στη λεκάνη απορροής Πηνειού (Υπολεκάνη Τυρνάβου). Το έργο ολοκληρώθηκε το 2008 και είχε ως σκοπό την ανάπτυξη μια ολοκληρωμένης μεθοδολογίας κοστολόγησης του αρδευτικού νερού, σχετικά με τις κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής εφαρμογής, στο πλαίσιο εναρμόνισης της Εθνικής νομοθεσίας με της Οδηγία – Πλαίσιο για τα νερά.

Το 2010 το Ι.Γ.Μ.Ε., με χρηματοδότηση από το Γ' Κ.Π.Σ. και σε συνέχεια της χρονοσειράς των ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων για τα υπόγεια νερά και τα υδροφόρα συστήματα της χώρας, υλοποιεί την υδρογεωλογική έρευνα «Υπόγειο Υδατικό Δυναμικό Θεσσαλίας». Στόχος της έρευνας ήταν η αποτίμηση του υπόγειου υδατικού δυναμικού, των κύριων υδροφόρων συστημάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, ο υπολογισμός των διαθέσιμων προς εκμετάλλευση αποθεμάτων και η αποκατάσταση και διατήρηση αυτών σε ικανοποιητικά επίπεδα, τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά (Μανάκος & Τσιούμας 2010).

Το 2010 επίσης, η Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Λάρισας αναθέτει στα συμπράττοντα γραφεία «Z&A Π. ΑΝΤΩΝΑΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Α.Μ.Ε.» και «ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ ΒΑΪΝΑΛΗΣ», το έργο με τίτλο «Υδρογεωλογική μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού καρστικού ασβεστολιθικού συστήματος Τιταρήσιου – Πηνειού ποταμού περιοχής Τυρνάβου». Βασικός σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η πρόταση της βέλτιστης μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού για την ανάκαμψη των ποιοτικών και ποσοτικών στοιχείων των υδροφόρων της περιοχής, μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, και μέσω αυτής η ορθολογικότερη διαχείριση των υδατικών πόρων της (υπογείων και επιφανειακών).

Τέλος, το 2014 σε εναρμόνιση με την Ευρωπαϊκή Οδηγία – Πλαίσιο για τη Διαχείριση των Υδάτων (Οδηγία 2000/60/ΕΚ), η Κοινοπραξία μελετητικών γραφείων με διακριτικό τίτλο: Κοινοπραξία Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, παραδίδει τη σύνθετη μελετητική εργασία που της ανατέθηκε από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής με τίτλο «Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος

Θεσσαλίας». Τα Σχέδια Διαχείρισης αποτελούν μια ιδιαίτερα απαιτητική μελέτη πολλαπλών επιπέδων, στα οποία περιλαμβάνεται η υλοποίηση δράσεων από πλήθος εμπλεκόμενων φορέων, καθώς και η καθοδήγηση και ο συντονισμός τους, με τελικό σκοπό να επιτευχθεί η καλή κατάσταση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων.

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η περιοχή έρευνας καταλαμβάνει το ΒΔ τμήμα την ανατολικής πεδιάδας της Θεσσαλίας. Ως τμήμα του ευρύτερου Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας, η περιοχή ταυτίζεται με την έννοια του κάμπου, καθώς επηρεάζεται μορφολογικά από τη μεγάλη έκταση της πεδιάδας, η οποία και διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό τα στοιχεία της αναπτυσσόμενης εκεί οικονομικής δραστηριότητας. Στις επόμενες παραγράφους αναφέρονται κάποια βασικά γεωγραφικά, διοικητικά και ιστορικά στοιχεία για την περιοχή έρευνας καθώς και στοιχεία φυσικού περιβάλλοντος της ευρύτερης περιοχής.

2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ – ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η πεδιάδα της Θεσσαλίας αποτελεί την μεγαλύτερη αλλουβιακή λεκάνη του ελληνικού χώρου και ανήκει στο ομώνυμο Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΛ08), το οποίο έχει συνολική έκταση 13,141km² και μέσο υψόμετρο 427m. Τοποθετείται στην κεντρική Ελλάδα και μέσω των μεσο-θεσσαλικών λόφων διακρίνεται σε δύο επιμέρους λεκάνες, τη δυτική θεσσαλική λεκάνη και την ανατολική θεσσαλική λεκάνη, οι οποίες αναπτύσσονται με διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ, ως μέρος του ευρύτερου τεκτονικού βυθίσματος που ελέγχει την εξέλιξη της περιοχής.

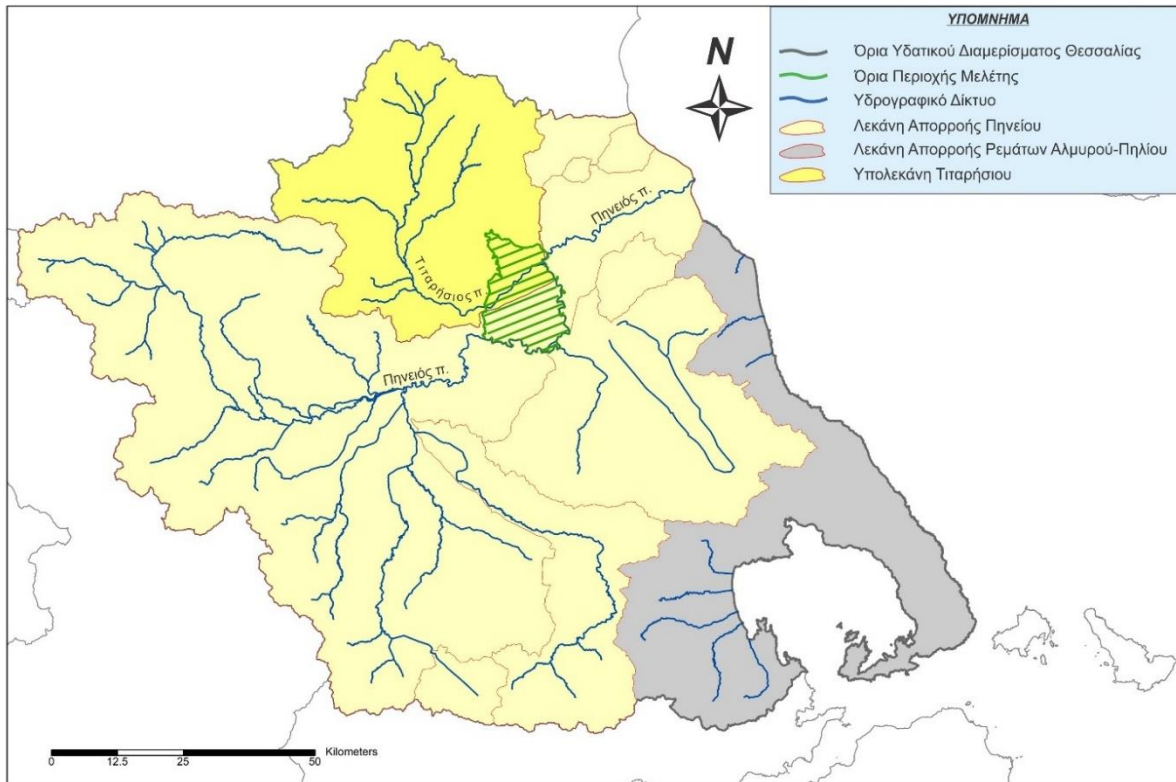
Σύμφωνα με τον προσδιορισμό λεκανών απορροής ποταμών, βάσει της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, στο πλαίσιο της μελέτης διαχείρισης υδατικών πόρων του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Καραβοκύρης κ.α. 2014), το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας περιλαμβάνει δύο κύριες υδρολογικές λεκάνες, του Πηνειού και των ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1. Κύριες υδρολογικές λεκάνες και κύριοι ποταμοί ή ρέματα του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας.

Υδατικό Διαμέρισμα	Κύριες Λεκάνες Απορροής	Έκταση (km ²)	Κωδικός Λεκανών Απορροής	Κύριοι Ποταμοί ή Ρέματα
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ (ΕΛ08)	Πηνειού	11,062	ΕΛ16	Πηνειός, Ενιπέας, Φαρσαλιώτης, Σοφαδίτης, Καλέντζης, Πάμισος, Πορταϊκός, Ληθαίος, Νεοχωρίτης, Τιταρήσιος
	Ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου	2,079	ΕΛ17	Λαχανόρεμα, Χολόρεμα, Ξεριάς Αλμυρού, Πλατανόρεμα, Ξηρόρεμα

Η περιοχή έρευνας από υδρολογικής άποψης αποτελεί ουσιαστικά τον ΒΔ τομέα της ευρύτερης ανατολικής θεσσαλικής λεκάνης και περιλαμβάνει μέρος των υδρολογικών

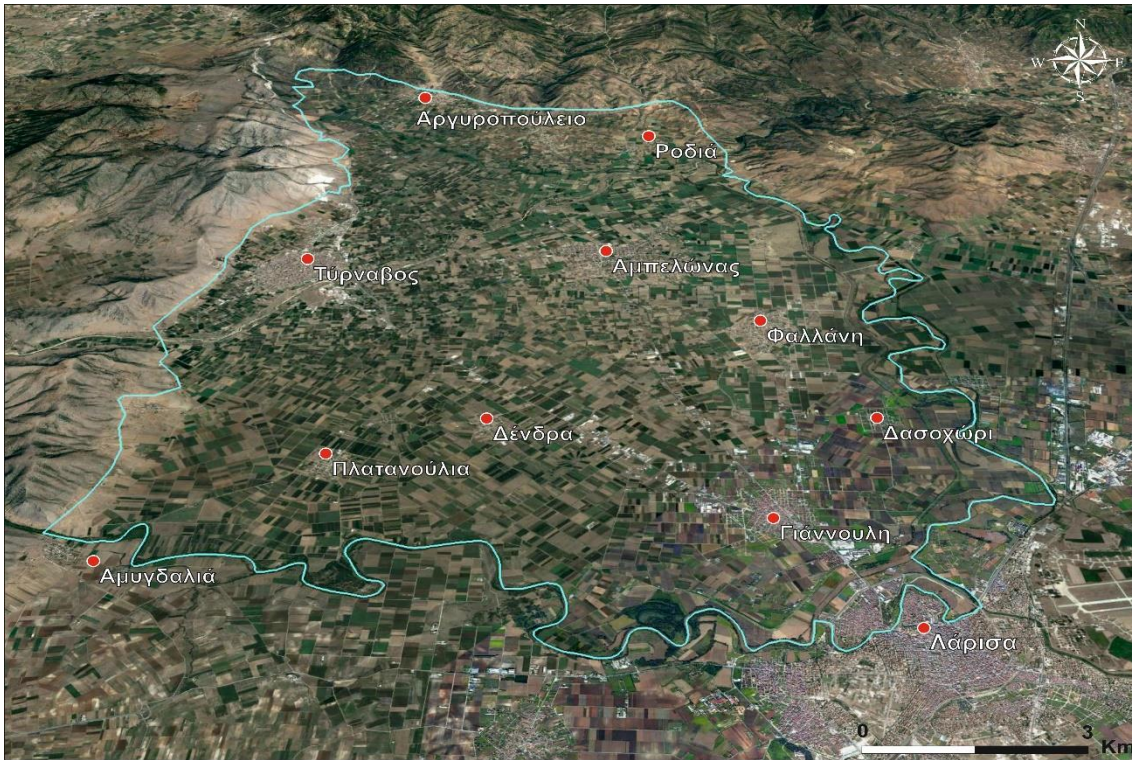
λεκανών του Τιταρήσιου ποταμού (ή Ξεριά λόγω του έντονου χειμαρρώδους χαρακτήρα που παρουσιάζει, με απορροή πρακτικά μόνο κατά τη διάρκεια έντονων φαινομένων βροχόπτωσης) στο βόρειο τμήμα της και του Πηνειού ποταμού στο νότιο. Η έκτασή της υπολογίζεται στα 251Km² περίπου, δηλαδή το 2.27% του συνόλου της έκτασης που καταλαμβάνει η λεκάνη απορροής του Πηνειού (Εικόνα 2.1). Με βάση το προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ 87, το κέντρο της υπολεκάνης έχει συντεταγμένες Χ: 350437.76 και Υ: 4386477.23.



Εικόνα 2.1. Λεκάνες Απορροής Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας και οριοθέτηση περιοχής έρευνας.

Η υπολεκάνη Τυρνάβου αναπτύσσεται σε Α-Δ διεύθυνση και έχει μέσο υψόμετρο 76m. Οριοθετείται στα ανατολικά και νότια από τον Πηνειό (Εικόνα 2.2), βόρεια από τις υπώρειες του νότιου τμήματος του Κάτω Ολύμπου, οι οποίες δομούνται από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Πελαγονικής ζώνης (Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 4.2) και στα δυτικά από τη λοφοσειρά Μελούνα, όπου και αναπτύσσεται το καρστικό σύστημα Δαμασίου-Κουτσόχερου-Τυρνάβου (Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 4.2).

Διοικητικά η περιοχή αποτελείται από τμήματα του Δήμου Λαρισαίων και του Δήμου Τυρνάβου. Εντός της περιοχής έρευνας χωροθετούνται αρκετοί οικισμοί, με τους μεγαλύτερους να είναι ο Τύρναβος (δυτικά) και ο Αμπελώνας (κεντρικά). Μικρότερους σε έκταση οικισμούς αποτελούν: η Γιάννουλη, η Αγία Σοφία, η Φαλλάνη, τα Πλατανούλια, τα Δένδρα και το Δασοχώρι στα νότια και το Αργυροπούλειο και η Ροδιά στα βόρεια (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2. Κυριότεροι οικισμοί της περιοχής (googleearth).

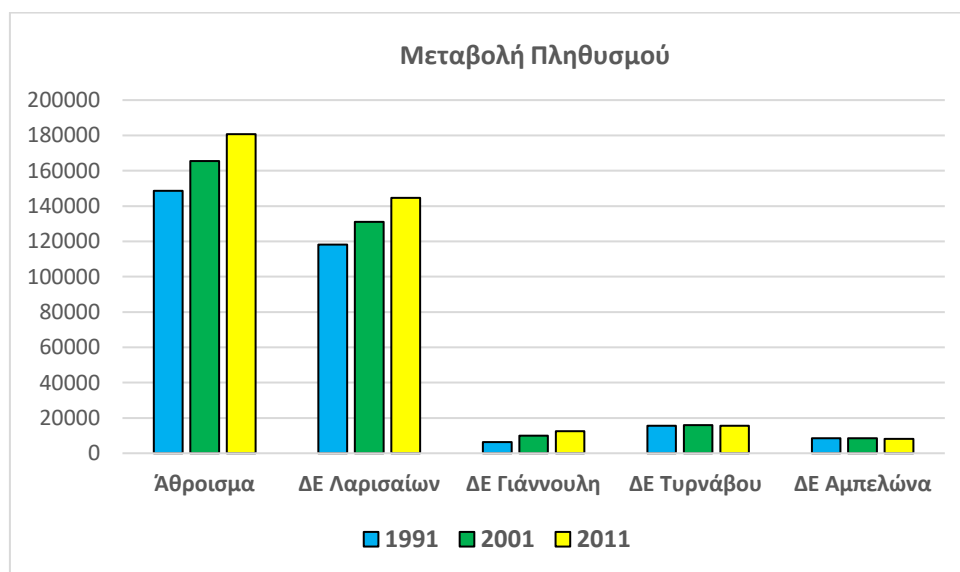
Ο πληθυσμός της περιοχής, με βάση την απογραφή του 2011, είναι περίπου 180,700 κάτοικοι συμπεριλαμβανομένης την πόλης της Λάρισας ενώ ο αντίστοιχος πληθυσμός για τα έτη 2001 και 1991 ήταν 165,500 και 148,500 αντίστοιχα (Πίνακας 2.2). Στο Διάγραμμα 2.1, φαίνεται η μεταβολή του πληθυσμού της περιοχής για την περίοδο 1991-2011 αθροιστικά και ανά Δημοτική Ενότητα. Για την Δημοτική Ενότητα Λαρισαίων και Γιάννουλης παρατηρείται μια αύξηση του πληθυσμού κατά 18.4% και 49.3% αντίστοιχα για την εικοσαετία, για την Δημοτική Ενότητα Αμπελώνας ελάττωση πληθυσμού κατά 6.34% ενώ για την Δημοτική Ενότητα Τυρνάβου υπάρχει μια πολύ μικρή ελάττωση 0.47%.

Πίνακας 2.2. Δημογραφικά στοιχεία περιοχής (ΕΛ.ΣΤΑΤ. απογραφή 2011).

	Πληθυσμός (1991)	Πληθυσμός (2001)	Πληθυσμός (2011)
	Δήμος Λαρισαίων		
Δημοτική Ενότητα Λαρισαίων*	118,090	131,095	144,651
Δημοτική Ενότητα Γιάννουλης	6,332	10,000	12,496
	Δήμος Τυρνάβου		
Δημοτική Ενότητα Τυρνάβου**	15,606	15,940	15,533
Δημοτική Ενότητα Αμπελώνα	8,566	8,463	8,055
Σύνολο πληθυσμού	148,594	165,498	180,735
Συνολική έκταση (km ²)			251
Πυκνότητα (km ²)	592.00	655.37	720.06

* Έχει αφαιρεθεί ο πληθυσμός της Τ.Κ.Τερψιθέας

** Έχει αφαιρεθεί ο πληθυσμός της Τ.Κ. Δαμασίου



Διάγραμμα 2.1. Συνολική μεταβολή πληθυσμού μεταξύ 1991-2011 και μεταβολή ανά Δημοτική Ενότητα.



Εικόνα 2.3. Πανοραμική άποψη της υπολεκάνης Τυρνάβου ΝΑ διεύθυνσης, πάνω από το όρος Μελούνα στα δυτικά κράσπεδα της περιοχής.



Εικόνα 2.4. Πανοραμική άποψη της υπολεκάνης Τυρνάβου προς δυτικά, πάνω από το νότιο τμήμα του Κάτω Ολύμπου στο ΒΑ τμήμα της περιοχής.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τρεις είναι οι επικρατέστερες εκδοχές, αναφορικά με την προέλευση της ονομασίας του Τυρνάβου. Κατά την πρώτη εκδοχή, Τύρναβος σημαίνει αγκαθότοπος, σύμφωνα με τη σλαβική διάλεκτο, ενώ βάσει της δεύτερης εκδοχής, η περιοχή έλαβε το όνομα της από τις

τούρνες (ποταμίσια λαβράκια στην Τουρκική γλώσσα), που υπήρχαν στα νερά του ποταμού Τιταρήσιου. Η τελευταία εκδοχή στηρίζεται σε χειρόγραφο του 10ου αιώνα με τίτλο «Βίος του Αγίου Νικολάου του Νέου το εν Βουναίνη», στο οποίο γίνεται αναφορά στο τοπωνύμιο «όρος Τέρναβον». Το αναφερόμενο όρος ταυτίστηκε από πολλούς με το όρος Μελούνα, στις παρυφές του οποίου είναι χτισμένος ο σημερινός οικισμός του Τυρνάβου. Ο Τύρναβος αποτελεί σταυροδρόμι, το οποίο συνδέει την κοιλάδα της Λάρισας με την περιοχή της Ελασσόνας, το υψόμετρό του είναι 90m και δεξιά του διέρχεται ο ποταμός Τιταρήσιος (πηγή: el.wikipedia.org).

Τα πλεονεκτήματα του ευρύτερου χώρου του Τυρνάβου, είχαν ως αποτέλεσμα να συγκεντρώσει το ενδιαφέρον του ανθρώπου από τις αρχές ακόμα του πολιτισμού του. Σύγχρονες μελέτες ανέδυσαν πληροφορίες σχετικά με μία κυρίαρχη θέση κατά τα πρώτα στάδια της παλαιολιθικής εποχής (200-400 χιλ. χρόνια πριν) στα δυτικά της στενής περιοχής της Ροδιάς, αμέσως μετά τη συμβολή του Τιταρήσιου ποταμού με τον Πηνειό. Κατά την περίοδο της νεολιθικής και χάλκινης εποχής (7^η έως 4^η και 3^η έως 1^η χιλιετία π.Χ.), τόσο η τωρινή τοποθεσία του οικισμού όσο και η ευρύτερη περιοχή επιλέχθηκαν με σκοπό τη μόνιμη εγκατάσταση (Demitrack 1986). Στα βόρεια του σύγχρονου νεκροταφείου, μία μαγούλα με το όνομα «Καραγάτς», είναι η μεγαλύτερη σε μέγεθος που εμφανίζεται στην περιοχή και τοποθετείται χρονολογικά στην ίδια εποχή (Karagiorgou 2001).

Κατά τη νεολιθική εποχή θεωρείται ότι κατασκευάστηκε το εκκλησάκι της Αγίας Άννας πάνω σε λόφο, στην περίμετρο του οποίου υπήρχαν μόνιμες κατοικίες λόγω της ύπαρξης πηγών υδάτων. Η περιοχή αυτή τοποθετείται 2.5km ΒΑ του Τυρνάβου, ονομαζόταν Βρύση ή Αγία Άννα και αποτελεί χώρο όπου ανασκάφθηκε πλήθος ευρημάτων και κεραμικών αντικειμένων, τα οποία χρονολογούνται τη νεολιθική εποχή. Άλλη μία περιοχή που αποτέλεσε πόλο έλξης για σταθερή εγκατάσταση, ήταν η τοποθεσία γύρω από τις πηγές Μάτι Τυρνάβου. Βρέθηκαν δύο οικισμοί της νεολιθικής εποχής σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, ένας στο βόρειο τμήμα των πηγών και ο δεύτερος ΒΑ αυτής.

Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται ο λόφος Καστρί, ο οποίος υπήρξε χώρος κατοικίας την εποχή του χαλκού. Τοποθετείται 3km ΝΑ της πόλης του Τυρνάβου και ήταν το επίκεντρο της «Φάλαννας» (Φαλλάνη), μιας πολύ σημαντικής αρχαίας πόλης της ευρύτερης περιοχής. Ο συγκεκριμένος λόφος αποτέλεσε αντικείμενο αναφοράς από διάφορους περιηγητές, μεταξύ των οποίων και ο Leake (1830), ο οποίος έκανε λόγο για μια θέση όπου αναμφίβολα υπήρξε κατά το παρελθόν κάποια σπουδαία Ελληνιστική πόλη, εκ της οποίας έχουν μείνει μόνο τα θεμέλια τετραγωνικού πύργου καθώς και έντονα σημάδια εκσκαφών.



Εικόνα 2.5. Καστρί Τυρνάβου (Η πιθανή θέση της αρχαίας Φάλαννας).

2.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Στην ευρύτερη περιοχή της υπολεκάνης Τυρνάβου υπάρχουν προστατευόμενες περιοχές που υπάγονται στο Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Natura 2000. Πρόκειται για ζώνες προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος, οι οποίες στοχεύουν στο να διασφαλίσουν, να διατηρήσουν και να αναδείξουν τα σημαντικότερα και τα πλέον απειλούμενα είδη καθώς και των ενδιαιτημάτων του, σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο βαθμό.

Δύο βασικές κατηγορίες περιοχών περιλαμβάνονται στο Δίκτυο Natura (1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (Σ.Δ.Λ.Α.Π.) Υδατικού Διαμερίσματος (Υ.Δ.) Θεσσαλίας (EL08) 2017:

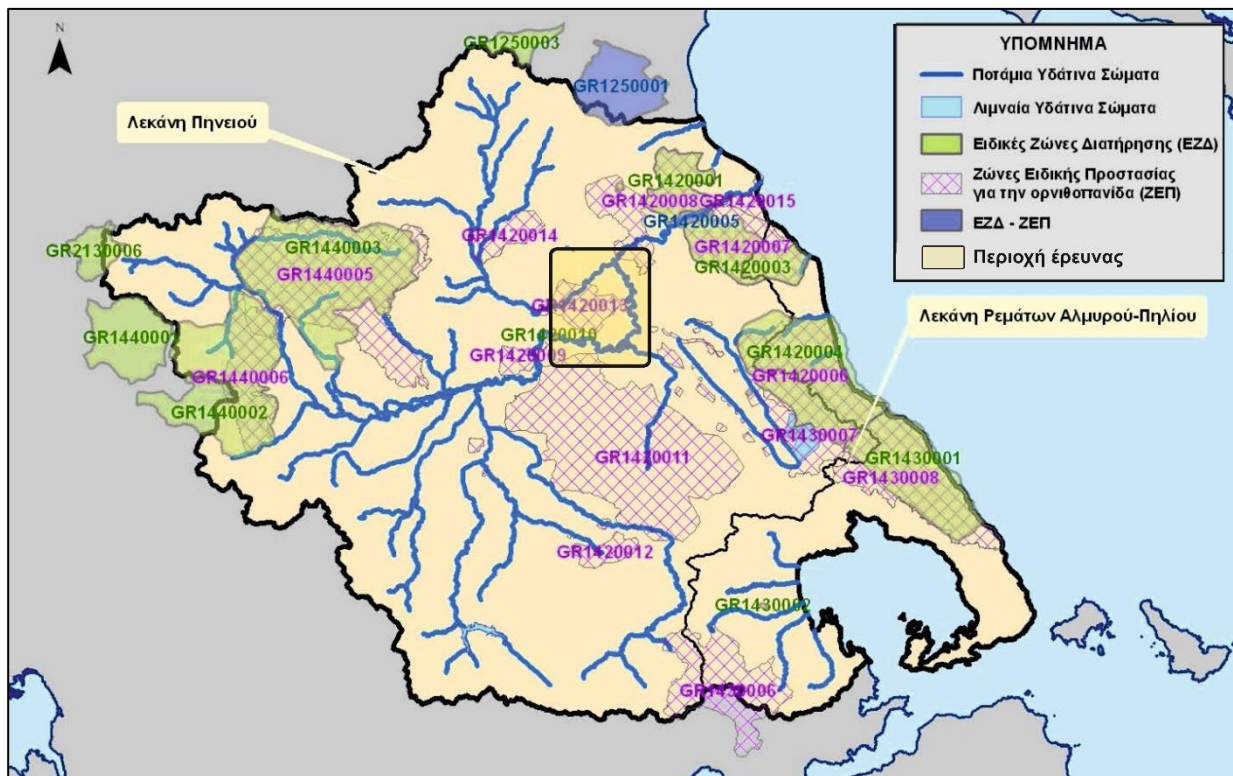
α) οι Ζώνες Ειδικής Προστασίας (Ζ.Ε.Π.) (Special Protected Areas (S.P.A.)), στις οποίες φιλοξενούνται κάποια είδη ορνιθοπανίδας (Παράρτημα I της Οδηγίας 2009/147/ΕΚ), ή/και ορισμένα άλλα, επίσης σημαντικά, μεταναστευτικά είδη ορνιθοπανίδας,

β) οι Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (Ε.Ζ.Δ.) (Special Area of Conservation (S.A.C.)), στις οποίες συμπεριλαμβάνονται σημαντικοί τύποι από οικοτόπους βάσει του Παραρτήματος I. Επίσης, μπορεί να φιλοξενούνται και είδη του Παραρτήματος II της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ, εξίσου σημαντικά.

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιοχές του Δικτύου Natura 2000, της ευρύτερης περιοχής έρευνας, μαζί με τους αντίστοιχους κωδικούς καθώς και την έκταση την οποία καταλαμβάνουν ενώ στη συνέχεια αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία για την κάθε περιοχή. Στην Εικόνα 2.6 αποτυπώνονται συνολικά οι περιοχές του Δικτύου Natura 2000 για όλο το Υ.Δ. Θεσσαλίας (1^η Αναθεώρηση Σ.Δ.Λ.Α.Π. Υ.Δ. Θεσσαλίας (EL08) 2017).

Πίνακας 2.3. Περιοχές του Δικτύου Natura 2000 στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.

ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ ΤΥΡΝΑΒΟΥ			
Κωδικός	Κατηγορία	Όνομασία περιοχής	Έκταση (km ²)
EL1420001	Ε.Ζ.Δ. (S.A.C.)	Κάτω Όλυμπος-Καλλιτεύκη	124.38
EL1420003	Ε.Ζ.Δ. (S.A.C.)	Αισθητικό Δάσος Όσσας	195.80
EL1420005	Ε.Ζ.Δ. & Ζ.Ε.Π. (S.A.C. & S.P.A.)	Αισθητικό Δάσος Κοιλιάδας Τεμπών	13.36
EL1420007	Ζ.Ε.Π. (S.P.A.)	Όρος Όσσα	241.26
EL1420008	Ζ.Ε.Π. (S.P.A.)	Κάτω Όλυμπος, Όρος Γοδαμάνι και Κοιλιάδα Ροδιάς	245.72
EL1420009	Ζ.Ε.Π. (S.P.A.)	Στενά Καλαμακίου και Όρη Ζάκρου	41.69
EL1420010	Ε.Ζ.Δ. (S.A.C.)	Στενά Καλαμακίου	4.74
EL1420013	Ζ.Ε.Π. (S.P.A.)	Περιοχή Τυρνάβου	94.77
EL1420015	Ζ.Ε.Π. (S.P.A.)	Δέλτα Πηνειού	33.59



Εικόνα 2.6. Περιοχές Natura 2000, στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (Τροποποιημένος χάρτης από την 1η Αναθεώρηση Σ.Δ.Λ.Α.Π. Υ.Δ. Θεσσαλίας (EL08) 2017).

Κάτω Όλυμπος - Όρος Γοδαμάνι και Κοιλιάδα Ροδιάς

Το τμήμα του Κάτω Ολύμπου περιλαμβάνει περιοχές στους πρόποδες των βουνών Ολύμπου και Όσσας. Κυριαρχούν τα δάση ελάτης και οξυάς, ωστόσο απαντώνται και δάση καστανιάς και μαύρης πεύκης κυρίως εντός των φαραγγιών. Οι κυριότεροι γεωλογικοί

σηματισμοί που δομούν την περιοχή είναι οι σερπεντινίτες, οι γνεύσιοι και οι αμφιβολίτες. Η σύνθετη αυτή γεωλογική δομή έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη βλάστησης που παρουσιάζει ετερογένεια ιδιαίτερα στα μεγαλύτερα υψόμετρα (1η Αναθεώρηση Σ.Δ.Λ.Α.Π. Υ.Δ. Θεσσαλίας (ΕΛ08) 2017). Αποτελεί πέρασμα για σημαντικά είδη αρπακτικών καθώς και τόπο αναπαραγωγής τους.

Αισθητικό Δάσος Όσσας – Όρος Όσσα

Λόγω των πολύ ευνοϊκών κλιματικών και περιβαλλοντικών συνθηκών, στην περιοχή αυτή αναπτύσσεται ένα μοναδικό δασικό σύμπλεγμα. Χαρακτηρίζεται από ποικιλότητα χλωρίδας και πανίδας, λόγω των πολλών και σημαντικών οικοτόπων που δημιουργούνται στο ιδιαίτερο, γεωμορφολογικά, τοπίο της περιοχής. Η περιοχή δεν ενδείκνυται για αγροτικές δραστηριότητες, ωστόσο η ποιότητα του εδάφους την καθιστά κατάλληλη για την ανάπτυξη δασοκομικών δραστηριοτήτων. Επικρατούν παρθένες και μικτές εκτάσεις δασών με εναλλαγές πλατύφυλλων και κωνοφόρων δέντρων.

Αισθητικό Δάσος Κοιλιάδας Τεμπών

Την κοιλάδα των Τεμπών διαρρέει ο Πηνειός ποταμός, λίγο πριν εκβάλει στο Αιγαίο πέλαγος. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα επιβλητική περιοχή όπου δεσπόζουν οι κατακόρυφες βραχώδεις πλαγιές σε συνδυασμό με την παραποτάμια δασώδη βλάστηση και το πλήθος των φυσικών πηγών. Οι βασικοί γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την περιοχή είναι σερπεντινίτες, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι και ασβεστόλιθοι. Πρόκειται για έναν χώρο υψηλής αισθητικής και ιδιαίτερης οικολογικής σημασίας λόγω του πλήθους των πτηνών αλλά και των ψαριών που απαντώνται. Αναφορικά με το ανθρώπινο αποτύπωμα στην περιοχή, οι κτηνοτροφικές δραστηριότητες, οι ασφαλτόδρομοι, το σιδηροδρομικό δίκτυο και οι διάφορες τουριστικές εγκαταστάσεις αποτελούν τις κύριες εκφάνσεις του.

Στενά Καλαμακίου – Όρη Ζάκρου

Όπως και στην περίπτωση των Τεμπών, ο Πηνειός ποταμός διασχίζει και το φαράγγι των Στενών του Καλαμακίου. Χαρακτηρίζεται από πλούσιο φυσικό τοπίο ιδιαίτερης γεωμορφολογίας. Εντοπίζεται έντονη κτηνοτροφική δραστηριότητα σε αντίθεση με τη γεωργία που σπανίζει. Αποτελεί ένα σημαντικό οικοσύστημα σε κομβικό σημείο της θεσσαλικής πεδιάδας και ως εκ τούτου δέχεται έντονες πιέσεις λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Σημαντικό καταφύγιο με άγρια πανίδα, πλούσια χλωρίδα καθώς και παροχή υψηλής προστασίας από πλημμυρικά φαινόμενα, λόγω της κατακράτησης των υδάτων (1^η Αναθεώρηση Σ.Δ.Λ.Α.Π. του Υ.Δ. Θεσσαλίας (ΕΛ08), Ενδιάμεση Φάση, Παραδοτέο 9, Επικαιροποίηση Μητρώου Προστατευόμενων Περιοχών, Μάρτιος 2017).

Στενά Καλαμακίου

Αποτελούν και αυτά φαράγγι, το οποίο διασχίζει ο Πηνειός και ανήκει στην Ειδική Ζώνη Διατήρησης (Ε.Ζ.Δ.) με έκταση ~5 km². Χαρακτηριστικό παραποτάμιο δάσος διαμέσου απογυμνωμένων λόφων, με χαρακτηριστικό γεωμορφολογικό ανάγλυφο. Τυπική βλάστηση ποτάμιου οικοσυστήματος, σπάνια πανίδα, μικρές εκτάσεις καλλιέργειών και

αρκετές κτηνοτροφικές δραστηριότητες είναι κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά της περιοχής. Ιδιαίτερο επίσης χαρακτηριστικό της περιοχής, ότι ανήκει στις Σημαντικές Περιοχές για τα Πουλιά της Ελλάδας και παρουσιάζει υψηλό ενδημισμό αναφορικά με τα ψάρια. Αναπτύσσεται σε κεντρικό τμήμα της Θεσσαλικής λεκάνης και ως εκ τούτου αποτελεί δέκτη αυξημένης ανθρωπογενούς πίεσης.

Περιοχή Τυρνάβου

Η ευρύτερη περιοχή του Τυρνάβου που έχει χαρακτηριστεί ως Ζώνη Ειδικής Προστασίας (Ζ.Ε.Π. ή Σ.Ρ.Α.) έχει έκταση περίπου 95 km². Ολόκληρη η περιοχή της Natura συμπεριλαμβάνεται στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού. Η συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί ένα σημαντικό χώρο αναπαραγωγής του απειλούμενου είδους *Falco naumanni*.

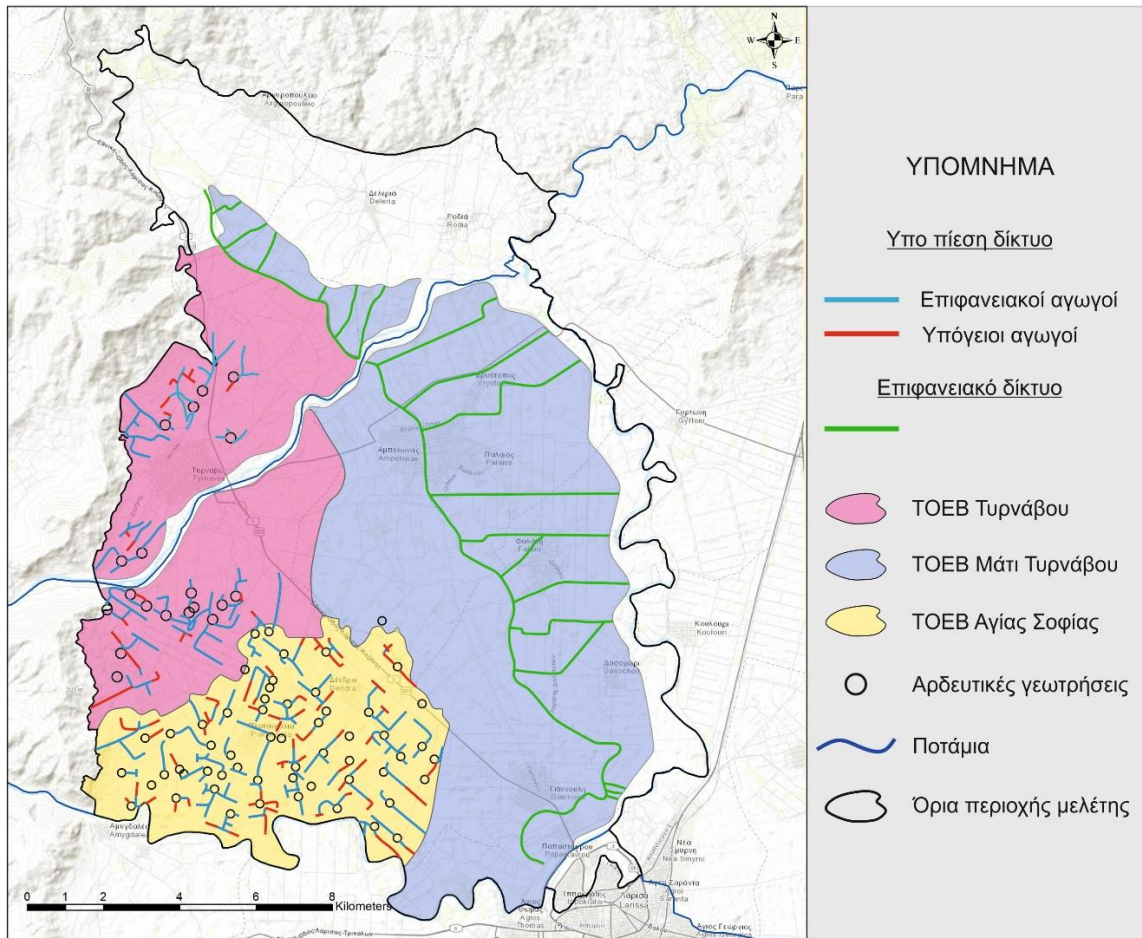
Δέλτα Πηνειού

Το Δέλτα του Πηνειού έχει χαρακτηριστεί ως Ζώνη Ειδικής Προστασίας (Ζ.Ε.Π. ή Σ.Ρ.Α.) καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 34 km². Σχεδόν στο σύνολό της η περιοχή Natura (~31 km²) ανήκει στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Πηνειού, ενώ η υπολειπόμενη έκταση (~3 km²) ανήκει σε θαλάσσια περιοχή. Το απόλυτο υψόμετρο κυμαίνεται από 0 έως 47 m, με το αντίστοιχο μέσο στα 4 m.

Ο χώρος του Δέλτα περιλαμβάνει τον κύριο κλάδο του Πηνειού, τα περιβάλλοντα στην κοίτη του δάση καθώς και τις όμορες καλλιέργειες. Συμπεριλαμβάνονται επίσης οι εκβολές του ποταμού, τα δημιουργούμενα έλη και οι μικρές λίμνες καθώς και οι αμμόλοφοι με την παράκτια ζώνη. Πρόκειται για μια πολύ σημαντική περιοχή για πλήθος υδρόβιων ειδών, τα οποία αναπαράγονται σε αξιοσημείωτους αριθμούς. Αποτελεί επίσης μεγάλης σημασίας περιοχή για αρπακτικά πουλιά, που φωλιάζουν στην περιοχή, ενώ συναντώνται και είδη που επιλέγουν ως ενδιαίτηματα, συνδυασμό γεωργικών και δασικών περιοχών και τα οποία αναπαράγονται σε σημαντικούς αριθμούς.

2.4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η διαχείριση του αρδευτικού νερού, εντός της περιοχής έρευνας, λαμβάνει χώρα από τρεις Τοπικούς Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων (Τ.Ο.Ε.Β.), οι οποίοι δραστηριοποιούνται στην περιοχή. Καταλαμβάνουν το 80% της συνολικής επιφάνειας της υπολεκάνης, καλύπτοντας σχεδόν όλες τις αρδευόμενες εκτάσεις και είναι οι εξής: ο Τ.Ο.Ε.Β. Αμπελώνα (ή Τ.Ο.Ε.Β. Μάτι Τυρνάβου), που είναι ο μεγαλύτερος όσον αφορά την έκταση του δικτύου, ο Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου και ο Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7. Αρδευτικό δίκτυο και οριοθέτηση των Τ.Ο.Ε.Β. της περιοχής και έρευνας.

Η άρδευση των καλλιεργειών της περιοχής έρευνας εντός των ορίων των Τ.Ο.Ε.Β. πραγματοποιείται μέσω συλλογικών αρδευτικών δικτύων. Τα δίκτυα αυτά στο σύνολό τους είναι σήμερα κλειστά υπό πίεση με τροφοδοσία από παραγωγικές γεωτρήσεις που ανορύχθηκαν στη συντριπτική τους πλειοψηφία τη δεκαετία του 1970, στο πλαίσιο υλοποίησης του Προγράμματος Ανάπτυξης των Υπόγειων Υδάτων της Θεσσαλίας (Π.Α.Υ.Υ.Θ.). Έκτοτε, το δίκτυο των γεωτρήσεων που εντάσσονται στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα της περιοχής εμπλουτίζεται με νέες γεωτρήσεις. Το συλλογικό αρδευτικό δίκτυο Μάτι Turνάβου μέχρι πρόσφατα τροφοδοτούνταν από ανοικτό δίκτυο άρδευσης (επενδεδυμένη διώρυγα και χωμάτινο δίκτυο αποστράγγισης που προοδευτικά μετατράπηκε σε αρδευτικά κανάλια) που κάλυπτε σημαντική έκταση της περιοχής έρευνας και τροφοδοτούνταν αρχικά από την εκφόρτιση των πηγών Μάτι Turνάβου, μέσω του υγροτόπου που αναπτύσσεται κατόπιν αυτής. Προοδευτικά, κατά μήκος των αρδευτικών διωρύγων ανορύχθηκαν γεωτρήσεις που συμπλήρωναν το δυναμικό της απορροής από τις πηγές Μάτι Turνάβου. Σήμερα, το επιφανειακό δίκτυο έχει αντικατασταθεί πλήρως με κλειστό υπό πίεση, ωστόσο η βασική πηγή τροφοδοσίας του παραμένει η ίδια (πηγαίες εκφορτίσεις Μάτι Turνάβου).

T.O.E.B. Μάτι Τυρνάβου

Το αρδευτικό δίκτυο της περιοχής Αμπελώνα αναπτύσσεται στο κέντρο της ανατολικής Θεσσαλίας βόρεια από την πόλη της Λάρισας. Αποτελείται από επιμήκη εδαφική λωρίδα με κατεύθυνση από βόρεια προς νότια και περιλαμβάνει τις γεωργικές εκτάσεις μεταξύ του αριστερού αναχώματος του Πηνειού και της κύριας αρδευτικής διώρυγας. Η περιοχή χωρίζεται σε δύο τμήματα, όπου το πιο μικρό σε έκταση βρίσκεται βόρεια του Τιταρησίου ποταμού και το άλλο στα νότιά του. Το αρδευτικό δίκτυο του T.O.E.B. από διοικητικής άποψης ανήκει στην επαρχία Τυρνάβου του νομού Λαρίσης, ενώ κατανέμεται γεωγραφικά στα αγροκτήματα του Δήμου Τυρνάβου και στα Τοπικά Διαμερίσματα Αργυροπουλίου, Ροδιάς, Δελερίων, Αμπελώνα, Βρυσόπου, Γιάννουλης και Φαλλάνης.

Το αρδευτικό έργο κατασκευάστηκε σε πρώτη φάση από το Υπουργείο Δημοσίων Έργων κατά την περίοδο 1947-1950, οπότε έγιναν οι επτά δευτερεύουσες διώρυγες, η συλλεκτήριος και πέντε δευτερεύουσες τάφροι. Ομοίως κατασκευάστηκε ο σίφωνας κάτω από τον Τιταρήσιο και πολλά τεχνικά έργα επί των διωρύγων.

Στον T.O.E.B. Μάτι Τυρνάβου συμμετέχουν 5,000 μέλη, ενώ εξυπηρετεί περίπου 85,000 στρέμματα (στοιχεία Δ.Ε.Β.). Τα 8,500 στρέμματα αφορούν καλλιέργειες που αρδεύονται μέσω του δικτύου του T.O.E.B, ενώ τα υπόλοιπα από ιδιωτικής χρήσης γεωτρήσεις, ο αριθμός των οποίων ξεπερνά τις 1000. Ο T.O.E.B. έχει στη δικαιοδοσία του 56 γεωτρήσεις καθώς και 12 συμπληρωματικής παροχής. Το νερό των πηγών διανέμεται στα αγροτεμάχια μέσω της βαρύτητας, ενώ με επιφανειακό ή υπόγειο (5km) δίκτυο αγωγών υπό πίεση ξεχωριστό για κάθε γεώτρηση.

Η διοίκηση, η συντήρηση και η λειτουργία του αρδευτικού αλλά και του στραγγιστικού δικτύου που εξυπηρετεί την έκταση των 8,500 στρεμμάτων, γίνεται αποκλειστικά από τον T.O.E.B. Επίσης, έχει αναλάβει τη διοίκηση, συντήρηση και λειτουργία των γεωτρήσεων που ανορύχθησαν κατά τη διάρκεια του Π.Α.Υ.Υ.Θ. και αφορούν την περιοχή δικαιοδοσίας του.

Στην Εικόνα 2.7. αποτυπώνεται το αρδευτικό δίκτυο στην περιοχή έρευνας (εξαιρείται το αρδευτικό δίκτυο υπό πίεση του T.O.E.B. Μάτι Τυρνάβου καθώς παραμένει αχαρτογράφητο).

T.O.E.B. Τυρνάβου

Η ευρύτερη περιοχή του T.O.E.B. Τυρνάβου υπάγεται διοικητικά στην επαρχία Τυρνάβου και ανήκει στο Τ.Δ. Τυρνάβου. Ο συγκεκριμένος T.O.E.B. εξυπηρετεί μια έκταση περίπου 15,500 στρεμμάτων (στοιχεία ΔΕΒ) και αριθμεί 1,236 μέλη. Τα 7,000 στρέμματα καλλιεργούνται με αρδευόμενες καλλιέργειες ενώ τα εναπομείναντα με ξηρικές. Έχει στη δικαιοδοσία του 28 γεωτρήσεις και η διανομή του νερού προς τα αγροτεμάχια γίνεται με ξεχωριστό δίκτυο αγωγών για κάθε γεώτρηση. Το αρδευτικό δίκτυο είναι υπόγειο σε ποσοστό πάνω από 85% του συνολικού μήκους των αγωγών. Εντός της περιοχής

δικαιοδοσίας του, λειτουργούν επίσης και περισσότερες από 300 ιδιωτικής χρήσης γεωτρήσεις.

Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας

Ο Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας υπάγεται και αυτός διοικητικά στην επαρχία Τυρνάβου του Νομού Λάρισας. Κατανέμεται χωρικά μεταξύ των αγροκτημάτων των Τ.Δ. Αγίας Σοφίας, Δένδρων και Πλατανουλίων. Εξυπηρετεί μια έκταση περίπου 24,000 στρεμμάτων (στοιχεία Δ.Ε.Β.), και αριθμεί 2,500 μέλη. Από αυτά, τα 11,000 καλλιεργούνται με αρδευόμενες καλλιέργειες, ενώ τα υπόλοιπα με ξηρικές.

Ο Τ.Ο.Ε.Β. έχει στη δικαιοδοσία του 48 γεωτρήσεις, εκ των οποίων οι 43 βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία. Η διανομή του νερού, από κάθε γεώτρηση προς τα αγροτεμάχια, γίνεται μέσω υπόγειου ή επιφανειακού υπό πίεση δικτύου αγωγών. Στην περιοχή λειτουργούν επίσης και 35 ιδιωτικής χρήσης γεωτρήσεις, οι οποίες εξυπηρετούν 3,000 στρέμματα. Πρόκειται για μεταγενέστερες και βαθύτερες γεωτρήσεις από αυτές του Τ.Ο.Ε.Β., με το στρόβιλο να είναι τοποθετημένος σε βάθος που κυμαίνεται από 110 έως 190 m έναντι 70 m στις γεωτρήσεις του Τ.Ο.Ε.Β.

3 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ-ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ-ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

3.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Όπως ήδη αναφέρθηκε η υπολεκάνη Τυρνάβου ανήκει στην λεκάνη Ανατολικής Θεσσαλίας, η οποία με τη σειρά της αποτελεί τμήμα του ευρύτερου τεκτονικού βυθίσματος της θεσσαλικής πεδιάδας. Όπως όλη η θεσσαλική πεδιάδα, η περιοχή της Ανατολικής Θεσσαλίας οριοθετείται από ορεινούς όγκους. Οι όγκοι αυτοί προέκυψαν από μια σειρά συμπιεστικών τεκτονικών γεγονότων, εκ των οποίων το τελευταίο σημειώθηκε από το Ηώκαινο έως και το Μέσο Μειόκαινο (Brunn 1956). Η αλληλένδετη σχέση των τεκτονικών τάφρων με την ταυτόχρονη δημιουργία των ορεινών όγκων της περιοχής είναι αποτέλεσμα κατακόρυφων κινήσεων τεμαχών, οι οποίες προκάλεσαν φαινόμενα διάβρωσης των ανυψούμενων ορεινών όγκων και φαινόμενα μεταφοράς-απόθεσης στη γειτονική βυθιζόμενη ταφρολεκάνη κατά το Τεταρτογενές.

Οι γεωλογικές αυτές ανακατατάξεις προκύπτουν επίσης από τη στρωματογραφική μελέτη των ιζηματογενών αποθέσεων της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας. Στην επιφάνεια των μεσο-θεσσαλικών λόφων στο κεντρικό τμήμα της Θεσσαλίας έχουν αποτεθεί λιμναία ιζήματα του Νεογενούς σε στρώματα. Τα ίδια αυτά στρώματα των λιμναίων ιζημάτων εντοπίστηκαν σε σημαντικό βάθος μέσα στις ταφρολεκάνες, όπου έχουν καλυφθεί από παχιά στρώματα νεότερων ποταμολιμναίων ιζημάτων του Τεταρτογενούς (Ψιλοβίκος 1991). Το γεγονός αυτό αποκαλύπτει την ύπαρξη μιας μεγάλης λίμνης στην περιοχή της Θεσσαλίας την περίοδο του Νεογενούς, η στάθμη της οποίας πρέπει να έφθανε σε σημερινό υψόμετρο μεγαλύτερο από 300-400m. Την καταστροφή της λίμνης αυτής φαίνεται ότι ακολούθησαν κατακόρυφες κινήσεις επιμέρους ταφρολεκανών, μέσα στις οποίες σχηματίστηκαν μικρότερες λίμνες κατά το Τεταρτογενές. Έτσι εξηγείται και η απόθεση των ιζημάτων του Τεταρτογενούς (ποταμολιμναίων) επάνω στα ιζήματα του Νεογενούς.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η εξέλιξη των γεωλογικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας κατά το Νεογενές και Τεταρτογενές (τελευταία 10-15 εκ. έτη) ήταν πολύπλοκη. Ανάλογα πολύπλοκη ήταν και η εξέλιξη των ποταμών της περιοχής, οι οποίοι έπρεπε να προσαρμοστούν ανάλογα. Μια σύντομη περιγραφή των εξελικτικών διεργασιών της περιοχής έρευνας αλλά και της ευρύτερης περιοχής προκύπτει συνδυαστικά από τους Caruto (1990), Ψιλοβίκο (1991) και Caruto et al. (1994) και μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα στάδια (Βρουχάκης 2003).

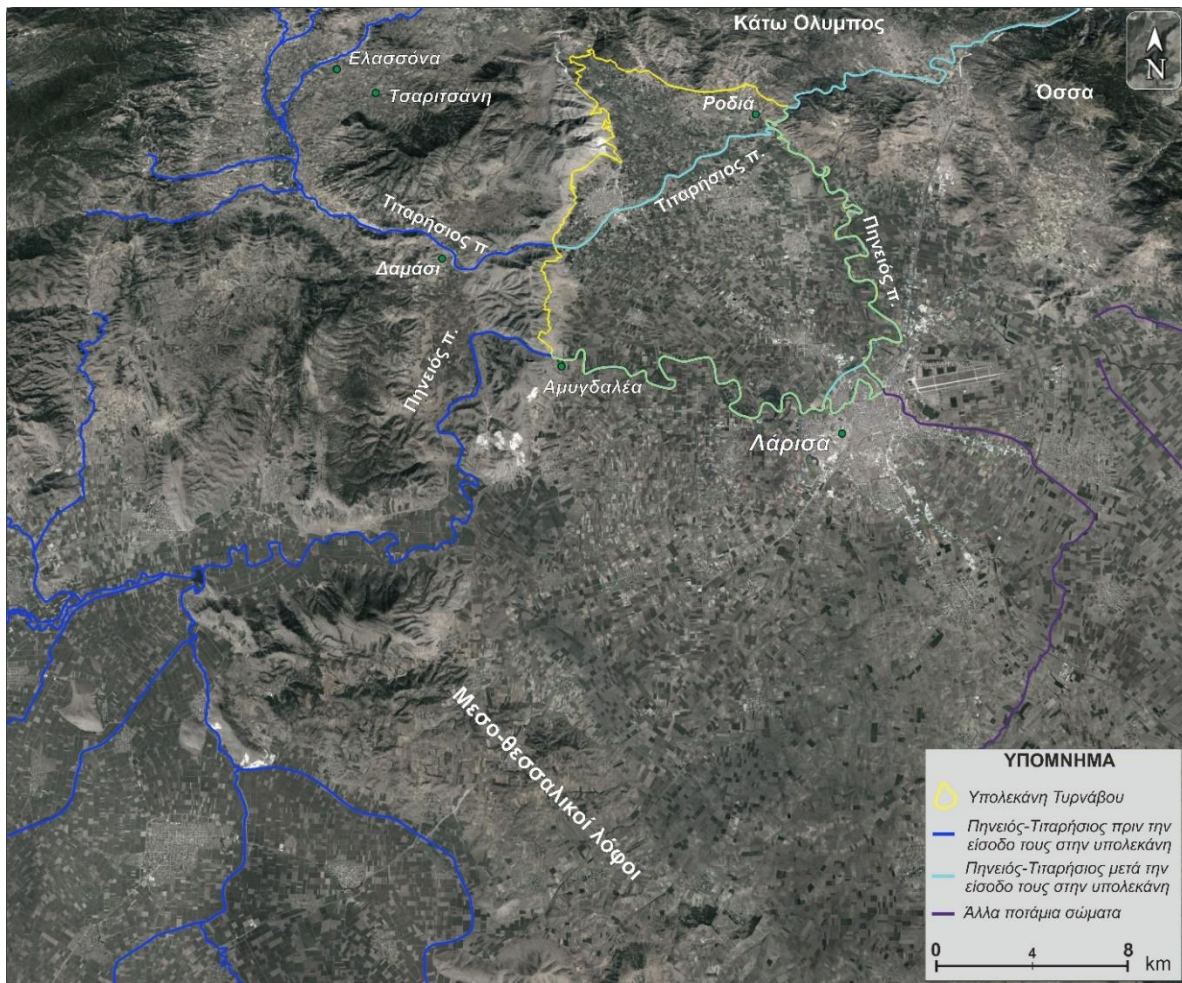
Στάδιο 1 (Νεογενές). Κατά την περίοδο αυτή στην περιοχή της Ανατολικής Θεσσαλίας επικράτησε ένα τεκτονικό καθεστώς εφελκυστικών τάσεων ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης, το οποίο πιθανότατα σχετιζόταν με την μεταορογενετική φάση κατάρρευσης του ορογενούς. Στη λεκάνη της Λάρισας δυτικά του ορεινού συμπλέγματος Όλυμπου-Όσσας-Μαυροβουνίου, δημιουργήθηκε ένα μεγάλο ενδοορεινό βύθισμα, στη διάρκεια της εφελκυστικής αυτής φάσης, το οποίο κατακλύστηκε με νερό. Η διαδικασία αυτή είχε ως αποτέλεσμα τη

δημιουργία της εκτεταμένης Πλειοκαινικής λίμνης της Λάρισας (βάθους αρκετών δεκάδων μέτρων) και την απόθεση ιζημάτων λιμναίας φάσης. Το νερό της λίμνης στην προσπάθειά του να διαφύγει προς την όμορη λεκάνη του Θερμαϊκού διανοίγει την κοιλάδα του Πρωτοπηνείου (περιοχή κοιλάδας Τεμπών), ανάμεσα στον Όλυμπο και την Όσσα. Το γεγονός αυτό επέτρεψε τη μόνιμη διαφυγή των προερχόμενων από την πεδιάδα της Λάρισας νερών με αποτέλεσμα την εκκένωση της λίμνης. Δημιουργείται κατ' αυτό τον τρόπο το αρχικό υδρογραφικό δίκτυο των μετέπειτα παραποτάμων του Πηνειού (Helly et al. 2000).

Στάδιο 2 (Κάτω-Μέσο Τεταρτογενές). Κατά το στάδιο αυτό σχηματίζονται οι επιμέρους λεκάνες μέσα στο βύθισμα της Θεσσαλίας, ενώ παράλληλα λαμβάνουν χώρα τεκτονικές ανακατατάξεις μεγάλης κλίμακας καθώς και κλιματικές μεταβολές στην ευρύτερη περιοχή. Μικρότερες λίμνες, οι οποίες αναπτύσσονται στις νέες ταφρολεκάνες (Ανατολική και Δυτική Θεσσαλική λεκάνη), διαδέχονται τη μεγάλη Θεσσαλική λίμνη και παρουσιάζουν υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους. Εντός των σκληρών πετρωμάτων, στις ζώνες επικοινωνίας, δημιουργούνται οι κοιλάδες του Παλαιοπηνείου και των παραποτάμων του. Η κοιλάδα του Παλαιοπηνείου διανοίγεται στην περιοχή των Τεμπών, εντός του πυθμένα αυτής του Πρωτοπηνείου, με αποτέλεσμα η αποστράγγιση των Θεσσαλικών βυθισμάτων να συνεχίζεται προς τον Θερμαϊκό κόλπο.

Στάδιο 3 (Ανω Τεταρτογενές). Μια νέα φάση γρήγορης αποστράγγισης των Θεσσαλικών βυθισμάτων προς τον κόλπο του Θερμαϊκού ξεκινάει αμέσως μετά τη βύθιση της Αιγιήδας (τελευταία 500,000 έτη). Οι λίμνες υποχωρούν διευκολύνοντας τη συνένωση της κύριας κοίτης του Πηνειού με τους παραποτάμους του, ενώ κάποιες λίμνες παραμένουν κατά θέσεις. Η κατά βάθος διάβρωση του Πηνειού και των παραποτάμων του συνεχίζεται με ταχύτατους ρυθμούς, αναγκάζοντας τις κοίτες τους να εγκλωβιστούν εντός των σκληρών πετρωμάτων του υποβάθρου, σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό τις στενές κοιλάδες στα Τέμπη, τη Ροδιά, το Καλαμάκι και σε μεγαλύτερο υψόμετρο, τα φαράγγια στα στενά του Σαρανταπόρου, στα στενά της Πύλης κ.α. (Ψιλοβίκος 1991, Βρουχάκης 2003).

Η πεδιάδα της Θεσσαλίας αποτελεί μια εσωτερική λεκάνη στον ελληνικό χώρο, η οποία για αρκετές χιλιάδες χρόνια αποτελούσε ένα κλειστό υδρολογικό και φυσικογεωγραφικό σύστημα. Οι δυο αυτοτελείς υδρογεωλογικές λεκάνες από τις οποίες αποτελείται, έχουν έκταση 4,520Km² (περίπου το 35% της συνολικής έκτασης της περιφέρειας) και το υψόμετρο τους κυμαίνεται από 40m έως 200m. Διαχωρίζονται από μια επιμήκη λοφοσειρά, η οποία υψώνεται στο κέντρο της πεδιάδας και περιλαμβάνει την οροσειρά Ζάρκου - Τιτάνου - Φυλυΐου – Χαλκηδονίου (μεσο-Θεσσαλικοί λόφοι).



Εικόνα 3.1. Απεικόνιση πορείας των ποταμών Πηνειού και Τιταρήσιου πριν και κατά την είσοδό τους στην υπολεκάνη Τυρνάβου.

Η λεκάνη της ανατολικής Θεσσαλίας αποτελεί κλειστό σύστημα χωρίς επικοινωνία με τη θάλασσα. Σε αυτήν περιλαμβάνονται ένα Πλειοκαινικό βύθισμα νότια της Λάρισας και η Τεταρτογενής λεκάνη της Κάρλας. Άρχισε να διαμορφώνεται κατά το Πλειόκαινο με θαλάσσια φάση και στη συνέχεια σε λιμναίο περιβάλλον. Κατά το Τεταρτογενές εναποτέθηκαν ποταμολιμναϊκές προέλευσης ιζητάτα, με τα πλέον αδρόκοκκα προς τα δυτικά και τα λεπτόκοκκα στα ανατολικά τμήματα της λεκάνης. Η απουσία ροής προς τη θάλασσα δημιούργησε συνθήκες λιμναίου περιβάλλοντος, καθώς η κοιλάδα των Τεμπών δεν είχε ακόμη διανοιχθεί. Η ανύψωση της λεκάνης στο Τεταρτογενές με αντίστοιχη κάθοδο της ανατολικής περιοχής, συνέβαλε στο σχηματισμό της λίμνης Κάρλας (Αντωναρόπουλος & Βαϊνάλης 2010).

Το υδρογραφικό δίκτυο της Θεσσαλίας, όπως και σε ολόκληρη την Πελαγονική ζώνη, αναπτύχθηκε ασύμφωνα προς το επιφανειακό ανάγλυφο, χωρίς οργάνωση και αυτονομία. Με τον όρο ασύμφωνα δηλώνεται η μη ανάπτυξη του δικτύου παράλληλα προς την κεντρική επιμήκη βυθιζόμενη ζώνη, όπως συμβαίνει σε άλλες περιοχές, όπως στις λεκάνες του Αξιού, του Στρυμόνα και του Νέστου. Στην ανατολική πεδιάδα υπάρχουν δύο μεγάλα

ποτάμια, ο Πηνειός και ο Τιταρήσιος, τα οποία αποτελούν τα δύο κύρια συστήματα αποστράγγισης του ανατολικού βυθίσματος.

Από τη συμβολή δύο ρεμάτων, του Μαλακασιώτικου που πηγάζει από το Λάκμο στην Πίνδο και του ρέματος Μουργκάνι, που πηγάζει από την Αντιχάσια, σχηματίζεται ο Πηνειός ποταμός. Εισέρχεται στην ανατολική πεδιάδα από την περιοχή της Αμυγδαλέας (στενά Καλαμακίου) (Εικόνα 3.1) ακολουθώντας ΑΝΑ/κή διεύθυνση μέχρι την πόλη της Λάρισας, όπου και στρέφεται προς βορρά (Εικόνα 3.1). Ο Τιταρήσιος ποταμός πηγάζει από τις δυτικές κλιτύες του Ολύμπου, εισέρχεται στην ανατολική πεδιάδα από την περιοχή του Δαμασίου, όπου και στρέφει την αρχική ΝΝΑ/κή διεύθυνσή του σε ΒΑ/κή (Εικόνα 3.1).

Οι δύο ποταμοί συμβάλουν στην περιοχή των στενών της Ροδιάς και στη συνέχεια ο Πηνειός πλέον αφού τέμνει εγκάρσια τους ορεινούς όγκους των παράλληλων οροσειρών, Κάτω Ολύμπου από τα δυτικά και Όσσας από τα ανατολικά (Εικόνα 3.1), εκβάλλει στο Αιγαίο Πέλαγος διαμέσου των Τεμπών, έχοντας διανοίξει προηγουμένως βαθιές κοιλάδες και φαράγγια. Οι υδρογραφικοί αυτοί χαρακτήρες συνδέονται αναμφισβήτητα με την τεκτονική δομή (νεοτεκτονική) και εξέλιξη της Πελαγονικής. Προφανώς τόσο οι μεγάλοι όσο και οι μικροί ποταμοί, που ενδεχόμενα πριν το Τεταρτογενές είχαν ΒΒΔ/κή – ΝΝΑ/κή διεύθυνση, ακολούθησαν μετά το Τεταρτογενές τις νεότερες τεκτονικές γραμμές ΒΑ – ΝΔ/κής έως ΑΒΑ – ΔΝΔ/κής διεύθυνσης, σχηματίζοντας το ασύμφωνο υδρογραφικό δίκτυο.

Σημειώνεται ότι η επιγενετική (νεότερη ηλικιακά) κοιλάδα των στενών της Ροδιάς (Εικόνα 3.1) δεν αποτελεί προϊόν οπισθοδρομούσας διάβρωσης από τη διάνοιξη των Τεμπών κατά την αρχική αποστράγγιση του βυθίσματος της Θεσσαλίας, αλλά εγκιβωτισμένη μαιανδρική μορφή του Πηνειού στο σημείο αυτό εξαιτίας συνεχούς διάβρωσης, λόγω του νεοτεκτονικού καθεστώτος (Αντωναρόπουλος κ.α. 2010), που αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Εσωτερικά της λεκάνης του Τιταρησίου αναπτύσσονται μικρότερες υπολεκάνες και προσχωματικές πεδιάδες, εκ των οποίων οι πιο κοντινές ως προς την περιοχή έρευνας είναι οι εξής:

Υπολεκάνη Δαμασίου: Η ύπαρξη του ορεινού όγκου Ζάρκου χαρακτηρίζει την ευρύτερη περιοχή του Δαμασίου. Ο Τιταρήσιος κόβει τον ορεινό αυτό όγκο σχεδόν κάθετα δημιουργώντας μία επιμήκη λεκάνη μικρού εύρους, όπου κυριαρχούν οι ποτάμιες αναβαθμίδες.

Υπολεκάνη Ελασσόνας - Τσαρίτσανης : Αποστραγγίζεται από τον ποταμό Ελασσονίτικο, ο οποίος αποτελεί παραπόταμο του Τιταρησίου. Το υπόβαθρο της νεογενούς λεκάνης της Ελασσόνας ανήκει γεωτεκτονικά στην Πελαγονική ζώνη ενώ το εσωτερικό της καλύπτεται από Τεταρτογενείς αποθέσεις και Νεογενή ιζήματα. Το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης δομείται από το κρυσταλλοσχιστώδες μεταμορφωμένο υπόβαθρο της Πελαγονικής ζώνης, ενώ στην Τσαριτσάνη εμφανίζονται μικρής έκτασης όγκοι μαρμάρου, όπως και στα ανατολικά της λεκάνης, στα όριά της με την υπολεκάνη Τυρνάβου. Παρατηρούνται επίσης

λιγνιτοφόρες αποθέσεις, αντιπροσωπευτικές ποτάμιου περιβάλλοντος, μέσα στους Νεογενείς σχηματισμούς.

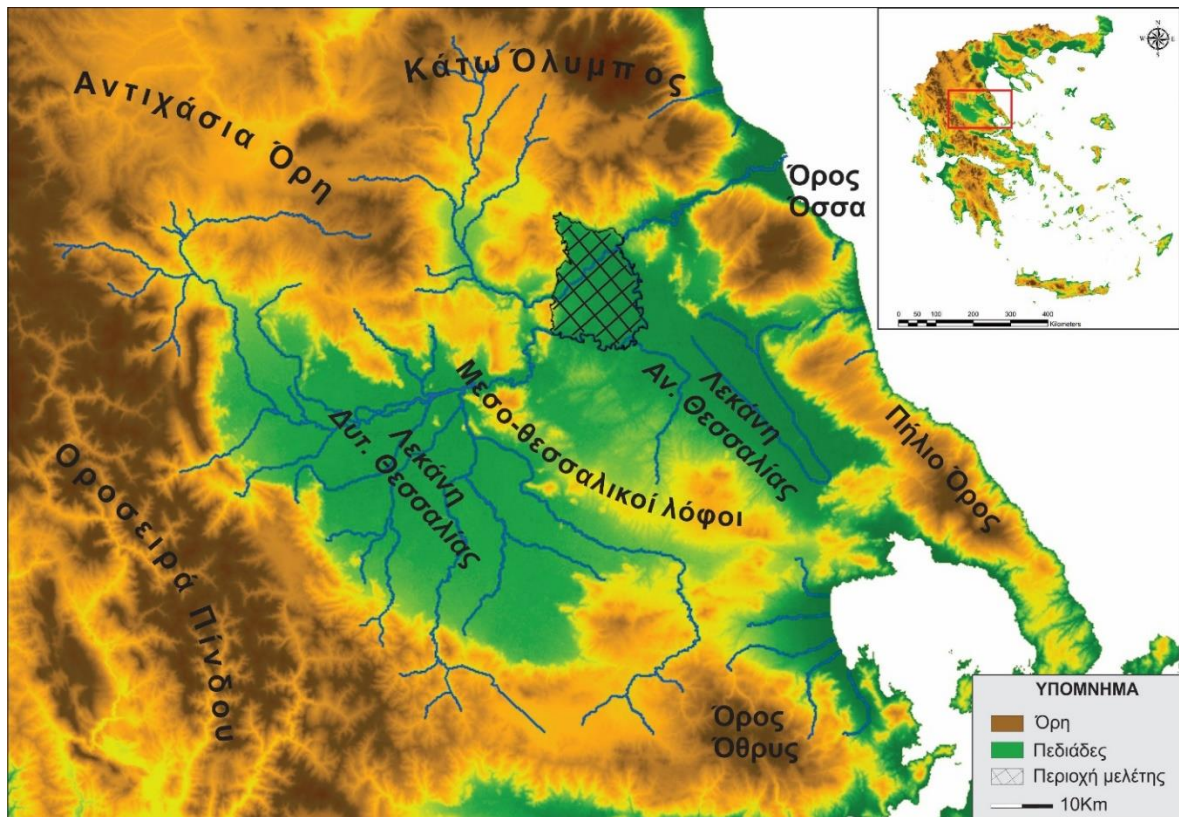
3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ

Οι δύο μεγάλες λεκάνες της Θεσσαλίας οριοθετούνται από τα Αντιχάσια Όρη και το νότιο τμήμα του Κάτω Ολύμπου στα βόρεια, από την οροσειρά της Πίνδου στα δυτικά, από το Όρος Όρθυς στα νότια και από τα Όρη Πήλιο και Όσσα στα ανατολικά (Εικόνα 3.2). Η υπολεκάνη Τυρνάβου, ως τμήμα της ανατολικής θεσσαλικής πεδιάδας, δεν αποτελεί μια αυτόνομη υδρολογική λεκάνη καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί τμήμα της λεκάνης απορροής του Τιταρήσιου και κατ' επέκταση του Πηνειού ποταμού και η οριοθέτησή της έγινε με καθαρά υδρογεωλογικά κριτήρια.

Στην Εικόνα 3.2 αποδίδεται σε δισδιάστατη μορφή το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας με τις δύο μεγάλες τάφρο-λεκάνες ενώ στην Εικόνα 3.3 αποδίδεται η περιοχή έρευνας (α) και η ευρύτερη περιοχή (β) σε τρισδιάστατη απεικόνιση, με τη βοήθεια του εργαλείου ArcScene του λογισμικού πακέτου ArcGIS 10.1.

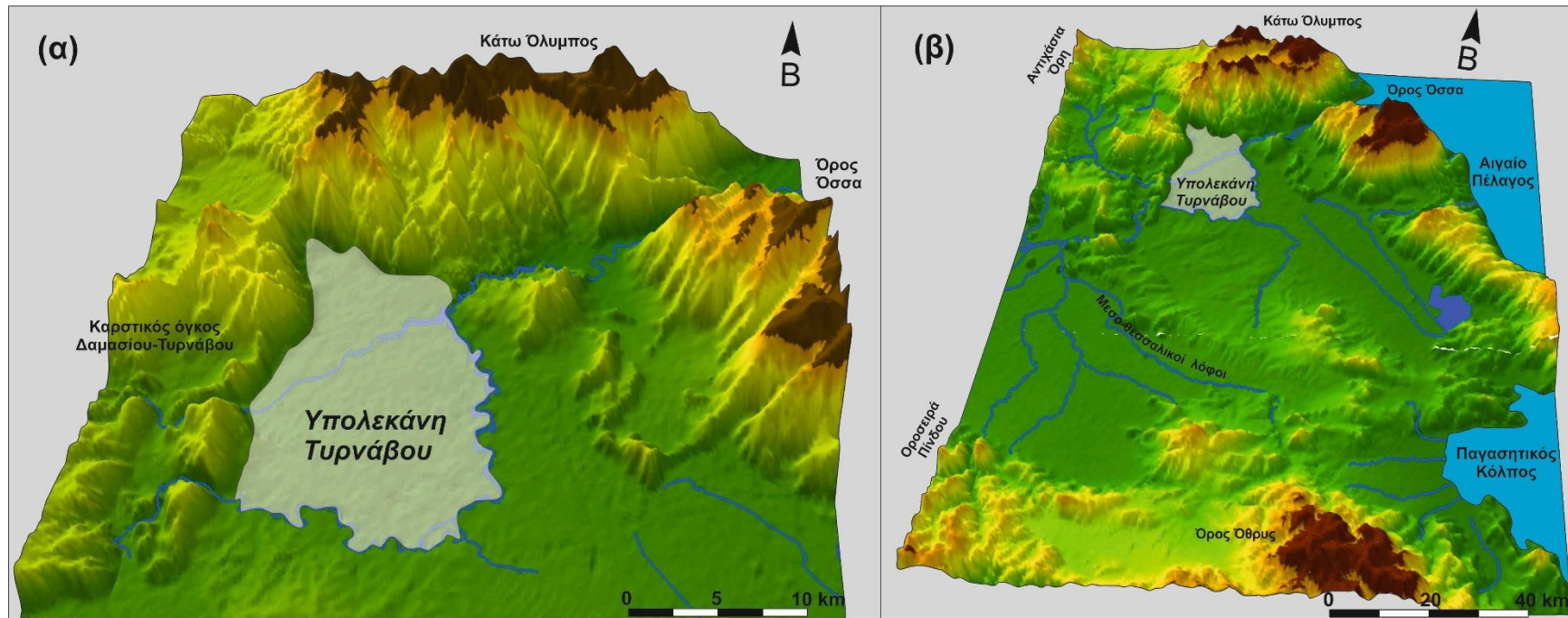
Το ανάγλυφο της περιοχής έρευνας μπορεί να χαρακτηριστεί ως πεδινό (υψόμετρο < 100m) ως επί το πλείστον, εκτός των δυτικών παρυφών όπου αναπτύσσεται το καρστικό σύστημα Τυρνάβου-Δαμασίου-Κουτσοχέρου και των λοφωδών εξάρσεων στο ΝΔ και ΒΑ της τμήμα. Η υπολεκάνη έχει έκταση 251 km², περίμετρο 106 Km και μέσο υψόμετρο 76m.

Στο πλαίσιο της διατριβής συντέθηκε χάρτης μορφολογικών κλίσεων της περιοχής (Εικόνα 3.4) από την επεξεργασία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) με μέγεθος κελιού (28.2m x 28.2m) (asterweb.jpl.nasa.gov), με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και ειδικότερα του πακέτου ArcGIS 10.1. Η επιφάνεια της περιοχής έρευνας διαχωρίστηκε σε έξι ζώνες μορφολογικών κλίσεων, σύμφωνα: 0-2%, 2-6%, 6-12%, 12-20%, 20-35% και >35%, έτσι ώστε να γίνει αποτύπωση του μορφολογικού αναγλύφου της υπολεκάνης. Η διαβάθμιση των κλάσεων της τοπογραφικής κλίσης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το διαχωρισμό που έχει ακολουθηθεί σε γενικές γραμμές σε παρόμοιες έρευνες (Koutsi and Stournaras 2011, Mirus and Loague 2013, Tziritis et al. 2020).

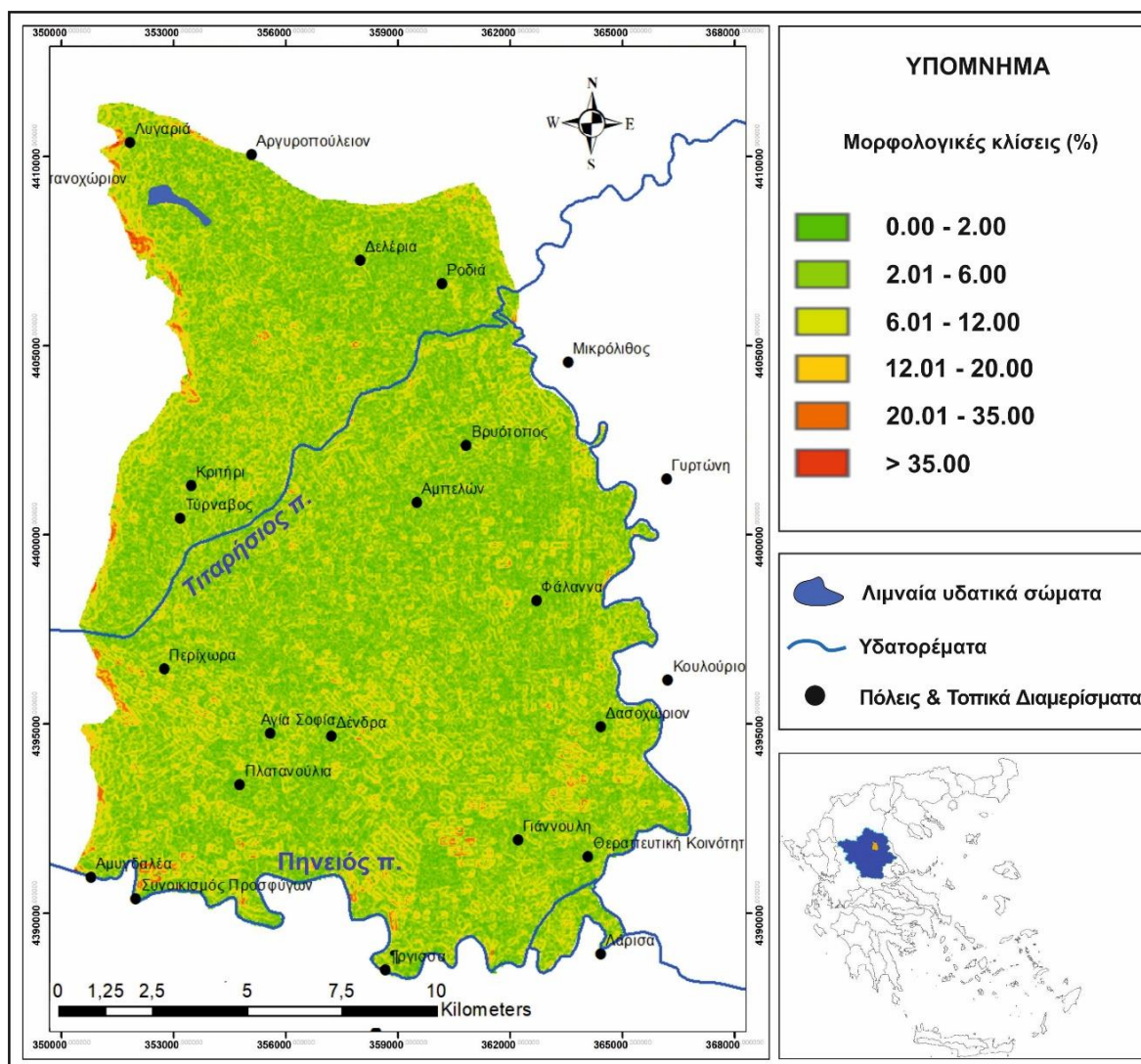


Εικόνα 3.2. Γεωμορφολογική απεικόνιση της υπολεκάνης Τυρνάβου ως τμήμα της Ανατολικής Θεσσαλικής πεδιάδας.

Η μικρότερη και η μεγαλύτερη μορφολογική κλίση που καταγράφηκε είναι 0 και 45.93%, αντίστοιχα ενώ η μέση κλίση της περιοχής είναι 5.3%. Το μεγαλύτερο ποσοστό (~68%) της επιφάνειας την περιοχής έρευνας χαρακτηρίζεται από μικρές μορφολογικές κλίσεις (0-6%), ενώ ουσιαστικά μορφολογικές κλίσεις μεγαλύτερες από 20% καλύπτουν μόλις το 0.63% της συνολικής επιφάνειας της υπολεκάνης (Πίνακας 3.1 και Διάγραμμα 3.1).



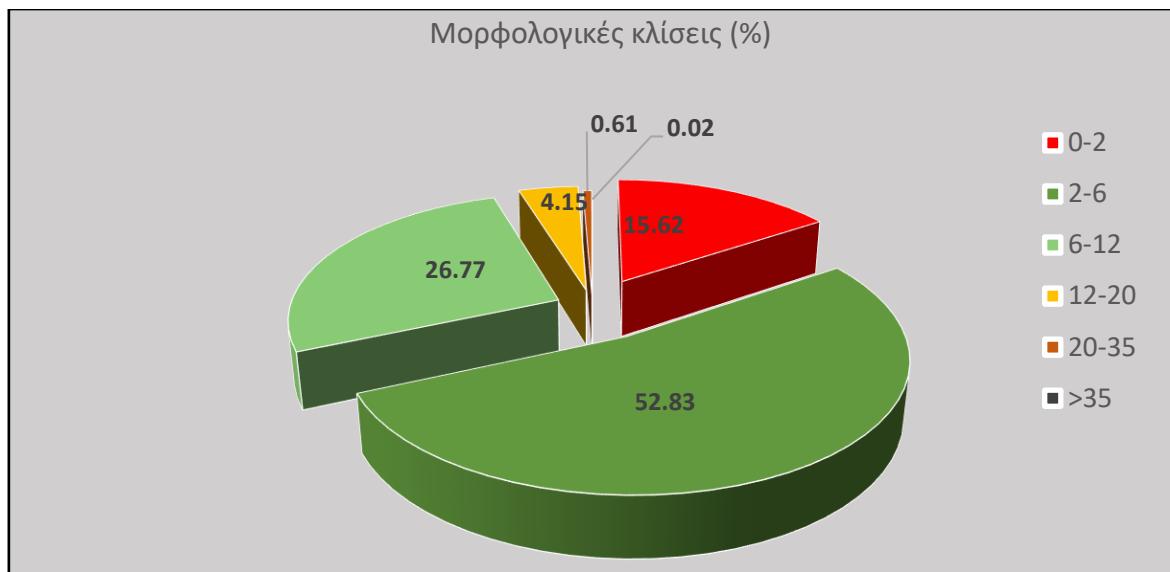
Εικόνα 3.3. Τρισδιάστατη απεικόνιση μορφολογικού αναγλύφου της περιοχής έρευνας (α) και της ευρύτερης περιοχής (β).



Εικόνα 3.4. Χάρτης μορφολογικών κλίσεων υπολεκάνης Τυρνάβου.

Πίνακας 3.1. Κατανομή της επιφάνειας της υπολεκάνης σε σχέση με τις μορφολογικές κλίσεις.

Κλίσεις (%)	Έκταση επιφάνειας (Km ²)	Ποσοστό (%)
0-2	39.21	15.62
2-6	132.60	52.83
6-12	67.19	26.77
12-20	10.42	4.15
20-35	1.53	0.61
>35	0.05	0.02
ΣΥΝΟΛΟ	251.00	100.00

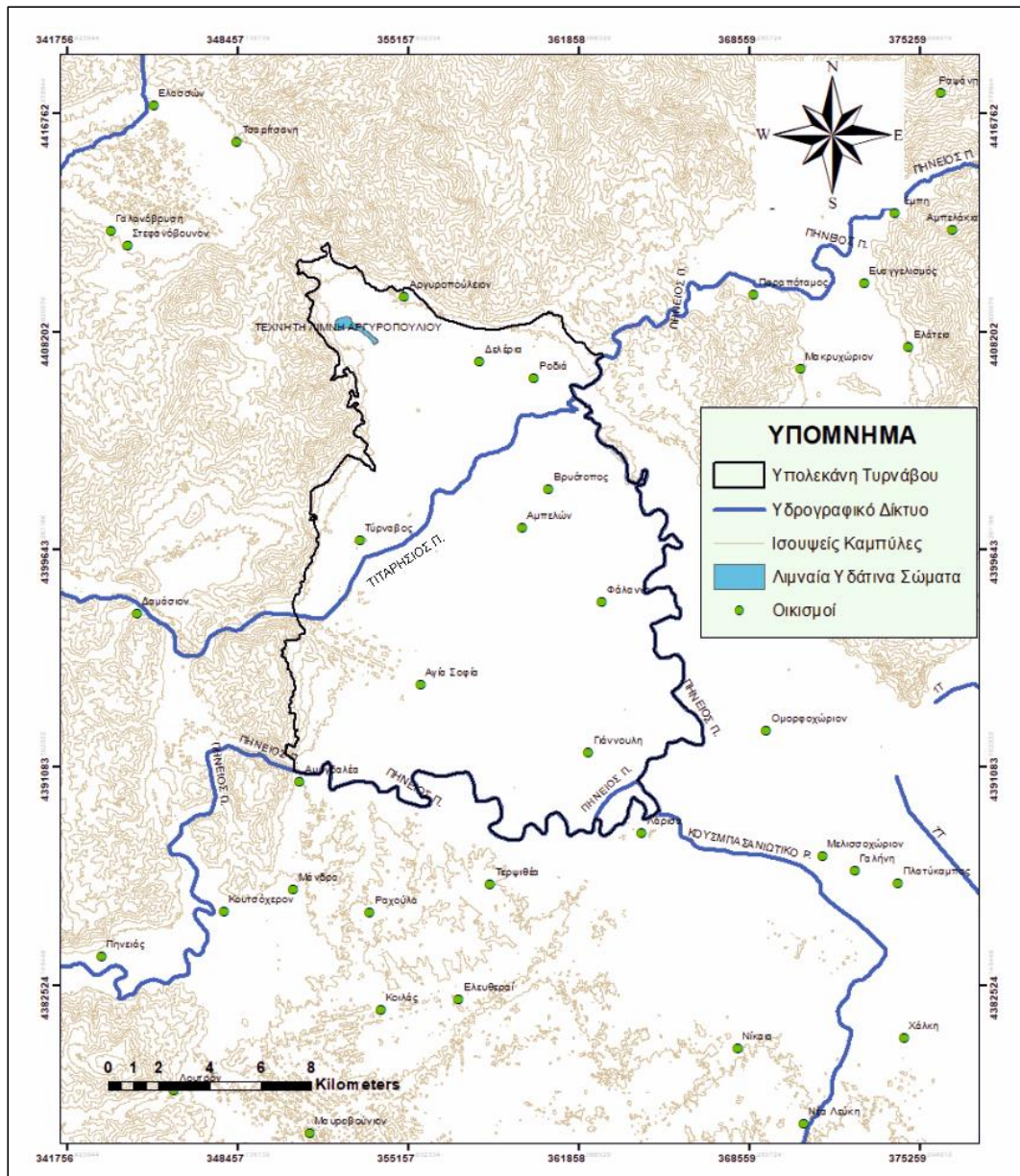


Διάγραμμα 3.1. Σχηματική απεικόνιση κατανομής των μορφολογικών κλίσεων (%).

3.3 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής έρευνας δεν μπορεί να καταταχθεί σε μία από τις τυπικές μορφές ταξινόμησης (Σωτηριάδης & Ψιλοβίκος 1984) διότι η υπολεκάνη Τυρνάβου δεν αποτελεί υδρολογική λεκάνη απορροής αλλά καθορίστηκε καθαρά με υδρογεωλογικά κριτήρια. Ως εκ τούτου το υδρογραφικό αποτελείται μόνο από τους δύο κύριους ποταμούς Πηνειό και Τιταρήσιο. Επίσης, στο ΝΑ/κό τμήμα της περιοχής έρευνας, το Κουσμπασανιώτικο ρέμα, πηγάζει 23 km περίπου νότια της Λάρισας, διαρρέει το κεντρικό τμήμα της ανατολικής θεσσαλικής πεδιάδας και τελικά συμβάλει στον Πηνειό ποταμό. Αποτελεί ουσιαστικά αρδευτική τάφρο και μετά τη διευθέτησή του καλύπτει μέρος των αρδευτικών αναγκών της γύρω περιοχής.

Το τμήμα του Τιταρήσιου που ανήκει στην υπολεκάνη Τυρνάβου, όπως προκύπτει και από τις χαμηλές μορφολογικές κλίσεις, αποτελεί το πεδινό του τμήμα (κάτω ρου) και δεν υπάρχουν άλλοι κλάδοι που να συμβάλουν σε αυτόν. Σε αυτό το τμήμα της υπολεκάνης έχει περιοδική ροή, συνήθως μετά από έντονα επεισόδια βροχόπτωσης, διασχίζει την υπολεκάνη Τυρνάβου με κατεύθυνση ΒΑ/κή και τελικά συμβάλει στον Πηνειό ποταμό στην περιοχή της Ροδιάς (Εικόνα 3.5). Όπως αναλύεται στη συνέχεια, ο ποταμός Τιταρήσιος παίζει καθοριστικό ρόλο στην τροφοδοσία του αλλουβιακού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου, καθώς, λόγω των αδρομερών υλικών του ομώνυμου κώνου κορημάτων κατά την είσοδό του στην υπολεκάνη, το νερό που απορρέει από το ορεινό του τμήμα διηθείται άμεσα προς το υδατικό σύστημα.



Εικόνα 3.5. Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής έρευνας.

Όπως στον Τιταρήσιο έτσι και για τον Πηνειό ποταμό, το τμήμα που ανήκει στην υπολεκάνη και ουσιαστικά την οριοθετεί, αποτελεί μέρος του κάτω ρου του και ο Τιταρήσιος είναι ο τελευταίος του παραπόταμος πριν την εκβολή του στη θάλασσα. Η διαφορά του με τον ποταμό Τιταρήσιο είναι ότι αυτός πριν εισέλθει στην υπολεκάνη Τυρνάβου, έχει ήδη διανύσει μεγάλο μέρος σε πεδινή περιοχή και ως εκ τούτου έχει ήδη αποθέσει τα αδρομερή υλικά του. Τα ιζήματά του αποτελούνται από λεπτόκοκκο υλικό, κυρίως λεπτή άμμο και άργιλο, με αποτέλεσμα η διήθηση του νερού προς τα αλλουβιακά ιζήματα να είναι περιορισμένη. Στα επόμενα κεφάλαια ωστόσο, θα εξεταστούν αναλυτικότερα οι σχέσεις υδραυλικής επικοινωνίας του ποταμού με το υπόγειο υδατικό σύστημα.

Η μη αναπτυγμένη μορφή υδρογραφικού δικτύου εντός της υπολεκάνης, λόγω του καθορισμού της περιοχής έρευνας με υδρογεωλογικά κριτήρια, καθιστά μη ορθή και την ποσοτική ανάλυσή του, καθώς όπως προαναφέρθηκε, εντός αυτής δεν υπάρχει πλήρης ανάπτυξη κλάδων που μπορούν να ταξινομηθούν κατά Strahler (1952, 1957). Ωστόσο, για λόγους πληρότητας της διατριβής και εξαιτίας της σημαντικότητας του ποταμού στην υδροδυναμική λειτουργία και εξέλιξη της περιοχής, παραθέτονται στη συνέχεια τα στοιχεία ποσοτικής ανάλυσης του υδρογραφικού δικτύου ολόκληρης της λεκάνης (Πίνακας 3.2), όπως έχουν προκύψει από παλαιότερες μελέτες (Αντωναρόπουλος κ.α. 2010). Τα στοιχεία αυτά άλλωστε, εξηγούν σε μεγάλο βαθμό τη σημαντικότητα του ποταμού τόσο στη διαμόρφωση της γεωλογικής δομής των παρυφών της λεκάνης (κώνος Τιταρήσιου), όσο και της υδρολογικής δίκαιτας, στοιχεία που αμφότερα συνεισφέρουν σημαντικά στη διαμόρφωση του υδατικού ισοζυγίου της υπολεκάνης Τυρνάβου.

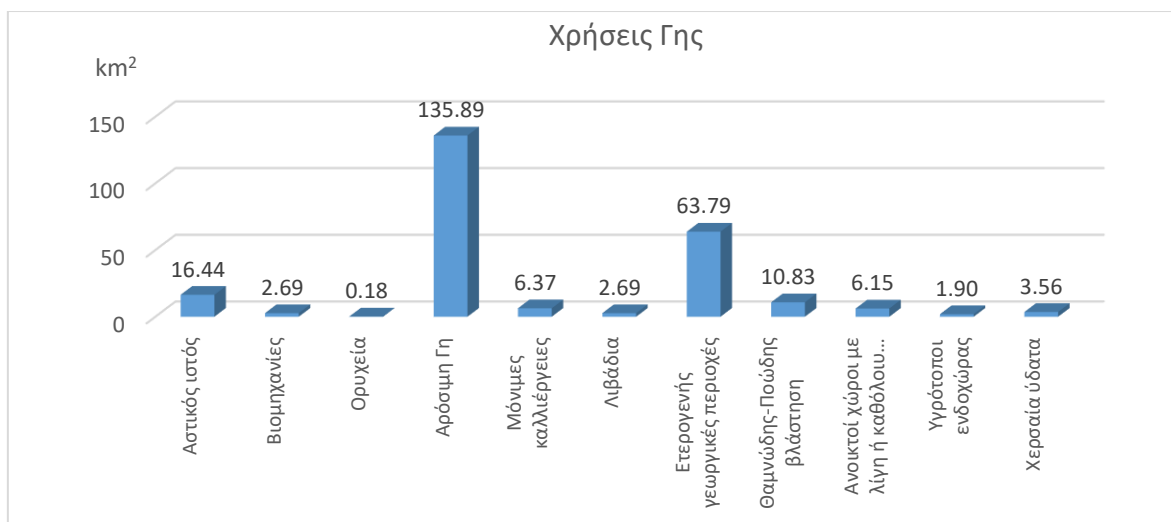
Πίνακας 3.2. Μορφομετρικές παράμετροι λεκάνης απορροής ποταμού Τιταρήσιου.

Ποταμός	Ελάχιστο υψόμετρο	Μέγιστο υψόμετρο	Μέσο υψόμετρο	Μέγιστο ανάγλυφο	Μέση κλίση λεκάνης	Μέση κλίση κεντρικής λεκάνης	Μήκος κεντρικής κοίτης	Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου	Μορφή υδρογραφικού δικτύου
Τιταρήσιος	60m	2,720m	1,126m	2,660m	25.8%	1.51%	92.47m	0.90 (km ²) ⁻¹	Δενδριτική

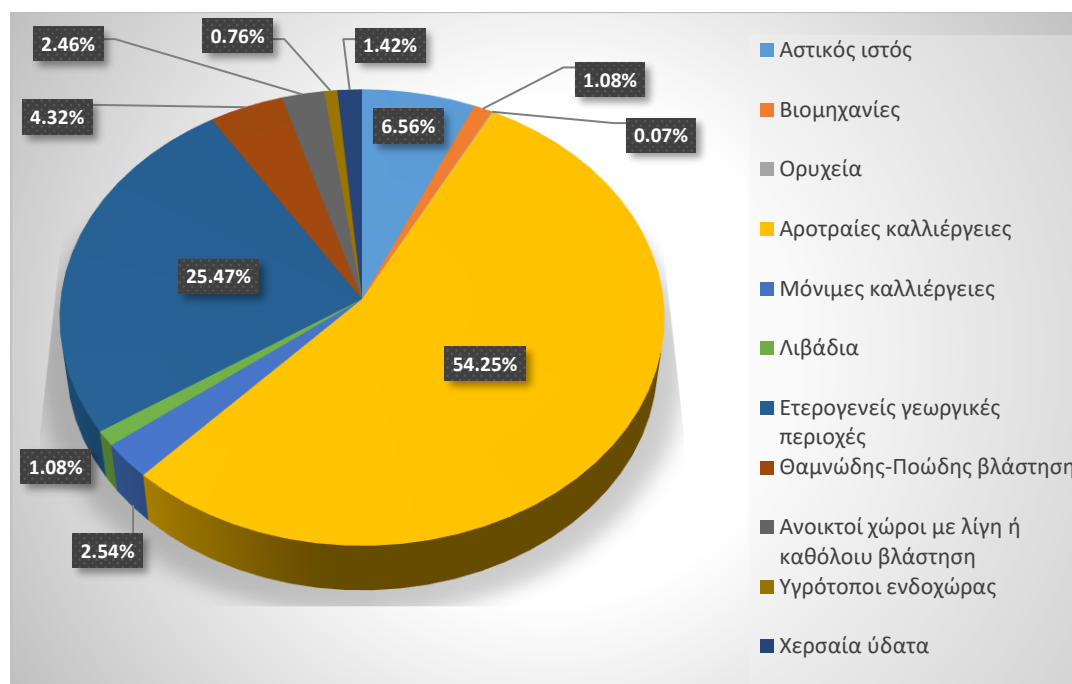
3.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

Η χρήση γης αποτελούν μια σημαντική παράμετρο, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, τόσο για την αξιολόγηση και ερμηνεία της ποιοτικής κατάστασης των υδατικών πόρων όσο και για την ποσοτική εκτίμηση αυτών. Αποτελούν απαραίτητο στοιχείο για την κατάρτιση υδατικού ισοζυγίου καθώς οι ποσότητες νερού, που καταναλώνονται, διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό, ανάλογα με το αν στην περιοχή υπάρχουν καλλιεργήσιμες εκτάσεις, λιβάδια, δασικές εκτάσεις, κ.α., καθορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την υδροδυναμική λειτουργία του υδατικού συστήματος.

Στη συνέχεια παρατίθεται γράφημα των εκτάσεων κατανομής των χρήσεων γης (Διάγραμμα 3.2) καθώς και ποσοστιαία κατανομή αυτών με τη μορφή διαγράμματος πίτας (Διάγραμμα 3.3), στο οποίο παρουσιάζονται οι διάφορες χρήσεις γης με διαφορετική χρωματική κλίμακα με βάση το δίκτυο CORINE Land Cover 2020.



Διάγραμμα 3.2. Επιφάνεια κάλυψης (km²) ανά χρήση γης για την περιοχή έρευνας με βάση το δίκτυο Corine Land Cover (2020).



Διάγραμμα 3.3. Ποσοστιαία κατανομή των χρήσεων γης για την περιοχή έρευνας με βάση το δίκτυο Corine Land Cover (2020).

Στην περιοχή έρευνας αναπτύσσονται 11 κατηγορίες χρήσεων γης σύμφωνα με την κατάταξη CORINE (2020) και όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 3.3, το μεγαλύτερο ποσοστό χρήσης γης καταλαμβάνεται από αροτραίες καλλιέργειες (54.25%), με αμέσως επόμενη χρήση αυτή των ετερογενών καλλιεργειών (25.47%). Οι υπόλοιπες χρήσεις γης καταλαμβάνουν πολύ μικρότερα ποσοστά, σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, δηλαδή: αστικός ιστός (6.56%), θαμνώδης βλάστηση (4.32%), μόνιμες καλλιέργειες (2.54%), ανοικτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση (2.46%), χερσαία ύδατα (1.42%),

λιβάδια (1.08%), βιομηχανίες (1.08%), από (1.08%), υγρότοποι (0.76%) και ορυχεία (0.07%).

Τα ποσοστά αυτά των χρήσεων γης καταδεικνύουν την κυρίαρχη δραστηριότητα της περιοχής έρευνας, που δεν είναι άλλη από τη γεωργία, και ως εκ τούτου εξηγούν την εύλογη κατά συντριπτικό ποσοστό (~90%, σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (EL 08) 2014) χρήση των υδατικών πόρων για την άρδευση των καλλιεργειών, γεγονός το οποίο βέβαια επίσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής, με γνώμονα την ισόρροπη προστασία του συστήματος Νερό-Τροφή-Οικοσύστημα-Ενέργεια, ειδικά υπό το πρίσμα των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Στη συνέχεια αναλύονται οι κατηγορίες των χρήσεων γης, που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα διαγράμματα, ώστε να γίνουν κατανοητές και να υπάρχει ένας σαφής ορισμός των περιοχών που αυτές αντιπροσωπεύουν:

ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

1. Αροτραίες εκτάσεις: εκτάσεις που καλύπτονται από καλλιέργειες οι οποίες υπόκεινται στο σύστημα της αμειψισποράς, συμπεριλαμβανομένων των αγραναπαύσεων. Περιλαμβάνονται εκτάσεις που καλλιεργούνται για την παραγωγή σιτηρών, οσπρίων, βιομηχανικών φυτών, βολβών και κονδύλων (πατάτες, τεύτλα, ζαχαρότευτλα κ.α.), λαχανικών, θερμοκηπιακών προϊόντων, ετήσιων και πολυετών (1-5 έτη) κτηνοτροφικών φυτών ξηράς ζωοτροφής που συγκομίζονται ή/και καταναλώνονται χλωρά. Συμπεριλαμβάνονται επίσης τα φυτώρια δένδρων, διακοσμητικών φυτών, ανθέων, καθώς και σπορόφυτα.

2. Μόνιμες καλλιέργειες: καλλιέργειες που δεν υπόκεινται σε καθεστώς αμειψισποράς, το οποίο δίνει τη δυνατότητα για πολλαπλές συγκομιδές και καταλαμβάνουν τη γη για μεγάλο χρονικό διάστημα, πριν αυτή οργωθεί και ξαναφυτευτεί. Περιλαμβάνονται δασικές καλλιέργειες, οπωροφόρα δένδρα (περιλαμβανομένων και των εσπεριδοειδών), ελαιώνες, δέντρα με καρπούς με κέλυφος, αμπέλια. Η κατηγορία αυτή δεν περιλαμβάνει λιβάδια, βοσκότοπους και δάση.

3. Βοσκότοποι και λιβάδια: πρόκειται για εκτάσεις οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στον κύκλο της αμειψισποράς και χρησιμοποιούνται (πάνω από πέντε έτη) για τη μόνιμη παραγωγή χλωρών κτηνοτροφικών φυτών, είτε σπαρμένων είτε αυτοφυών, ασχέτως αν χρησιμοποιούνται για βοσκή ή συγκομιδή για χορτονομή. Στις εκτάσεις αυτές περιλαμβάνονται και οι άγονοι (φυσικοί) βοσκότοποι.

4. Ετερογενείς γεωργικές καλλιέργειες: ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες, σύνθετα συστήματα καλλιέργειας, γεωργικές περιοχές με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης και γεωργοδασικές περιοχές. Περιλαμβάνουν:

- Μη μόνιμες καλλιέργειες (αροτραία εδάφη ή λιβάδια) που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες στο ίδιο αγροτεμάχιο.
- Σύνθεση από μικρά αγροτεμάχια με διάφορες ετήσιες καλλιέργειες, λιβάδια ή/και

μόνιμες καλλιέργειες.

- Περιοχές, κυρίως γεωργικές, που διακόπτονται από φυσική ή δασική βλάστηση.

ΔΑΣΗ & ΗΜΙΦΥΣΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

5. Συνδυασμοί θαμνώδους και/ή ποώδους βλάστησης: θάμνοι και χερσότοποι, δηλαδή εκτάσεις με θαμνώδη και άλλη χαμηλή βλάστηση, όπου κυριαρχείται από θάμνους, χαμόδεντρα και ποώδη φυτά (χερσότοποι, ράχοι, ρείκια, αμμόχορτα, λαμπούρνο κ.α.).

6. Εκτάσεις με αραιή ή καθόλου βλάστηση: εκτάσεις με λίγη θαμνώδη ή/και ποώδη βλάστηση. Συμπεριλαμβάνονται και οι εκτάσεις που έχουν πληγεί από πυρκαγιές και οι οποίες παραμένουν αποτεφρωμένες. Παραλίες, παράκτιες και ηπειρωτικές ζώνες με άμμο ή βότσαλα (κροκάλες), απογυμνωμένοι βράχοι ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΚΑΛΥΠΤΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΝΕΡΑ

7. Χερσαία ύδατα: φυσικές ή τεχνητές ροές υδάτων, οι οποίες χρησιμεύουν ως αγωγοί απορροής των υδάτων, συμπεριλαμβανομένων και των καναλιών. Φυσικές ή τεχνητές ζώνες ύδατος, όπως ποτάμια, λίμνες, δεξαμενές. Στη κατηγορία αυτή κατά συνθήκη, οι όχθες θεωρούνται ως όρια χερσαίων υδάτων, ακόμα και αν δεν υπάρχει νερό κατά την αποτύπωση.

8. Εσωτερικοί υγρότοποι: μη δασώδεις περιοχές που είναι πλημμυρισμένες- διαποτισμένες με νερό, είτε προσωρινά είτε μόνιμα. Το νερό μπορεί να παρουσιάζει ροή ή να είναι στάσιμο. Συμπεριλαμβάνονται οι βάλτοι της ενδοχώρας, περιοχές με παχύ στρώμα στάσιμου νερού με τυπική βλάστηση (καλάμια, βούρλα κ.α.).

ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

9. Αστικός ιστός: πρόκειται για επιφάνειες δομημένες οι οποίες αποτελούνται, κατά κύριο λόγο, από κτίρια. Τα κτίρια, οι οδικές αρτηρίες και οι άλλες τεχνητά καλυπτόμενες επιφάνειες καλύπτουν εξ ολοκλήρου σχεδόν το έδαφος (συνεχόμενη αστική οικοδόμηση) ή συνυπάρχουν με άλλες περιοχές με βλάστηση και ακάλυπτα εδάφη που καλύπτουν ασυνεχείς, αλλά σημαντικές εκτάσεις (διακεκομμένη αστική οικοδόμηση).

10. Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες: τεχνητά καλυπτόμενες επιφάνειες, απουσία βλάστησης, βιομηχανικές, εμπορικές, κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις. Συμπεριλαμβάνονται σχολεία, δημόσιες υπηρεσίες, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα κ.α.

11. Ορυχεία, χώροι απόρριψης απορριμμάτων και εργοτάξια: χώροι εξόρυξης ορυκτού πλούτου. Χώροι υγειονομικής ταφής αστικών ή βιομηχανικών απορριμμάτων, ή χώροι αποθέσεων ορυχείων. Επίσης, χώροι υπό οικοδομική ανάπτυξη, εκσκαφές του εδάφους και χωματουργικά έργα ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

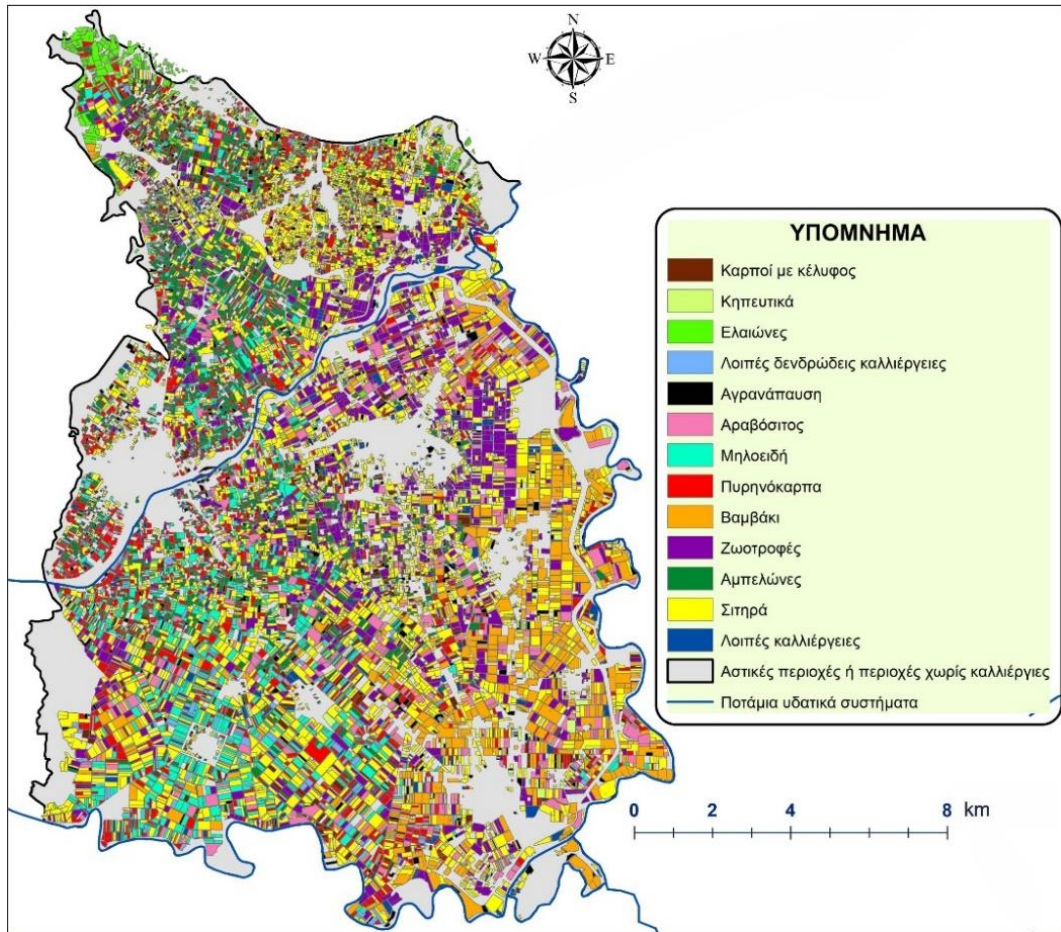
Καθώς η γεωργική δραστηριότητα κυριαρχεί στην περιοχή, συμβάλλοντας κατά το πλείστον στην οικονομική ανάπτυξή της, αναλύονται στη συνέχεια οι καλλιέργειες που επικρατούν στην υπολεκάνη Τυρνάβου. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται η επιφάνεια

κάλυψης των καλλιεργειών και το αντίστοιχο ποσοστό τους, με βάση τα στοιχεία από του Οργανισμού Πληρωμών και Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε.) για το έτος 2015 και στην Εικόνα 3.6 χάρτης με τη βοήθεια Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών, στον οποίο παρουσιάζεται η χωρική τους κατανομή με διαφορετική χρωματική κλίμακα.

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε., κυρίαρχη καλλιέργεια είναι τα σιτηρά καλύπτοντας περίπου το 1/3 (31.01 %) των καλλιεργειών, ακολουθούν με κοντινά ποσοστά οι ζωτροφές (μηδική), τα πυρηνόκαρπα (κεράσια, ροδάκινα/νεκταρίνια, βερίκοκα), το βαμβάκι (γύρω στο 10% το καθένα) και τα μηλοειδή (μήλα, αχλάδια, κυδώνια, μούσμουλα), οι αμπελώνες και το καλαμπόκι σε μικρότερα ποσοστά.

Πίνακας 3.3. Επιφάνεια κάλυψης καλλιεργειών της υπολεκάνης Τυρνάβου (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. 2015).

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ (2015)	Περιοχή (km ²)	Ποσοστό (%)
ΣΙΤΗΡΑ	51.26	31.01
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	21.33	12.90
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	17.71	10.71
ΒΑΜΒΑΚΙ	16.68	10.09
ΜΗΛΟΕΙΔΗ	12.87	7.79
ΛΟΙΠΟΙ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΙΝΟΥ	12.85	7.78
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ ΠΟΤΙΣΤΙΚΟΣ	10.53	6.37
ΚΑΡΠΟΙ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ	5.82	3.52
ΑΓΡΑΝΑΠΑΥΣΗ	4.06	2.45
ΕΛΑΙΩΝΕΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΕΛΑΙΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ	3.14	1.90
ΚΗΠΕΥΤΙΚΑ	2.34	1.42
ΛΟΙΠΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ – ΔΕΝΔΡΩΔΕΙΣ	3.26	1.97
ΑΛΛΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	3.16	2.08
ΣΥΝΟΛΟ	165	100



Εικόνα 3.6. Χωρική κατανομή των καλλιεργειών της περιοχής έρευνας (ΟΠΕΚΕΠΕ 2015).

Από τα στοιχεία του Επιχειρησιακού Σχεδίου Καλάθι Θεσσαλικών Προϊόντων (Περιφέρεια Θεσσαλίας 2011) προκύπτει ότι, η διαχρονική πορεία των καλλιεργειών παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες είναι άμεσα εξαρτώμενες από την εξελικτική πορεία της διαθέσιμης ποσότητας των υδατικών πόρων. Ενδεικτικά, η καλλιέργεια των σκληρών σιτηρών (καλλιεργούνται τόσο σε ξηρικές όσο και αρδευόμενες εκτάσεις), από το 1978 έως το 2010, παρουσιάζει αυξητικές τάσεις ενώ αντίθετα η καλλιέργεια των λοιπών σιτηρών (κριθάρι, μαλακό σιτάρι, βρώμη κ.α., ξηρικές εκτάσεις ως επί το πλείστον) παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Για την ίδια περίοδο αναφοράς, οι καλλιέργειες του αραβόσιτου και της ελιάς παρουσιάζουν αυξητική τάση ενώ όσον αφορά τους αμπελώνες παρατηρείται μείωση των εκτάσεων της καλλιέργειας κατά 30%.

Γενικότερα, από τη δεκαετία του '70 και έπειτα υπήρξε μια προοδευτική μετάβαση σε αρδευόμενες καλλιέργειες, σε μεγάλη έκταση ενώ μετέπειτα ακολούθησε μια μεταστροφή προς τα οπωροφόρα δέντρα. Μετά την έναρξη των εντατικών αντλήσεων, στα μέσα της δεκαετίας του '80, άρχισαν σταδιακά να μειώνονται τα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να παρουσιάζεται αντίστοιχη μείωση των αρδευόμενων καλλιεργειών και μια προοδευτική αύξηση των ξηρικών.

Στον Πίνακα 3.4 αναφέρονται αναλυτικά οι επικρατούσες καλλιέργειες ανά Τ.Ο.Ε.Β. της περιοχής έρευνας, με βάση πάντα τα στοιχεία του 2015. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά, τα σιτηρά επικρατούν και στους τρεις Τ.Ο.Ε.Β. με τα πυρηνόκαρπα να ακολουθούν για τον Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου, τα μηλοειδή για τον Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας και το τριφύλλι (ζωοτροφές) για τον Τ.Ο.Ε.Β. Αμπελώνα. Από την τελευταία στήλη του πίνακα (3.4) προκύπτει ότι για τον Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου, το 57.96% της συνολικής έκτασης που καταλαμβάνει ο Τ.Ο.Ε.Β. αποτελείται από καλλιεργούμενες εκτάσεις, ενώ το υπόλοιπο 42.04% από αστικές και μη καλλιεργούμενες εκτάσεις. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τον Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας είναι 80.20% και 19.80%, ενώ για τον Τ.Ο.Ε.Β. Αμπελώνα 67.88% και 32.12%.

Η έναρξη της αρδευτικής περιόδου είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ποσοστό εδαφικής υγρασίας, που εξαρτάται τόσο από τις κρατούσες κλιματικές συνθήκες στην περιοχή κατά την εαρινή περίοδο όσο και από το ύψος βροχόπτωσης στα τέλη του χειμώνα και στην αρχή της άνοιξης. Για ορισμένα είδη καλλιεργειών όπως τα κηπευτικά, η έναρξη της αρδευτικής περιόδου γίνεται νωρίς τον Απρίλιο. Το τέλος της αρδευτικής περιόδου συμπίπτει περίπου με το τέλος του καλοκαιριού, αν και για καλλιέργειες με μεγάλο σε διάρκεια βλαστητικό κύκλο (π.χ. μηδική), μπορεί η άρδευση να συνεχιστεί μέχρι τα τέλη Σεπτεμβρίου.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτής της παραγράφου, οι χρήσεις γης αποτελούν ένα απαραίτητο στοιχείο τόσο για την ποιοτική όσο και την ποσοτική αξιολόγηση των υδατικών πόρων, αλλά και για την κατανόηση της καταγραφόμενης κατάστασης και την ερμηνεία της. Οι χρήσεις γης, βασιζόμενες σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ενδέχεται να προκαλούν περιβαλλοντικές επιπτώσεις και επομένως λειτουργούν ως αίτια πιέσεων.

Πίνακας 3.4. Επιφάνεια κάλυψης καλλιεργειών της υπολεκάνης Τυρνάβου (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. 2015).

ΤΟΕΒ ΤΥΡΝΑΒΟΥ			
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΕΚΤΑΣΗ (km ²)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ (%)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΟΕΒ (%)
ΣΙΤΑΡΙ	6.73	24.00	13.91
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	5.97	21.28	12.33
ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ	5.80	20.67	11.98
ΜΗΛΟΕΙΔΗ	3.30	11.77	6.82
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	2.58	9.20	5.33
ΛΟΙΠΑ	3.67	13.08	7.58
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	28.05	100	57.96
ΤΟΕΒ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑ			
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΕΚΤΑΣΗ (km ²)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ (%)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΟΕΒ (%)
ΣΙΤΑΡΙ	11.46	33.46	26.83
ΜΗΛΟΕΙΔΗ	7.15	20.87	16.73
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	4.66	13.60	10.90
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	2.41	7.03	5.64

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΕΚΤΑΣΗ (km ²)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ (%)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΟΕΒ (%)
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ	2.25	6.58	5.27
ΛΟΙΠΑ	6.33	18.47	14.81
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	34.25	100.00	80.20
ΤΟΕΒ ΑΜΠΕΛΩΝΑ			
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΕΚΤΑΣΗ (km ²)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ (%)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΟΕΒ (%)
ΣΙΤΑΡΙ	23.20	32.29	21.92
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	13.11	18.24	12.38
ΒΑΜΒΑΚΙ	12.65	17.60	11.95
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ	6.32	8.80	5.97
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	4.12	5.73	3.89
ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ	3.52	4.89	3.32
ΛΟΙΠΑ	8.93	12.43	8.44
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	71.84	100.00	67.88

Οι πιέσεις αυτές έχουν ως αποδέκτη τόσο το επιφανειακό όσο και στο υπόγειο υδατικό σύστημα, αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω για την περιοχή έρευνας και αναλύονται διεξοδικά στο 12^ο Κεφάλαιο. Για την υπολεκάνη Τυρνάβου οι βασικές ανθρωπογενείς δραστηριότητες, που προκαλούν πιέσεις στο επιφανειακό και υπόγειο υδατικό σύστημα είναι οι εξής:

- Αστικά λύματα.
- Αγροτική δραστηριότητα.
- Βιομηχανικά απόβλητα.
- Εξορυκτικές δραστηριότητες.
- Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).
- Κτηνοτροφικές μονάδες.
- Τεχνικά έργα.
- Απολήψεις ύδατος.
- Αμμοληψίες.
- Κλιματική αλλαγή.

4 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

4.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας αποτέλεσε αντικείμενο συστηματικής μελέτης, από Έλληνες και ξένους ερευνητές, κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών (Aubouin 1959, Caputo 1990, Demitrack 1987, Λέκκας 1988 κ.α).

Με βάση τον διαχωρισμό των Ελληνίδων οροσειρών σε γεωτεκτονικές ζώνες (Aubouin 1965, Μουντράκης 1985, Παπανικολάου 1986), η περιοχή της Θεσσαλίας δομείται από στρωματογραφικές και γεωτεκτονικές ενότητες, οι οποίες ανήκουν τόσο στις εξωτερικές όσο και στις εσωτερικές γεωτεκτονικές ζώνες (Εικόνα 4.1). Η περιοχή έρευνας, σύμφωνα με τον διαχωρισμό αυτό, ανήκει στην Πελαγονική ζώνη στην οποία δόθηκε η έννοια του υβώματος, το οποίο διαχώριζε την αύλακα της Αλμωπίας από τα ανατολικά από την αύλακα της Πίνδου στα δυτικά (Μουντράκης 1985). Ο όρος «Πελαγονική ζώνη» επικράτησε από τους Brunh (1956) και Aubouin (1957) στο πλαίσιο διαχωρισμού της Ελλάδας σε αλπικές ισοπικές ζώνες. Η Πελαγονική ζώνη δομείται κατά κύριο λόγο από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, τους γνευσιωμένους γρανίτες, τα ημι-μεταμορφωμένα Περμο-Τριαδικά πετρώματα, τα δύο καλύμματα ανθρακικών σχηματισμών του Τριαδικού-Ιουρασικού, τους οφιόλιθους και τα επικλυσιογενή ιζήματα του Άνω-Κρητιδικού.

Η ζώνη έχει γενική διεύθυνση ΒΒΔ - ΝΝΑ και εκτείνεται από την πρώην Γιουγκοσλαβία προς τους ορεινούς όγκους του Βόρα, του Βέρνου, του Βερμίου, των Πιέρων, του Ολύμπου, του Πηλίου και της Β. Εύβοιας, ενώ στη συνέχεια κάμπτεται προς το νησιωτικό σύμπλεγμα των Σποράδων, φθάνοντας μέχρι τη Σκύρο και με πιθανή προέκτασή της προς το Αιγαίο και τη Βόρεια Μικρά Ασία (Εικόνα 4.1). Έχει μήκος κοντά στα 250Κm και κυμαινόμενο πλάτος από 50 έως 100Κm.

Στη συνέχεια αναφέρονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί των ζωνών της ευρύτερης περιοχής ξεκινώντας από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Αναφέρονται ζώνες και ενότητες που μπορεί να μην απαντώνται στην στενή περιοχή έρευνας, ωστόσο για λόγους πληρότητας και σύνδεσης της περιοχής έρευνας με τον ευρύτερο γεωλογικό χώρο κρίνεται σκόπιμη η σύντομη αυτή παράθεση.

4.1.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ

ΖΩΝΗ ΠΙΝΔΟΥ

Η Πίνδος ανήκει στις εξωτερικές ζώνες, δεδομένου ότι η στρωματογραφική της στήλη είναι συνεχής αλλά η ύπαρξη κλαστικού σχηματισμού, χαρακτηριστικού ορογένεσης που συνέβη στον εσωτερικό χώρο του ελληνικού τόξου, δείχνει ότι η Πίνδος ήταν κοντά στις εσωτερικές ζώνες την εποχή της πρώιμης αλπικής ορογένεσης (Παπανικολάου 1986).

Οι σχηματισμοί της ζώνης παρουσιάζουν την ακόλουθη στρωματογραφική διάρθρωση, ξεκινώντας από τους παλαιότερους προς τους νεότερους:

-Ραδιολαρίτες: χαρακτηριστικός ορίζοντας της ζώνης αυτής με πάχος που φθάνει τα 350m. Συχνά παρεμβάλλονται ενστρώσεις πηλιτών και ασβεστόλιθων και η ηλικία του είναι Ανω-Ιουρασική – Κάτω-Τριαδική.

-Πρώτος φλύσχη: αποτελείται από στρώματα ψαμμιτών, τα κλαστικά υλικά των οποίων έχουν προέλθει από τον χώρο των εσωτερικών ζωνών. Η απόθεση τους ξεκίνησε στο Κενομάνιο και συνεχίστηκε μέχρι το Κονιάσιο.

-Άνω-Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι: χαρακτηριστικοί πελαγικής φάσης, μέσης στρωμάτωσης με ενστρώσεις και κονδύλους πυριτολίθων. Το πάχος τους κυμαίνεται από 200 έως 400m.

-Στρώματα μετάβασης προς το δεύτερο φλύσχη: εναλλαγές ασβεστολιθικών και μαργαϊκών στρωμάτων με κυμαινόμενο πάχος από λίγα έως και 200 m και ηλικίας ανώτερου Μαιστρίχιου έως Παλαιόκαινο.

-Δεύτερος φλύσχη: απαντώνται στρώσεις ψαμμιτοπηλιτών με κροκαλοπαγή. Το πάχος κυμαίνεται από 1,000 έως 1,500 m και η ηλικία του είναι Παλαιόκαινο έως ανώτερο Ηώκαινο.

Υπερπινδική υποζώνη

Η ανατολική παρυφή της ζώνης της Πίνδου αντιπροσωπεύεται από την Υπερπινδική υποζώνη, η οποία δομείται από μεταβατικά ιζήματα μεταξύ της ζώνης Πίνδου και της Υποπελαγονικής. Συγκροτείται από δύο ενότητες πετρωμάτων, του βουνού Κόζιακας και των Θυμιανών (Μουντράκης 1985).

Η ενότητα Κόζιακα αποτελείται από τους παρακάτω σχηματισμούς:

-Πελαγικοί ασβεστόλιθοι με πυριτιόλιθους ανώτερου Τριαδικού.

-Ασβεστόλιθοι ωολιθικοί με ραδιολαρίτες του Ιουρασικού.

-Ασβεστόλιθοι λατυποπαγείς με στοιχεία οφιολίθων και ραδιολαριτών του κατώτερου Κρητιδικού.

Στη ενότητα Θυμιάματος συμμετέχουν οι παρακάτω σχηματισμοί:

-Φλύσχη πάχους περίπου 350m, αποτελούμενος από πηλίτες και παρεμβολές ασβεστόλιθων, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών ηλικίας από Τιθώνιο μέχρι Άλβιο.

-Πελαγικοί ασβεστόλιθοι με παρεμβολές ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών (ασβεστόλιθοι Θυμιάματος), που φέρουν πανίδα του Μαιστρίχιου.

-Ένα σύνολο ασβεστόλιθων και ερυθρών πηλιτών ηλικίας Παλαιοκαίνου – κατώτερου Ηωκαίνου.

-Ιζήματα φλύσχη από χονδρόκοκκους ψαμμίτες.

4.1.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ

ΜΑΛΙΑΚΗ ΖΩΝΗ

Περιλαμβάνει Τριαδικούς και Ιουρασικούς σχηματισμούς βαθιάς θάλασσας, η οποία βρισκόταν στο δυτικό περιθώριο του πελαγονικού υβώματος, ενώ το προαλπικό της υπόβαθρο αποτελείται από σχηματισμούς του ανώτερου Πέρμιου. Σαν γενική στρωματογραφική στήλη μοιάζει με την αντίστοιχη της Πίνδου και πιο συγκεκριμένα με το κατώτερο τμήμα της στήλης της Πίνδου (Άνω Τριαδικό - Ιουρασικό). Οι διαφορές της από την Πίνδο είναι ότι έχει λιγότερους ασβεστόλιθους και πολύ περισσότερα βασικά ηφαιστειακά λόγω της έντονης υποθαλάσσιας ηφαιστειότητας (Παπανικολάου, 1986). Αποτελείται από τους εξής σχηματισμούς:

- Υπερβασικά πετρώματα (σερπεντινίτες, περιδοτίτες, δουνίτες).
- Ασβεστόλιθους με πυριτόλιθους και δολομίτες.
- Σειρά ηφαιστειοϊζηματογενών αργιλικών – μαργαϊκών ασβεστόλιθων.
- Διαβάσες, δολερίτες και βασαλτικές λάβες.
- Εναλλαγές ψαμμιττών και πηλιτών με παρεμβολές μαύρων ασβεστόλιθων με μικροπανίδα του ανωτέρου Περμίου.

ΗΩΕΛΛΗΝΙΚΟ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ

Σύμπλεγμα μεταμορφωμένων οφιολιθικών πετρωμάτων και μεταϊζημάτων, επωθημένο μεταξύ τέλους Άνω-Ιουρασικού και τις αρχές του Κάτω-Κρητιδικού, πάνω σε μια έντονα διαβρωμένη κατά θέσεις περιοχή της προ-άνω-Κρητιδικής Πελαγονικής σειράς (Κατσικάτσος κα 1978).

ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ

Υπάρχει διαχωρισμός (i) της Πελαγονικής ζώνης των μη μεταμορφωμένων σχηματισμών, η οποία κατανέμεται γεωγραφικά στο δυτικό περιθώριο του Πελαγονικού υβώματος και συμπίπτει με την Υποπελαγονική ζώνη κατά Aubouin (1959) και (ii) της Πελαγονικής ζώνης των μεταμορφωμένων σχηματισμών, η οποία κατανέμεται στην ανατολική και βόρεια Θεσσαλία και η οποία συμπίπτει με την Πελαγονική ζώνη κατά Aubouin (1959).

Η Πελαγονική ζώνη στην πρώτη περίπτωση για την περιοχή της Θεσσαλίας, αποτελείται από:

- Νεο-Παλαιοζωϊκούς ημιμεταμορφωμένους, κυρίως κλαστικούς, σχηματισμούς
- Κλαστικούς σχηματισμούς, εκρηξιγενή πετρώματα και ασβεστόλιθους του Κάτω-Μέσου-Τριαδικού.

-Μη μεταμορφωμένους σχηματισμούς του Μέσο-Άνω-Τριαδικού - ανώτερου Ιουρασικού (ασβεστόλιθους και δολομίτες).

-Οφιολιθικές μάζες πετρωμάτων που επωθούνται πάνω στους προηγούμενους σχηματισμούς που συνοδεύονται από ιζήματα βαθιάς θάλασσας. Συμπεριλαμβάνονται και οι σχηματισμοί της Μαλλιακής ζώνης και του Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος γενικότερα (Κατσικάτσος 1992).

Στη δεύτερη περίπτωση των μεταμορφωμένων σχηματισμών, η Πελαγονική ζώνη επωθείται πάνω σε σχηματισμούς της ενότητας Αμπελακίων, με την ηλικία της επώθησης να θεωρείται μετά Άνω-Κρητιδική – Προ-ανω-Ηωκαινική. Αποτελείται από κάτω προς τα πάνω από:

-Παλαιοζωικό κρυσταλλικό υπόβαθρο (σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, σχιστογνεύσιοι).

-Νέο-Παλαιοζωικούς – Κάτω-Μεσοτριαδικούς σχηματισμούς (σχιστόλιθοι, σχιστογνεύσιοι, μάρμαρα).

-Μέσο-ανω-Τριαδικά – Άνω-Ιουρασικά μάρμαρα.

-Άνω-Ιουρασικούς γνευσιοσχιστόλιθους – σχιστόλιθους.

-Άνω-Κρητιδικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους έως μάρμαρα και φλύσχη.

Ενότητα Αμπελακίων

Οι συγκεκριμένοι σχηματισμοί επωθούνται πάνω σε σχηματισμούς της ενότητας Ολύμπου – Όσσας (μετά το Μέσο Ηώκαινο) και είναι τεκτονικά υποκείμενοι λόγω επώθησης σχηματισμών της Πελαγονικής ζώνης. Κυριαρχούν οι γνευσιοσχιστόλιθοι και οι πρασινίτες, ενώ κατά θέσεις εμφανίζονται και ενστρώσεις μαρμάρων (αδροκρυσταλλικά).

Ενότητα Ολύμπου – Όσσας

Η ενότητα αυτή υπόκειται τόσο της Ενότητας Αμπελακίων όσο και της Πελαγονικής ζώνης, αποτελώντας τεκτονικό παράθυρο. Αποτελείται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες, οι οποίοι προς τα πάνω παρουσιάζουν κανονική μετάβαση προς μεταμορφωμένα ιζήματα φλύσχη.

Ενότητα Κρανιάς - Ελασσόνας

Η ενότητα αυτή υπόκειται της Πελαγονικής ζώνης, αποτελώντας τεκτονικό παράθυρο. Δομείται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες με συνολικό πάχος κοντά στα 2,000m.

4.1.3 ΜΕΤΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

ΜΕΣΟΕΛΛΗΝΙΚΗ ΜΟΛΑΣΣΙΚΗ ΑΥΛΑΚΑ

Το συνολικό πάχος των μολασσικών ιζημάτων της μεσοελληνικής αύλακας ξεπερνά τα 5,000 m. Η ηλικία των ιζημάτων είναι Άνω-Ηώκαινική έως Μέσο-Μειοκαινική. Η ιζηματογένεση των υλικών αυτών γινόταν κοντά στο επίπεδο της θάλασσας και αυτό, σε συνδυασμό με τη συνεχή βύθιση του πυθμένα της Μεσοελληνικής αύλακας, είχε σαν αποτέλεσμα την απόθεση εναλλασσόμενων θαλάσσιων, λιμναίων και ποταμοχειμάρων ιζημάτων.

Τα μολασσικά αυτά ιζήματα αποτελούν το υπόβαθρο των Πλειο-Πλειστοκαινικών και νεώτερων Τεταρτογενών σχηματισμών και διακρίνονται, από τους παλαιότερους προς τους νεότερους, στους παρακάτω σχηματισμούς:

-Σχηματισμός Κρανιάς : Κροκαλοπαγή, κροκαλολατυποπαγή, ψαμμούχες μάργες, Άνω Ηώκαινου.

-Σειρά Ριζώματος : Ιλιούχες μάργες Άνω Ηώκαινου.

-Σειρά Επταχωρίου : Κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και ψαμμούχες μάργες, ηλικίας Μέσο – Άνω Ολιγόκαινου.

-Σειρά Πενταλόφου – Μετεώρων : Κατώτερος ορίζοντας κροκαλοπαγών και ανώτερος ορίζοντας κροκαλοπαγών με ενστρώσεις ψαμμιτών και μαργών ηλικίας Άνω Ολιγόκαινου – Ακουϊτάνιου).

-Σειρά Φανουρίου : Ιλιούχες μάργες με κροκαλοπαγή και ψαμμίτες ηλικίας Ακουϊτάνιου – Βουρδιγάλιου.

-Σειρά Τρικάλων : Κυανές έως φαιοκίτρινες ιλιούχες μάργες με ψαμμίτες και ασβεστόλιθους ηλικίας Βουρδιγάλιου.

ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Οι σχηματισμοί αυτοί απαντούν κυρίως στην πεδινή Θεσσαλία και αποτελούνται από (Κατσικάτσος κα 1978, Μιγκίρος 1980, Πλαστήρας 1982):

-Νεογενή και Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα. Αποτελούν λιμναίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις, οι οποίες αποτελούνται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους και μάργες (με ενστρώσεις λιγνίτη).

-Αλλουβιακές και Πλειστοκαινικές αποθέσεις. Αποτελούνται από κώνους κορημάτων, πλευρικά κορήματα και προσχώσεις κοιλάδων και χειμάρρων με επικράτηση αδρομερών υλικών.

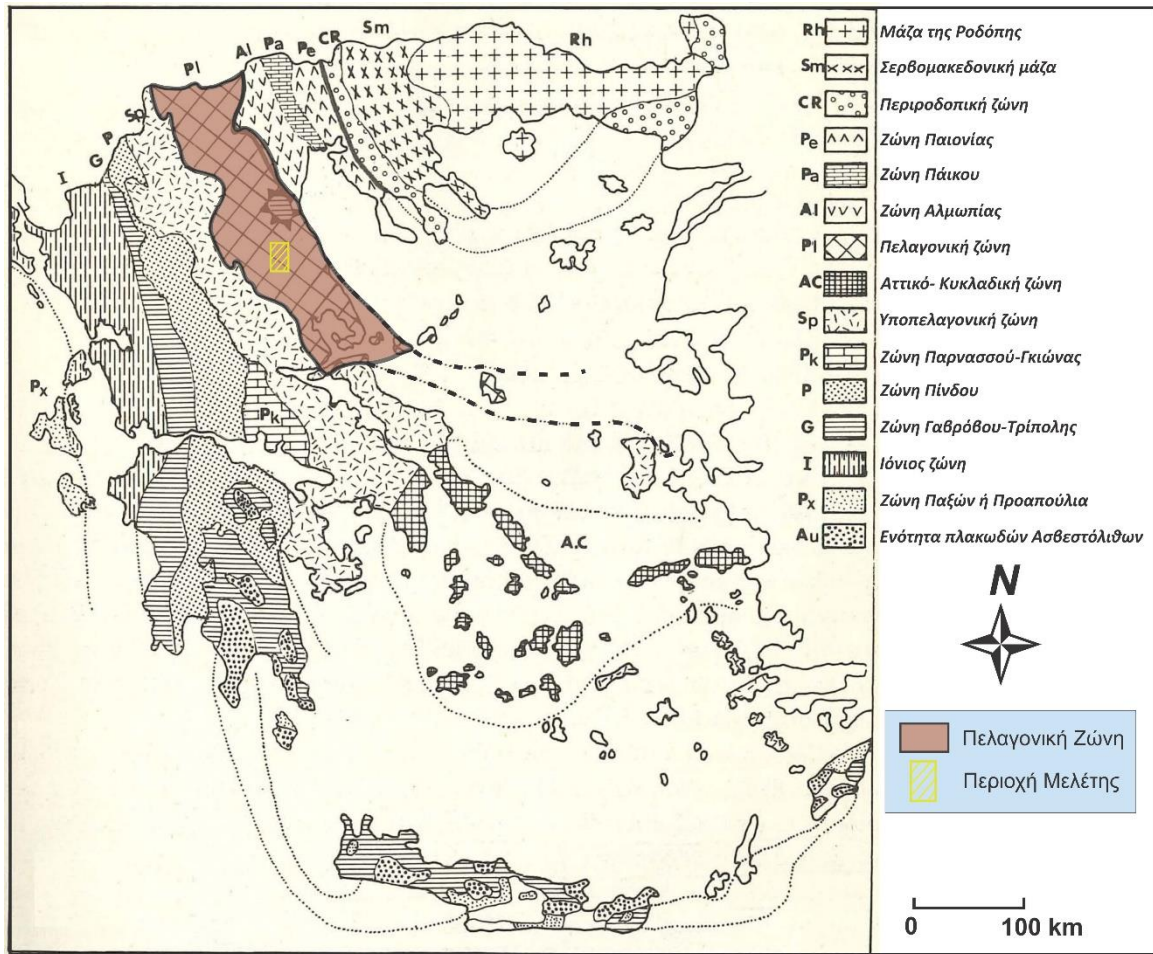
-Αλλουβιακές αποθέσεις: Αποτελούνται από τις προσχώσεις των λεκανών και των κοιλάδων με επικράτηση λεπτομερών υλικών κυρίως ποταμολιμναίας προέλευσης.

Σημειώνεται ότι στο 6^ο Κεφάλαιο (Παράγραφος 6.2), γίνεται λεπτομερέστερη αναφορά στους σχηματισμούς αυτούς, καθώς έχουν ιδιαίτερη σημασία για το υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής έρευνας.

4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η περιοχή έρευνας, ως μέρος του ανατολικού Θεσσαλικού βυθίσματος, ανήκει στην Πελαγονική ζώνη και ως εκ τούτου ακολουθεί τη γενική παλαιογεωγραφική εξέλιξη της ζώνης αυτής.

Η περιοχή έρευνας οριοθετείται στα βόρεια και δυτικά από σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης, όπως ήδη αναφέρθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο. Αντιπροσωπευτικούς σχηματισμούς της ζώνης αυτής στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας αποτελούν οι κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι, φυλλίτες, γνεύσιοι και μάρμαρα πολλές φορές σε εναλλαγή μεταξύ τους. Στη συνέχεια αναφέρονται οι σχηματισμοί της ζώνης αυτής που απαντώνται στην περιοχή έρευνας, ενώ στις Εικόνες 4.2 και 4.3 απεικονίζονται, ο ψηφιοποιημένος δισδιάστατος γεωλογικός χάρτης και ο αντίστοιχος τρισδιάστατος γεωλογικός χάρτης, όπως αυτοί προέκυψαν από την επεξεργασία βάσει των φύλλων χάρτη, 1:50,000 του Ι.Γ.Μ.Ε., Λάρισα και Γόννοι (Πλαστήρας 1982 και Μιγκίρος 1980).



Εικόνα 4.1. Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών (Τροποποιημένο από Mountrakis et al. 1983).

Παλαιοζωικό – Μέσο Τριαδικό (κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο)

Πρόκειται για σύνολο πολυφασικών μεταμορφωμένων ορθοπετρωμάτων και παραπετρωμάτων μέγιστου πάχους 3,000m. Έχουν εντοπισθεί οι εξής μεταμορφικές φάσεις (Παγώνης κ.α. 2008):

- α) μία αμφιβολιτική μεταμορφική φάση Παλαιοζωικής ηλικίας
- β) μία πρασινοσχιστολιθική μεταμορφική φάση Άνω-Ιουρασικής - Κάτω-Κρητιδικής ηλικίας
- γ) μία κυανοσχιστολιθική μεταμορφική φάση Μέσο-Κρητιδικής - προ-άνω-Ηωκαινικής ηλικίας
- δ) μία επιζωνική (ανάδρομη) μεταμορφική φάση μετα-μεσο-Ηωκαινικής ηλικίας.

Σχιστόλιθοι: πρόκειται για τα ανώτερα μέλη των Παλαιοζωικών – Κάτω-Τριαδικών σχηματισμών και δομούν το βόρειο κράσπεδο της περιοχής έρευνας (Εικόνα 4.2). Διακρίνονται σε:

- Μαρμαρυγιακούς – χαλαζιοαστριούχους σχιστόλιθους.
- Ακτινοβλαστικούς – χλωριτικούς σχιστόλιθους.

- Ανθρακικούς – μαρμαρυγιακούς – χαλαζιακούς σχιστολίθους.
- Πρασινολιθικούς σχιστόλιθους.

Γνεύσιοι - Σχιστογνεύσιοι: οι σχηματισμοί αυτοί οριοθετούν την περιοχή έρευνας στα βόρεια και βορειοανατολικά (περιοχή Αργυροπουλείου, Δελερίων, Ροδιάς) (Εικόνα 4.2). Πρόκειται για ορθο- και παρα- πετρώματα με κύρια ορυκτολογικά συστατικά χαλαζία, αστρίους και σε μικρότερο ποσοστό χλωρίτη και επίδοτο. Οι γνεύσιοι περιέχουν συχνά οφθαλμούς αστρίων και χαλαζία, ενώ κατά θέσεις διασχίζονται από φλέβες χαλαζιτη. Όσον αφορά τους σχιστογνεύσιους περιέχουν, στα ανώτερα στρώματα αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους και αμφιβολίτες, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζονται ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστόλιθων. Κύρια ορυκτολογικά συστατικά αποτελούν οι άστριοι, ο χαλαζίας, οι αμφίβολοι και ο μοσχοβίτης.

Μέσο Τριαδικό – Ιουρασικό

Μάρμαρα: στις δυτικές παρυφές της περιοχής έρευνας (Εικόνα 4.2) απαντούν εκτεταμένες εμφανίσεις μαρμάρων (περιοχή Δαμασίου-Τυρνάβου) μέγιστου πάχους 500m, οι οποίες καταλαμβάνουν σημαντικές εκτάσεις των ορεινών όγκων του Ζάρκου και του Τιτάνου. Πρόκειται για την κανονική μετάβαση των υποκείμενων Παλαιοζωικών – Μέσο-Τριαδικών σχηματισμών, ενώ σε κάποιες θέσεις παρεμβάλλεται ένας μεταβατικός ορίζοντας σχιστόλιθων και σιπολινών. Τα μάρμαρα εμφανίζονται από παχυστρωματώδη έως άστρωτα, ενώ παρουσιάζουν έντονο βαθμό τεκτονισμού και καρστικοποίησης. Στα κατώτερα μέλη τους παρουσιάζουν δολομιτική σύσταση. Έχουν έντονο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον, καθώς λόγω της έντονης καρστικοποίησης και του τεκτονισμού τους, μια πλούσια υδροφορία αναπτύσσεται μέσα σε αυτά, καταλήγοντας σε σημαντικές πηγές. Οι τελευταίες υπόκεινται σε έντονη εκμετάλλευση μέσω μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων. Η υδροφορία αυτή, όπως θα αναφερθεί αναλυτικά στη συνέχεια, λειτουργεί είτε ανεξάρτητα, είτε και σε υδραυλική επικοινωνία με τις αλλουβιακές υδροφορίες της υπολεκάνης Τυρνάβου.

Οι παραπάνω χαρακτηριστικοί σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης δομούν το υπόβαθρο και οριοθετούν πλευρικά την υπολεκάνη Τυρνάβου, που έχει πληρωθεί σχεδόν στο σύνολό της από Τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις, αποτελούμενες από υλικά ποταμοχερσαίας ή και ποταμολιμναίας προέλευσης, ενώ εμφανίζονται και αποθέσεις του Νεογενούς.

Πλειόκαινο (Νεογενές)

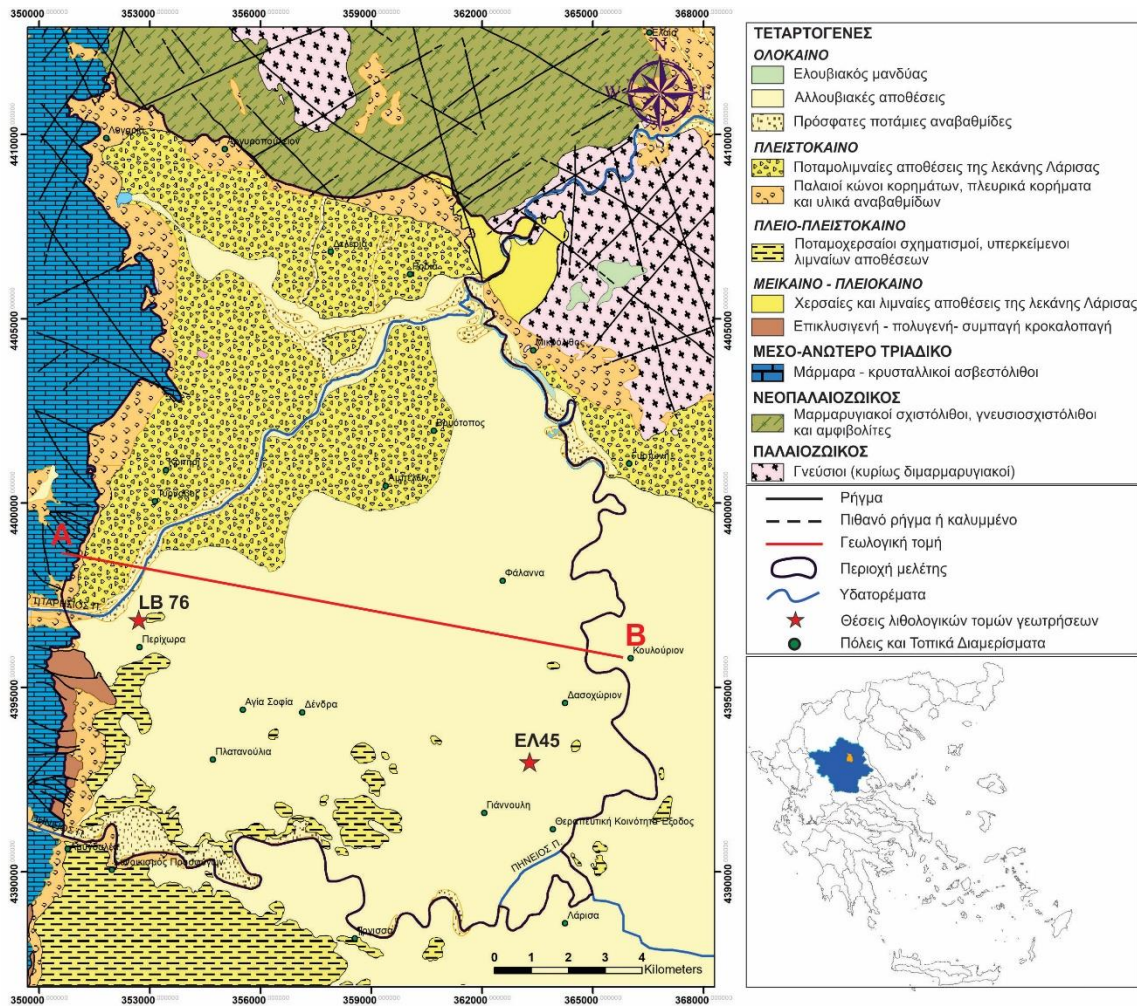
Κλαστικά υλικά χερσαίας προέλευσης: πρόκειται για μάργες, μαργαϊκούς ψαμμίτες και αργιλοαμμώδη υλικά και εμφανίζονται στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας (Εικόνα 4.2). Το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 30 m, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις καλύπτονται από ανθρακική επιφλοίωση. Έχουν επιφανειακή ανάπτυξη στη περιοχή των λόφων που διαχωρίζουν το δυτικό και το ανατολικό πεδινό τμήμα του θεσσαλικού κάμπου,

αποτελώντας ουσιαστικά και το γεωμορφολογικό στοιχείο που διαχωρίζει τη Θεσσαλική πεδιάδα στις δύο επιμέρους λεκάνες (Κεφάλαιο 3, Εικόνα 3.2). Στην υπό μελέτη περιοχή, ο σχηματισμός απαντάται νότια του Πηνειού, κοντά στα νότια όρια της υπολεκάνης. Πρόκειται για μεγάλης υδρογεωλογικής σημασίας σχηματισμών, καθώς μαζί με τα υποκείμενα πετρώματα του υποβάθρου, διαχωρίζουν υδρογεωλογικά τα δύο πεδινά τμήματα της Θεσσαλίας σε δύο αυτοτελείς υδρογεωλογικές λεκάνες. Οι λεκάνες αυτές δεν παρουσιάζουν, πρακτικά, επικοινωνία μεταξύ τους και έχουν ανεξάρτητες πηγές/ζώνες υπόγειας τροφοδοσίας.

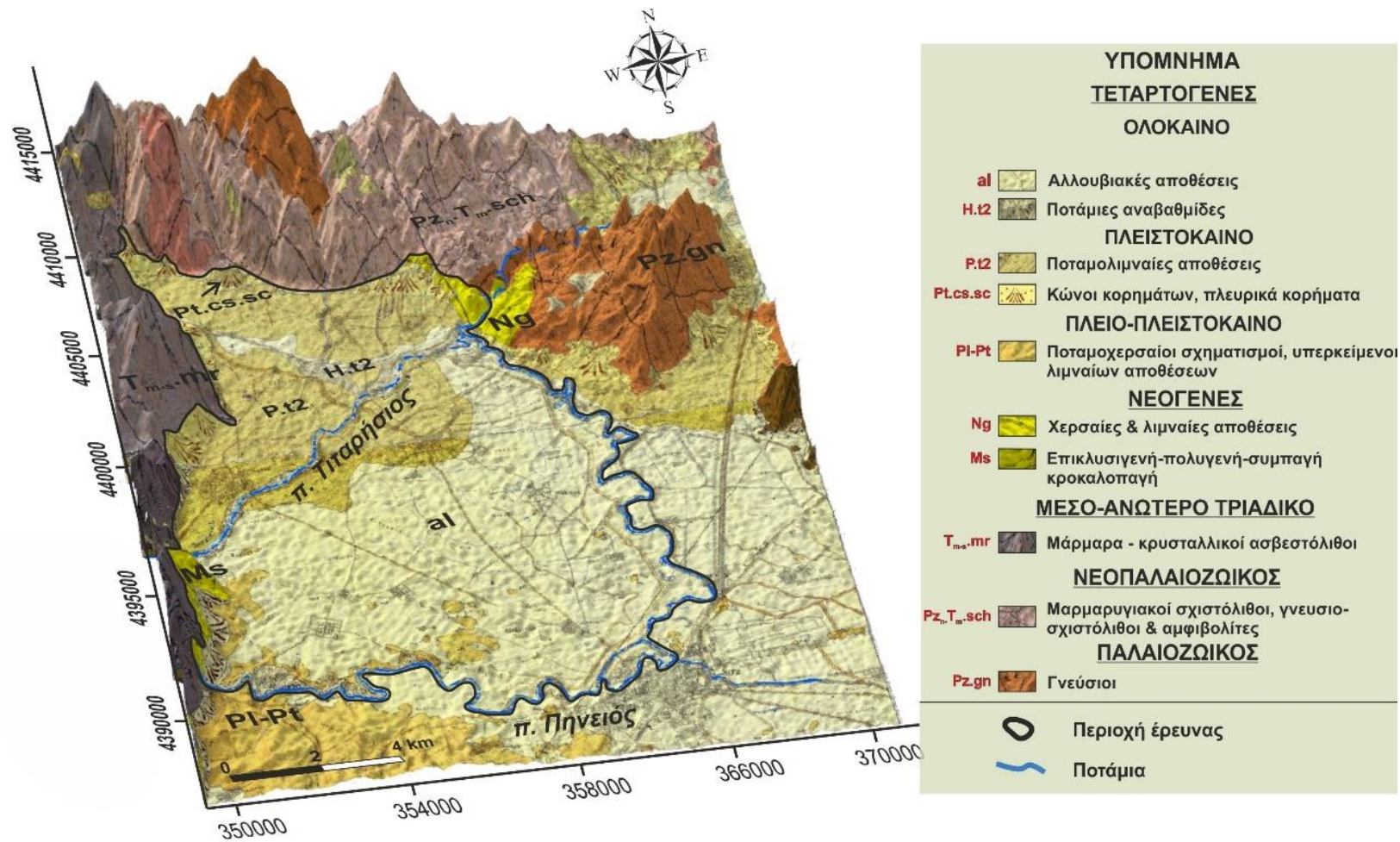
Τεταρτογενές

Πλευρικά κορήματα: πρόκειται για λατύπες με ποικίλο μέγεθος και λιθολογική σύσταση με λεπτομερές υλικό μεταξύ τους. Αναπτύσσονται στα κράσπεδα της υπολεκάνης Τυρνάβου (Εικόνα 4.2) και επικαλύπτονται από τις αλλουβιακές αποθέσεις που έχουν πληρώσει την υπολεκάνη.

Αλλουβιακές αποθέσεις: καταλαμβάνουν το σύνολο της περιοχής έρευνας (Εικόνα 4.2) και κατ' επέκταση, το πεδινό τμήμα της Θεσσαλίας. Παρουσιάζουν ποικίλη κοκκομετρία με ποταμοχειμάρρια, ποτάμια ή και λιμναία προέλευση. Η κοκκομετρική σύνθεση των αποθέσεων μεταβάλλεται προοδευτικά με την απομάκρυνση από τον κώνο κορημάτων του ποταμού Τιταρήσιου, ο οποίος αποτελεί και τον αποκλειστικό τροφοδότη της ανατολικής πεδιάδας με χονδρόκοκκα υλικά. Οι αποθέσεις μεταβαίνοντας από τα Δυτικά προς τα Ανατολικά, γίνονται περισσότερο λεπτόκοκκες, με μεγαλύτερο ποσοστό λεπτομερούς άμμου, πηλού, και αργιλοϊλυδών αποθέσεων. Οι πρόσφατες αυτές αποθέσεις παρουσιάζουν κυμαινόμενο πάχος, όπου στα δυτικά περιθώρια της πεδινής περιοχής δεν υπερβαίνει τα 50-70 m, όπως προέκυψε από γεωφυσικά δεδομένα (Compagnie Generale de Geophysique 1972, Sogreah 1974), την ανάλυση λιθολογικών τομών γεωτρήσεων (Demitrack 1986), καθώς και βιβλιογραφικές αναφορές παλαιότερων επιστημονικών εργασιών (Panagoroulos et al. 1995, Vrouhakis et al. 2017). Ανατολικότερα, μεταβαίνοντας προς τον Πηνειό, οι αποθέσεις αυτές παρουσιάζουν σημαντική αύξηση του πάχους τους, το οποίο μπορεί να ξεπεράσει και τα 200m (Panagoroulos 1995, Panagoroulos et al. 1995, Vrouhakis et al. 2017, Vrouhakis et al. 2019). Όπως το πάχος έτσι και το υπόβαθρο των Τεταρτογενών αποθέσεων, ποικίλει από θέση σε θέση και από την απόσταση από τα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης. Στις δυτικές παρυφές, ως υπόβαθρο των αλλουβιακών αποθέσεων είναι είτε απευθείας τα μάρμαρα της Πελαγονικής, είτε παρεμβάλλεται ένα στρώμα Νεογενών σχηματισμών. Προς τις νότιες παρυφές της περιοχής έρευνας το υπόβαθρο των αλλουβιακών σχηματισμών αποτελούν οι Νεογενείς σχηματισμοί, ενώ στα βόρεια και βορειοανατολικά οι γνεύσιοι και σχιστόλιθοι. Αντιπροσωπευτικές λιθολογικές τομές σε δύο χαρακτηριστικές θέσεις της περιοχής έρευνας, όπως αυτές σημειώνονται στην Εικόνα 4.2, παραθέτονται στην Εικόνα 4.5.

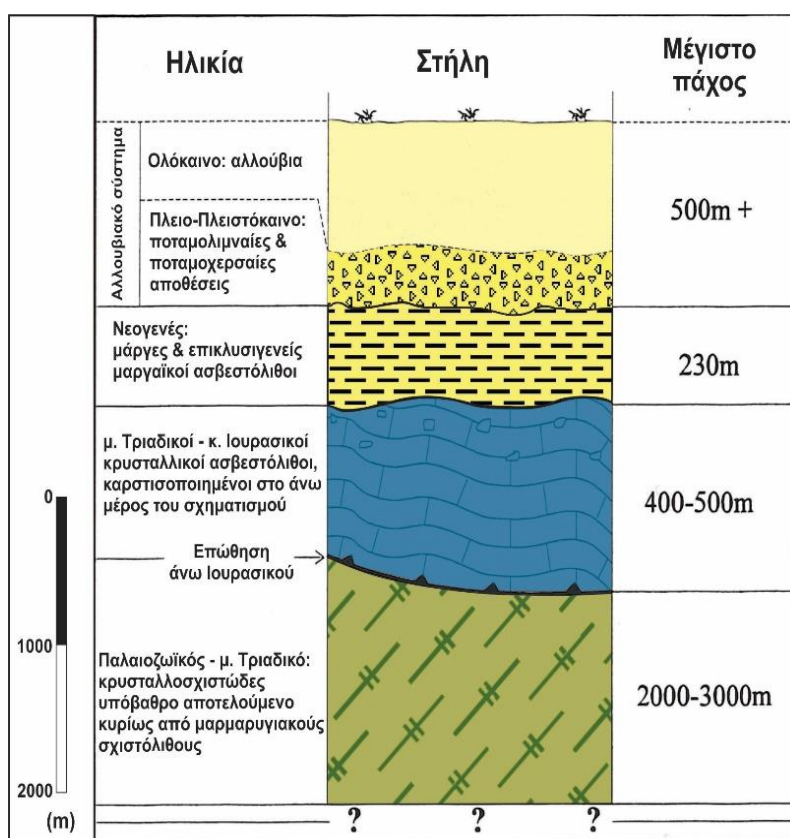


Εικόνα 4.2. Ψηφιοποιημένος γεωλογικός χάρτης περιοχής έρευνας, βασισμένος στα φύλλα γεωλογικού χάρτη Λάρισα (Πλαστήρας 1982) και Γόννοι (Μιγκίρος 1980), με παρεμβάσεις ομογενοποίησης.



Εικόνα 4.3. Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολεκάνης Τυρνάβου, όπως αυτή διαμορφώθηκε από την επεξεργασία των φύλλων χάρτη, 1/50.000 του ΙΓΜΕ, Λάρισα (Πλαστήρας 1982) και Γόννοι (Μιγκίρος 1980).

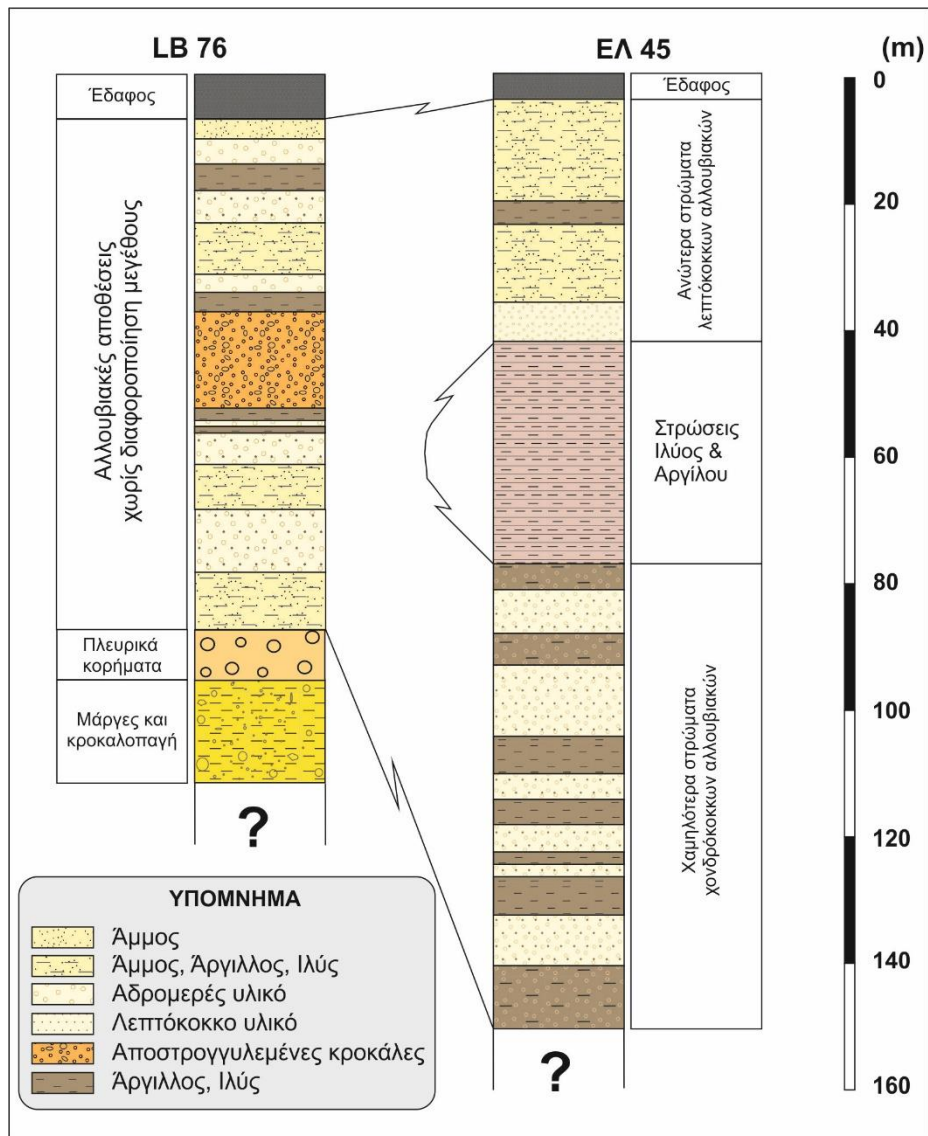
Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται η απλουστευμένη στρωματογραφική στήλη με τους σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν έως τώρα.



Εικόνα 4.4. Απλουστευμένη στρωματογραφική στήλη των σχηματισμών της περιοχής έρευνας (Panagoroulos 1995).

4.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων γεωηλεκτρικής έρευνας που διεξήχθη στα πεδινά τμήματα της θεσσαλικής πεδιάδας και η οποία συμπεριελάμβανε και την ευρύτερη περιοχή έρευνας (Compagnie Generale de Geophysique 1972), εντοπίστηκαν περιοχές χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης τόσο νότια του ποταμού Πηνειού όσο και στα βόρεια τμήματα της υπολεκάνης Τυρνάβου. Τα ευρήματα αυτά υποδεικνύουν υψηλή περιεκτικότητα των ιζημάτων σε ιλύ και άργιλο. Επιπρόσθετα, εντοπίστηκε λιθολογική μετάβαση από τις χονδρόκοκκες, χαμηλής περιεκτικότητας σε άργιλο αποθέσεις (πλευρικά κορήματα) στα δυτικά, προς λεπτόκοκκες αποθέσεις, με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ιλύ και άργιλο (λιμναίο περιβάλλον) προς το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης.



Εικόνα 4.5. Λιθολογικές τομές γεωτρήσεων LB76 (δυτικό περιθώριο) και EL45 (ανατολικό τμήμα) εντός της περιοχής έρευνας.

Παρόμοια αποτελέσματα εξήχθησαν από τη μελέτη των λιθολογικών τομών γεωτρήσεων της περιοχής. Δύο τυπικές λιθολογικές τομές του υπό μελέτη συστήματος απεικονίζονται στην Εικόνα 4.5. Η γεώτρηση LB76 βρίσκεται κοντά στο δυτικό περιθώριο της υπολεκάνης ενώ η γεώτρηση EL45 βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα αυτής. Η ακριβής θέση των γεωτρήσεων αυτών να απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2. Παρά τις σημαντικές λιθολογικές εναλλαγές που παρατηρούνται στις τομές αυτές και που αποτελούν χαρακτηριστική εικόνα των αλλουβιακών αποθέσεων, η γεώτρηση LB76, η οποία αντιπροσωπεύει την περιοχή κοντά στο δυτικό περιθώριο της υπολεκάνης χαρακτηρίζεται από πιο χονδρόκοκο υλικό σε σύγκριση με τη γεώτρηση EL45, η οποία αντιπροσωπεύει το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης.

Περαιτέρω εξέταση των λιθολογικών τομών έδειξε ότι η σύνθεση της αλλουβιακών αποθέσεων είναι γενικά λεπτή στους ανώτερους ορίζοντές τους. Κάτω από το λεπτόκοκκο αυτό αλλουβιακό υλικό παρατηρείται στα κεντρικά τμήματα μια εκτεταμένη ακολουθία αποτελούμενη από εναλλαγές ιλύος και αργίλου. Οι άμμοι και οι χάλικες είναι περιορισμένοι και επομένως υπάρχει έντονη λιθολογική αντίθεση μεταξύ αυτής της ακολουθίας και των ιζημάτων που βρίσκονται πάνω και κάτω από αυτήν. Ωστόσο, λόγω των απότομων πλευρικών μεταβάσεων που χαρακτηρίζουν τα προσχωσιγενή ιζήματα, αυτή η ιλυο-αργιλική αλληλουχία δεν εντοπίστηκε σε όλες τις λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων που μελετήθηκαν. Στα βαθύτερα τμήματα της υπολεκάνης, αυτές οι εναλλαγές μειώνονται σε πάχος και συχνότητα. Παρατηρείται βαθμιαία μετάβαση από λεπτόκοκκο σε χονδρόκοκκο υλικό, κοκκομετρίας άμμων και χαλικών. Προς τα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης οι κατακόρυφες αυτές λιθολογικές μεταβολές τείνουν βαθμιαία να εξαλειφθούν (Εικόνα 4.6).

Ο ποταμός Τιταρήσιος έχει χειμαρρώδη χαρακτήρα και απορρέει σε υψηλές τοπογραφικές κλίσεις πριν εισέλθει στη υπολεκάνη Τυρνάβου διαμέσου στενού φαραγγιού. Η απότομη μεταβολή της κλίσης κατά την είσοδό του στην υπολεκάνη έχει ως αποτέλεσμα την απόθεση των υλικών που μεταφέρει, τα οποία αποτελούνται από γωνιώδεις και μερικώς στρογγυλεμένες κροκάλες διαφόρων προελεύσεων, αναμεμιγμένες με άμμο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένας εκτεταμένος κώνος κορημάτων αρκετών δεκάδων μέτρων στο δυτικό περιθώριο της υπολεκάνης (Εικόνες 4.2 και 4.3).

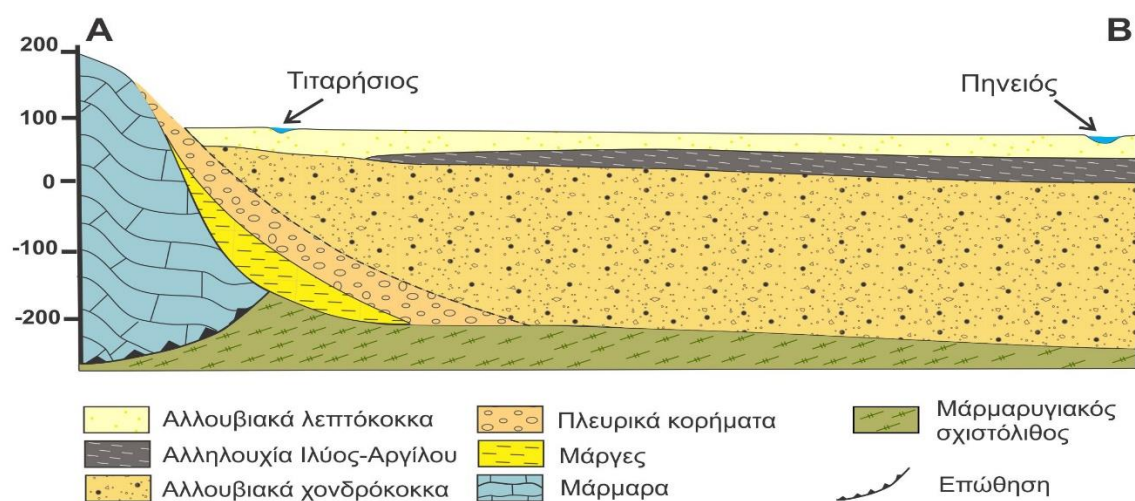
Από έρευνες που διεξήχθησαν στην περιοχή προέκυψε, ότι ο κώνος του Τιταρήσιου αποτελείται από 6-7 τύπους εδάφους, το πάχος του κυμαίνεται από 3 έως 10m και είναι λεπτότερος στα δυτικά περιθώρια ενώ γίνεται πιο παχύς στο κεντρικό, ανατολικό και βόρειο τμήμα της υπολεκάνης. Τα εδάφη αυτά αποτελούνται από ακολουθίες ιλύος και αργίλου, με αργιλικούς κατά θέση ορίζοντες ασβεστολιθικού χαρακτήρα στα δυτικά περιθώρια, σε αντίθεση με το κεντρικό και ανατολικό τμήμα της υπολεκάνης όπου το ποσοστό της αργίλου είναι πολύ υψηλότερο και δεν έχει ασβεστολιθικό χαρακτήρα (Danalatos 1992, Panagoroulios 1995).

Το πάχος των Τεταρτογενών αλλουβιακών αποθέσεων, τα οποία καλύπτουν την περιοχή έρευνας, υπερβαίνει τα 500m στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης (Alexandridis et al. 2014) και παρά την έντονη ανομοιογένειά τους, υπάρχουν κάποιες τάσεις αναφορικά με την κατανομή της λιθολογίας τους, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Με βάση τις τάσεις αυτές, μπορούν να διακριθούν στις αλλουβιακές αποθέσεις, οι ακόλουθες ενότητες (Εικόνα 4.6):

1. Ανώτερο στρώμα λεπτόκοκκων αλλουβιακών αποθέσεων, όπου υπάρχει λεπτό υλικό με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο μαζί με μερικές ζώνες από άμμο και λεπτό χαλίκι. Το πάχος αυτού του τμήματος κυμαίνεται από 40 έως 70m.

2. Ακολουθία ιλύος-αργίλου, η οποία αποτελείται ουσιαστικά από ζώνες ιλύος και αργίλου. Το πάχος αυτής της ακολουθίας είναι μεγαλύτερο προς το κέντρο της υπολεκάνης, όπου φτάνει τα 50m ή/και περισσότερο, ενώ προς τα άκρα της αποσφηνώνεται. Σε κλίμακα περιοχής αυτή η ακολουθία μπορεί να θεωρηθεί ως ομοιόμορφο στρώμα και για το λόγο αυτό αναφέρεται ως στρώμα αργίλου.

3. Χαμηλότερα στρώματα χονδρόκοκκων αλλουβιακών αποθέσεων, το πάχος των οποίων κυμαίνεται από 350 έως 400 (ή και περισσότερο) και διαχωρίζεται από το πρώτο στρώμα των λεπτόκοκκων αλλουβιακών, με το προαναφερόμενο στρώμα αργίλου. Τα δύο στρώματα των αλλουβιακών αποθέσεων συνδέονται προς τα δυτικά περιθώρια, καθώς η παρεμβαλλόμενη ακολουθία αργίλου φθίνει σε πάχος και τελικά εξαλείφεται (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6. Γεωλογική τομή κατά μήκος της υπολεκάνης Τυρνάβου (Ραπαγοπούλος 1995).

Με βάση τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Εικόνες 4.2 και 4.3) και την εκτενή μελέτη της λιθολογίας των αλλουβιακών αποθέσεων, κατασκευάστηκε γεωλογική τομή κατά μήκος της υπολεκάνης Τυρνάβου, η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 4.6. Η ακριβής διεύθυνση της τομής (A-B) φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Τονίζεται ότι, η εμφάνιση των μαργαϊκών σχηματισμών στο υπόβαθρο της γεωλογικής τομής (Εικόνα 4.6), αφορά μόνο στα νότια όρια της περιοχής έρευνας και όχι σε όλη την έκταση του δυτικού ορίου επαφής του καρστικού συστήματος με τις αλλουβιακές αποθέσεις. Η επιλογή της τομής στη συγκεκριμένη περιοχή έγινε λόγω της ύπαρξης πλήθους λιθολογικών τομών γεωτρήσεων καθώς και για την πληρότητα αποτύπωσης της γεωλογικής δομής του χώρου.

4.4 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

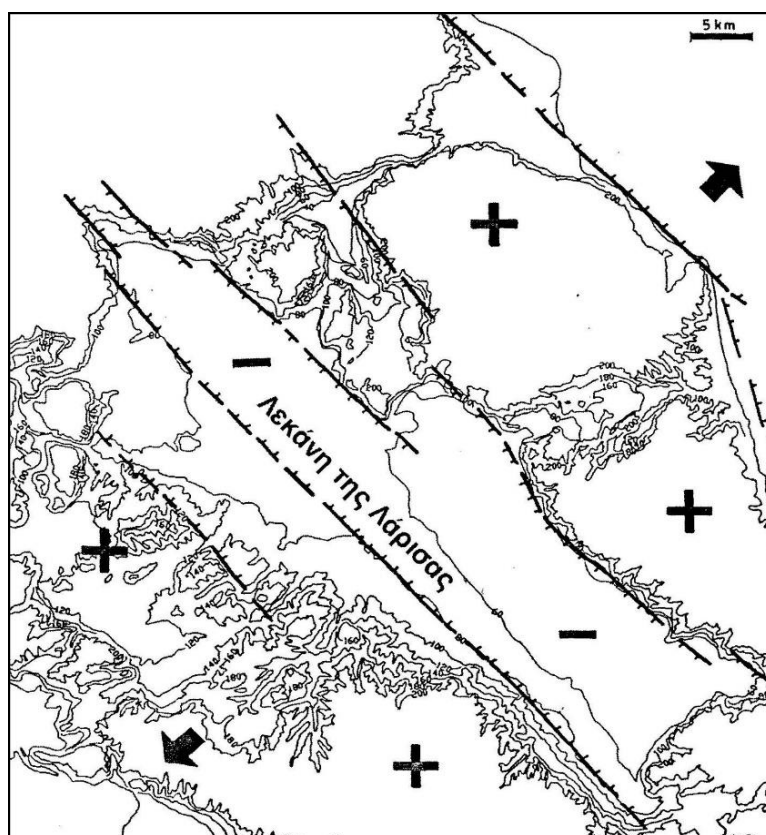
Η σημερινή κατάσταση των γεωμορφολογικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της ανατολικής Θεσσαλικής πεδιάδας είναι αποτέλεσμα της γεωδυναμικής εξέλιξης κατά τη διάρκεια των τελευταίων εκατοντάδων χιλιάδων ετών. Στη διάρκεια του Τεταρτογενούς, η τεκτονική δραστηριότητα, με τη διατήρηση των διαδικασιών διάβρωσης στις οροσειρές και στα συσσωρευμένα φερτά υλικά εντός των τάφρων, δημιούργησε ιδανικές συνθήκες όσον αφορά την γονιμότητα των εδαφών και συνεπακόλουθα των φυτικών εκτάσεων και της πανίδας που τις συνοδεύει (Helly et al. 2000).

4.4.1 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟΥ – ΟΛΟΚΑΙΝΟΥ

Η Ανατολική Θεσσαλία ανήκει στο εσωτερικό τμήμα της ελληνικής ορογενετικής ζώνης. Η δημιουργία της οροσειράς είναι το αποτέλεσμα πολλαπλών φάσεων συμπίεσης, με τελευταία την αλπική φάση. Η αλπική συμπίεστική φάση, για την περιοχή της Θεσσαλίας, έλαβε χώρα από το Ηώκαινο έως και το Μέσο Μειόκαινο. Στη συνέχεια, η ζώνη επηρεάστηκε από μια επεκτατική δραστηριότητα ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης, η οποία πιθανότατα συνδυάστηκε με μια υστερο-ορογενετική καθίζηση από την οποία προέκυψε ένα σύστημα τεκτονικών ρηγμάτων και τάφρων παρόμοιας διεύθυνσης (ΒΑ-ΝΔ). Η τεκτονική αυτή δραστηριότητα στην περιοχή της Θεσσαλίας υπήρξε ενεργή από το Πλειόκαινο μέχρι το Πλειστόκαινο. Στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζονται τα κύρια ενεργοποιημένα ρήγματα αυτής της παραμορφωτικής τάσης, τα οποία υποδεικνύουν τις κατακόρυφες κινήσεις που επηρεάζουν τις κύριες πλάκες που περιβάλλονται από ρήγματα. Οι κάθετες προεξοχές, οι οποίες εμφανίζονται από τη μία πλευρά των ρηγμάτων, υποδηλώνουν τη βυθιζόμενη πλάκα. Μορφολογικά, η σημασία της τεκτονικής δραστηριότητας του Πλειοκαίνου και του Κατώτερου Πλειστοκαίνου έγκειται στο γεγονός της δημιουργίας της λεκάνης της Λάρισας με κατεύθυνση ΒΔ-ΝΔ (Helly et al. 2000).

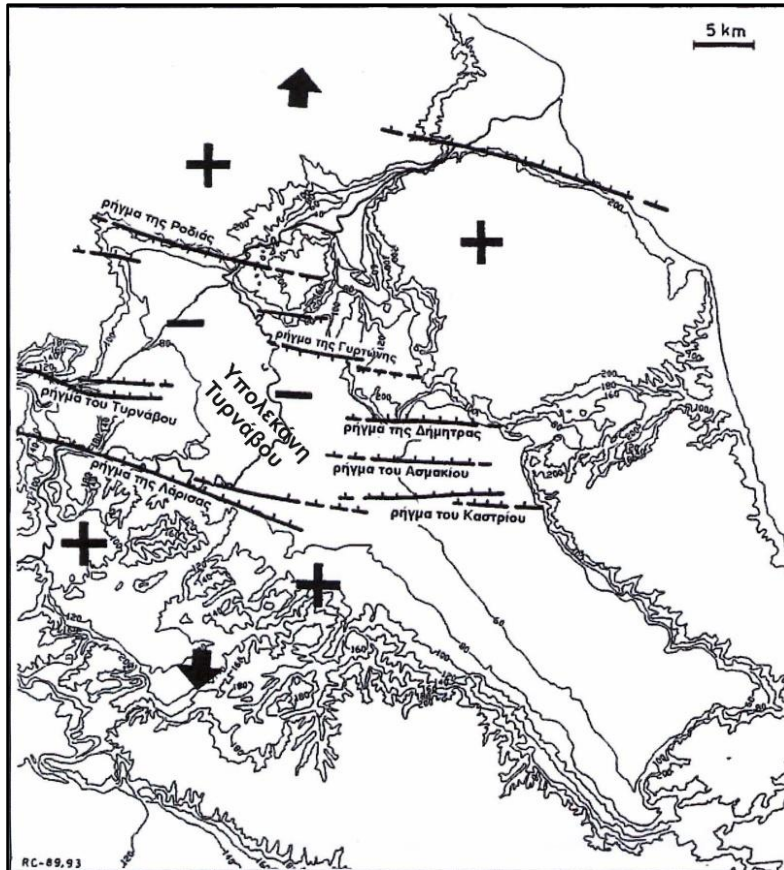
Η παλαιογεωγραφία της περιοχής, αναλυμένη με βάση ιζηματολογικές και στρωματογραφικές μελέτες, χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη εκτεταμένων λιμναίων συστημάτων. Με βάση την εδαφική καθίζηση λόγω του βάρους των ιζημάτων και της παροχής νερού, μια μεγάλη λίμνη βάθους πολλών δεκάδων μέτρων, αναπτυσσόταν στο σύνολο της ανατολικής πεδιάδας. Από τη συνεχόμενη παρουσία ελωδών και λιμναίων συνθηκών, τουλάχιστον από το Βιλλαφράγκιο, προκύπτει ότι το υδρογραφικό δίκτυο το οποίο διέσχιζε τη λεκάνη της Λάρισας, τμήμα της οποίας αποτελεί η υπολεκάνη Τυρνάβου, δεν ήταν σταθερό και μόνιμο. Στο τέλος της περιόδου αυτής, ο Πηνειός ξεκίνησε να δημιουργεί το δέλτα του στα παράλια του Αιγαίου. Το γεγονός αυτό ήταν άρρηκτα συνδεδεμένο με τη διάνοιξη των Τεμπών, μεταξύ Ολύμπου και Όσσας, επιτρέποντας τη μόνιμη διαφυγή των νερών που

προέρχονταν από τη λεκάνη της Λάρισας. Με τον τρόπο αυτό επήλθε εκκένωση της Θεσσαλικής λίμνης και δημιουργήθηκε το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής (Helly et al. 2000).



Εικόνα 4.7. Απλοποιημένος μορφολογικός χάρτης Ανατολικής Θεσσαλίας. Τα σύμβολα + και - δείχνουν τα τμήματα που προεξέχουν και εκείνα που καταβυθίζονται υπό το βάρος των ιζημάτων (Helly et al. 2000).

Ύστερα από μια περίοδο τεκτονικής ηρεμίας, ακολούθησε μια νέα επεκτατικού τύπου τεκτονική δραστηριότητα, η οποία επηρέασε την περιοχή με κατεύθυνση από B-N προς BBA-NNΔ (Helly et al. 2000). Η δραστηριότητα αυτή ξεκίνησε στο Μέσο Πλειστόκαινο και είναι ενεργή ακόμα και σήμερα, όπως επιβεβαιώνεται από την πρόσφατη σεισμική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή (Karakostas et al. 2021, Koukouvelas et al. 2021). Η φάση αυτή έπαιξε σημαντικό ρόλο στη μορφολογική εξέλιξη της Θεσσαλίας και ιδιαίτερα για την περιοχή της πεδιάδας της Λάρισας. Σχηματίστηκε έτσι ένα καινούριο σύστημα κανονικών ρηγμάτων, του οποίου ο κύριος προσανατολισμός είναι A-Δ προς ANA-ΔΒΔ (Εικόνα 4.8) και το οποίο είτε τέμνει είτε παρακάμπτει τις παλαιότερες ΒΔ-ΝΑ κατευθύνσεις. Ωστόσο, τα νέα αυτά ρήγματα συνετέλεσαν ουσιαστικά στη δημιουργία των νέων δομών, με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθούν εκ νέου κάποια από τα κανονικά ρήγματα του Πλειοκαίνου με μια πλάγια συνισταμένη.



Εικόνα 4.8. Κύρια ρήγματα τα οποία ενεργοποιήθηκαν κατά την περίοδο επέκτασης Πλειστοκαίνου – Μ. Ολοκαίνου και προκάλεσαν την κατεύθυνση Α-Δ της υπολεκάνης Τυρνάβου. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της επέκτασης ενώ τα σύμβολα + και - τα τμήματα που προεξέχουν και εκείνα που καταβυθίζονται υπό το βάρος των ιζημάτων (Helly et al. 2000 με τροποποιήσεις).

Με αυτό τον τρόπο η υπολεκάνη του Τυρνάβου αρχίζει να σχηματίζεται, καθώς το τοπογραφικό υπόβαθρο που δημιουργήθηκε σε αυτή τη φάση καθώς και η ανύψωση των τεκτονικών τεμαχών, την οριοθετούν. Γεωμορφολογικά, η υπολεκάνη Τυρνάβου δεν είναι κλειστή μόνο στα ανατολικά της Λάρισας, όπου συνδέεται με το νότιο ρήγμα της ανατολικής θεσσαλικής πεδιάδας. Τεκτονικά η λεκάνη οριοθετείται στα βόρεια από τα μεγάλα ρήγματα της Ροδιάς και της Γυρτώνης και στα νότια από τα αντίστοιχα του Τυρνάβου και της Λάρισας. Ανατολικά της Λάρισας, σε αντιστοιχία με την ανοικτή περιοχή, υπάρχει ένα σύνολο σημαντικών ρωγματώσεων, παράλληλων με το ρήγμα της Λάρισας (Εικόνα 4.8). Δημιουργείται κατ' αυτό τον τρόπο ένα σύστημα αναβαθμίδων με καθοδική διάταξη προς το Βορρά, αντίθετης κατεύθυνσης από το ρήγμα της Γυρτώνης.

4.4.2 ΤΕΚΤΟ-ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ ΤΥΡΝΑΒΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε, η υπολεκάνη Τυρνάβου σχηματίστηκε κατά την τεκτονική φάση του Πλειστοκαίνου και του Μέσου Ολοκαίνου. Οι νέες αυτές συνθήκες, όπως

και η εκροή των υδάτων προς το Βορρά, επηρέασαν έντονα την παλαιογεωγραφική εξέλιξη της περιοχής. Σύμφωνα με τους Caruto et al. (1994), η πεδιάδα στην περιοχή της Λάρισας διαχωρίστηκε σε δύο τομείς:

(α) ο πρώτος καταλαμβάνει το τμήμα νότια του ρήγματος της Λάρισας και σχετίζεται με τη φάση του Πλειοκαίνου – Κ. Πλειστοκαίνου, χωρίς να έχει πρακτικά παραμορφωθεί.

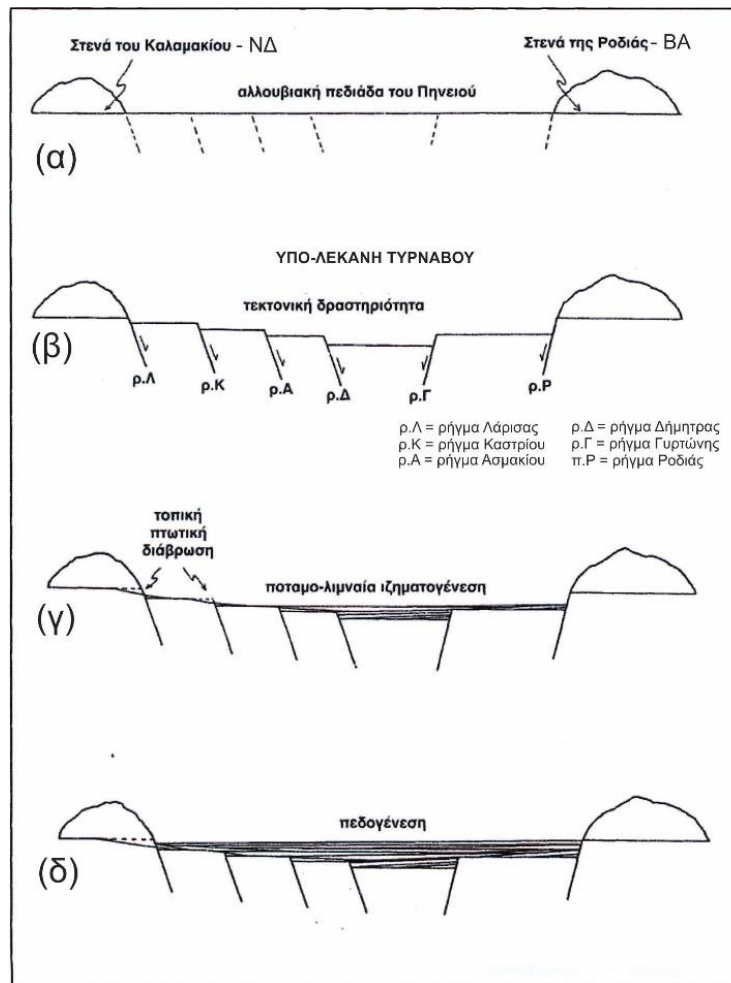
(β) ο δεύτερος τομέας (στα βόρεια), αποτελεί την αλλουβιακή πεδιάδα του Πηνειού και του Τιταρήσιου (υπολεκάνη Τυρνάβου). Υπό την ισχυρή πίεση των ιζημάτων και των αποθέσεων το τμήμα αυτό παρουσιάζεται έντονα κεκλιμένο, αποτελώντας μια ιδανική «παγίδα» προσχώσεων.

Οι προσχώσεις που προέρχονται από τη λεκάνη μεταφέρονται αποκλειστικά από τον Πηνειό ποταμό μέσω των στενών στην περιοχή της Ροδιάς. Αναφορικά με την προέλευση των προσχώσεων, ο κύριος όγκος τους, μεταφέρεται από τον ίδιο ποταμό μέσω των στενών του Καλαμακίου. Όσον αφορά τον Τιταρήσιο, μεταφέρει μικρότερες ποσότητες από μικρότερα ρέματα της υπολεκάνης. Το σύνολο αυτό, των δύο ποταμών και ρεμάτων, εισέρχεται στη λεκάνη του Τυρνάβου τέμνοντας μερικά από τα ρήγματα.

Κατά μήκος του ποταμού Πηνειού το ανάγλυφο διαχωρίζεται σε μία σειρά τμημάτων, που διαπερνούν διαδοχικά το κρυσταλλικό υπόβαθρο και τις πρόσφατες προσχώσεις (Εικόνα 4.9). Υποθέτοντας ότι οι αρχικές συνθήκες ήταν τέτοιες ώστε το ανάγλυφο να θεωρείται ισορροπημένο (Εικόνα 4.9α), ο κύκλος ιζηματογένεσης ξεκινάει όταν η ζώνη επηρεάζεται από μία μορφογενή σεισμική δραστηριότητα (Εικόνα 4.9β). Αρχικά γίνεται η παραδοχή ότι όλα τα ρήγματα ενεργοποιήθηκαν σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (π.χ. μερικοί αιώνες), χαρακτηρίζοντας έτσι μια τοπική τεκτονική έξαρση. Η τεκτονική αυτή έξαρση έχει ως αποτέλεσμα τον τεμαχισμό της ζώνης ή του αναγλύφου σε πολλές ανισόπεδες πλάκες, με συνέπεια τη διατάραξη της ισορροπίας του υδρογραφικού συστήματος και έτσι κάθε ρήγμα δημιουργεί νέες υδρογραφικές συνθήκες. Ανάντη του ρήγματος της Λάρισας η διάβρωση ξεκινάει να ανασκάπτει τα στενά του Καλαμακίου, ενώ το ίδιο φαινόμενο επαναλαμβάνεται σε τοπική κλίμακα για κάθε ένα από τα μικρότερα συνθετικά ρήγματα (Εικόνα 4.9γ) (Helly et al. 2000).

Υπό την πίεση των ιζημάτων, η καθίζηση του εδάφους και η αναχαίτιση της εκροής από το ρήγμα της Ροδιάς έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας προσχωσιγενούς ιζηματογένεσης ή και ελώδους στα κεντρικά και βόρεια τμήματα της υπολεκάνης του Τυρνάβου (Εικόνα 4.9γ). Παρόμοιες συνθήκες ιζηματογένεσης συνεχίζουν να υφίστανται στην υπολεκάνη, όσο οι αποθέσεις δεν αποσβένουν το ανισόπεδο αναγλύφο που δημιουργήθηκε από την κίνηση του ρήγματος. Όταν αυτό συμβαίνει, η ιζηματογένεση παύει ή σταματά και στην αλλουβιακή πεδιάδα επικρατούν προσωρινά σταθερές συνθήκες (Εικόνα 4.9γ). Κατά την διάρκεια της φάσης αυτής, η υπολεκάνη του Τυρνάβου αποτέλεσε ζώνη παράκαμψης για τον Πηνειό, χωρίς

σημαντική είσοδο ή έξοδο ιζημάτων και το ιζηματογενές ισοζύγιο βρισκόταν σε ισορροπία. Κατά το διάστημα ενεργοποίησης του ποταμού, προκειμένου να επαναφέρει σε ισορροπία το ανάγλυφο, πριν από την ενεργοποίηση της τεκτονικής δραστηριότητας, λαμβάνει χώρα μια εκτενής εδαφογένεση της αλλουβιακής πεδιάδας. Ο κύκλος τεκτο-ιζηματογένεσης κλείνει με την επαναφορά των προηγούμενων συνθηκών, ενώ στην περίπτωση μιας καινούριας τεκτονικής φάσης είναι σε θέση να ξεκινήσει ξανά. (Helly et al. 2000).



Εικόνα 4.9. Τεκτο-ιζηματογενετικός κύκλος της υπολεκάνης Τυρνάβου (Helly et al. 2000). (α) Αρχικές σταθερές συνθήκες (β) Τεκτονική έξαρση και ενεργοποίηση των ρηγμάτων της υπολεκάνης (γ) Επαγωγική ιζηματογένεση λόγω της ανάσχεσης των ρηγμάτων της Γυρτώνης και της Ροδιάς.

5 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Υδρολογία είναι η επιστήμη, η οποία ασχολείται με τα νερά επί της γης (προέλευση, κυκλοφορία, κατανομή), με τις φυσικές και χημικές ιδιότητές τους, καθώς και με τις αμοιβαίες επιδράσεις τους με το περιβάλλον, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και τα έμβια όντα (Korzun 1984). Οι εφαρμογές της υδρολογίας αγγίζουν όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες και σχετίζονται με πληθώρα επιστημών άλλες με μικρότερο βαθμό συσχέτισης και άλλες με άρρηκτη σχέση μεταξύ τους.

Το υδρολογικό ισοζύγιο, ως έννοια, είναι σημαντικό για την κατανόηση και διαχείριση των υδατικών πόρων μιας γεωγραφικής περιοχής και των φυσικών και πολιτιστικών συστημάτων που τα συνδέουν, συμπεριλαμβάνοντας τους τύπους της βλάστησης, τις χρήσεις γης, την επιφανειακή απορροή, την τροφοδοσία των υδατικών συστημάτων, τα ρέματα και τους υγροτόπους (Mather 1978). Αποτελεί ουσιαστικά ρυθμιστικό παράγοντα για το σύνολο των ποσοτικών μεταβολών και των εποχικών διακυμάνσεων της ποιότητας των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων της υδρολογικής λεκάνης. Για την ακριβή εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου είναι απαραίτητη η ανάλυση και η επεξεργασία των δεδομένων που συνθέτουν τους παράγοντες που το αποτελούν και που συνοψίζονται στα κατακρημνίσματα, την εξατμισοδιαπνοή, την επιφανειακή απορροή και την κατεΐσδυση. Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτονται και αναλύονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης.

5.2 ΔΙΚΤΥΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στην Εικόνα 5.1, αποτυπώνονται όλοι οι διαθέσιμοι μετεωρολογικοί σταθμοί του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας, οι οποίοι εποπτεύονται από διάφορους φορείς (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (ΥΠΕΝ), ΔΕΗ, ΕΜΥ, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων (ΥΠΑΑΤ) και Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών). Τα σχετικά πρόσφατα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα των σταθμών αυτών αφορούν πρωτίστως τη βροχόπτωση ενώ στις λιγότερες των περιπτώσεων τη θερμοκρασία αέρα, την υγρασία, την εξάτμιση κ.α. Από το δίκτυο αυτό των σταθμών, για την παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν:

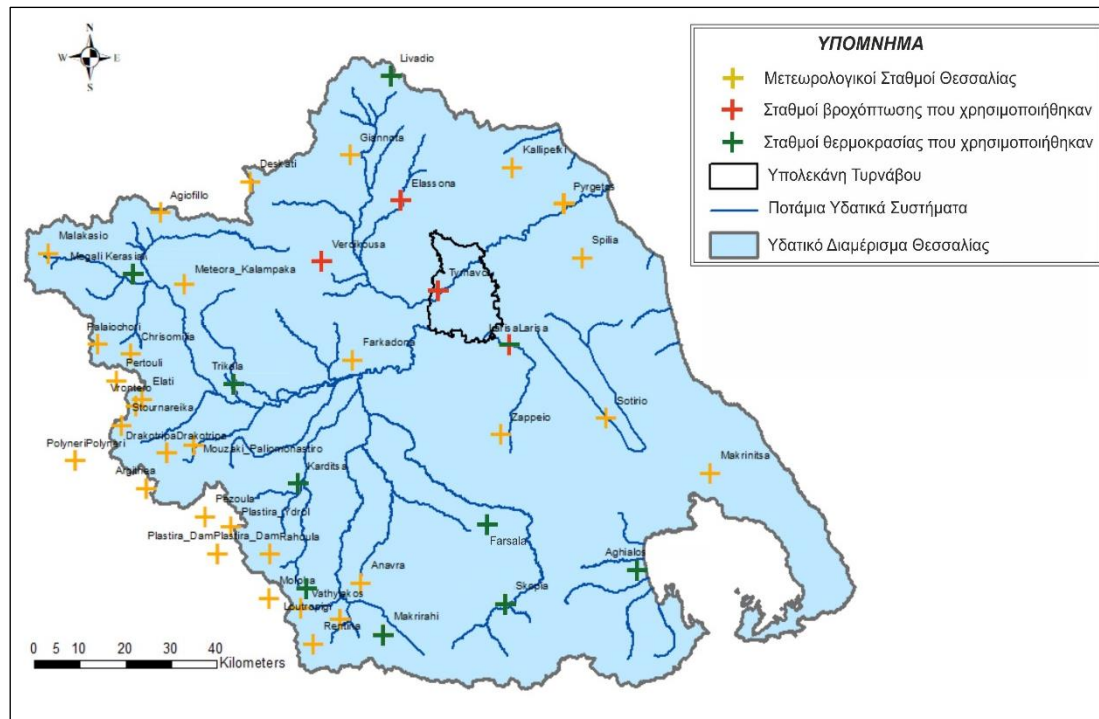
i) Τέσσερις (4) από αυτούς για τη βροχόπτωση (Πίνακας 5.1), ως καταλληλότεροι για την κατανόηση του βροχομετρικού μοντέλου της περιοχής, συμπεριλαμβανομένου και του καρστικού συστήματος, στα δυτικά της υπολεκάνης Τυρνάβου, το οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο στην υδρογεωλογία της περιοχής,

ii) Δέκα (10) από αυτούς για τη θερμοκρασία αέρα (Πίνακας 5.1), που αφορούν όμως δεδομένα έως και το 2001, καθώς πιο πρόσφατα θερμοκρασιακά δεδομένα υπάρχουν διαθέσιμα μόνο από τον μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας.

Τα κριτήρια επιλογής των εν λόγω σταθμών αφορούν στην χωρική και υψομετρική κάλυψη της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Ειδικά για την κατανομή των σταθμών μέτρησης θερμοκρασίας παρατηρείται ιδιαίτερα σημαντική χωρική διασπορά, ακόμα και σε απομακρυσμένες ζώνες από την περιοχή μελέτης, ωστόσο η επιλογή αυτή υπαγορεύτηκε από την ανάγκη κάλυψης των υψομετρικών ζωνών που απαντώνται στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπου απουσιάζουν σχετικά δεδομένα.

Πίνακας 5.1. Στοιχεία επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών.

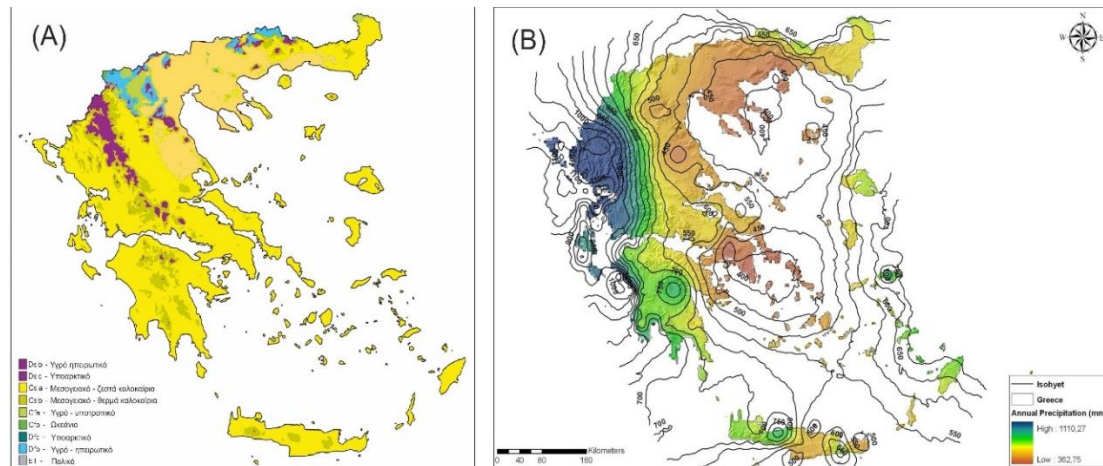
Όνομα Σταθμού	Ιδιοκτησία	Λεκάνη Απορροής	Υψόμετρο	Τύπος Σταθμού	Διαθέσιμα Δεδομένα
Βερδικούσα	ΥΠΕΝ	Πηνειός	914.6	Υδρομετεωρολογικός	Βροχόπτωση
Ελασσώνα	ΥΠΕΝ	Πηνειός	276.3	Υδρομετεωρολογικός	Βροχόπτωση
Λάρισα	ΕΜΥ	Πηνειός	71.3	Υδρομετεωρολογικός	Βροχόπτωση, Θερμοκρασία
Τύρναβος	ΥΠΕΝ	Πηνειός	97.1	Υδρομετεωρολογικός	Βροχόπτωση
Αγχίαλος	ΕΜΥ	Χολόρρεμα	12.4	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία
Καρδίτσα	ΥΠΕΝ	Πηνειός	106.7	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία
Φάρσαλα	ΕΜΥ	Πηνειός	148	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία
Τρίκαλα	ΕΜΥ	Πηνειός	163	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία
Σκοπιά	ΥΠΕΝ	Πηνειός	444.7	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία
Μ. Κερασια	ΥΠΕΝ	Πηνειός	509	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία
Μακρυράχη	ΥΠΕΝ	Πηνειός	577.2	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία
Λουτροπηγή	ΥΠΕΝ	Πηνειός	772.3	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία
Λιβιάδι	ΥΠΕΝ	Πηνειός	1181.3	Υδρομετεωρολογικός	Θερμοκρασία



Εικόνα 5.1. Διαθέσιμοι και επιλεγμένοι μετεωρολογικοί σταθμοί Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας.

5.2.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα μετεωρολογικά – κλιματικά στοιχεία μιας περιοχής αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες που διαμορφώνουν τον υδρολογικό κύκλο και συνεπώς, το υδρολογικό της ισοζύγιο. Η περιοχή έρευνας, όπως το σύνολο της επικράτειας, χαρακτηρίζεται από Μεσογειακό κλίμα, με δροσερούς και υγρούς χειμώνες καθώς και ζεστά και ξηρά καλοκαίρια (σύμφωνα με την κλιματική ταξινόμηση Korpen-Geiger (Korpen 1936, Korpen & Geiger 1968), Εικόνα 5.2A). Ωστόσο, λόγω της ιδιαίτερης γεωμορφολογικής δομής της χώρας που ελέγχεται και διαμορφώνεται από τον έντονο τεκτονισμό, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, η Ελλάδα διακρίνεται από ένα αξιοσημείωτο εύρος μικροκλιμάτων και τοπικών παραλλαγών. Στην ευρύτερη περιοχή, η οροσειρά της Πίνδου με βορειοδυτική-νοτιοανατολική διεύθυνση, αποτελεί εμπόδιο στα κλιματικά φαινόμενα που εξελίσσονται από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το δυτικό τμήμα της χώρας να δέχεται βροχοπτώσεις που φθάνουν τα 1,200mm ετησίως στα χαμηλά υψόμετρα, ενώ προς τα ανατολικά, όπου βρίσκεται και η περιοχή έρευνας, οι βροχοπτώσεις μειώνονται κατά τα 2/3 ή ακόμη περισσότερο από το ποσό αυτό (Εικόνα 5.2B).



Εικόνα 5.2. (Α) Κλίμα της Ελλάδας σύμφωνα με την κλιματική ταξινόμηση Κέππεν-Γκάιγκερ (Korpen 1936, Korpen & Geiger 1968) και (Β) Υετόγραμμα Ελλάδας (Ε.Μ.Υ. 1971-2000).

Το καλοκαίρι τα μελέμια, που είναι συνεχείς βορειοδυτικοί άνεμοι, ελέγχουν το κλίμα της περιοχής. Ξεκινούν στα μέσα Μαΐου και διαρκούν μέχρι και τα μέσα Σεπτεμβρίου. Το χειμώνα, οι διευθύνσεις των ανέμων είναι μεταβλητές, με εξαίρεση τον Σιρόκο (Sirocco), ο οποίος είναι νοτιο-νοτιοανατολικός άνεμος, που πνέει κατά τη διάρκεια του ψυχρότερου μισού του έτους φτάνοντας στη μέγιστη έντασή του την άνοιξη. Το μεγαλύτερο μέρος της βροχής πέφτει κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Οι χιονοπτώσεις δεν είναι σπάνιες, εκδηλώνονται μεταξύ Δεκεμβρίου και Μαρτίου και επικεντρώνονται κυρίως στις ορεινές περιοχές. Από δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών της Κεντρικής Ελλάδας προκύπτει ότι η εμφάνιση βροχόπτωσης είναι περίπου 95 ημέρες το χρόνο ενώ η εμφάνιση της χιονόπτωσης είναι περίπου 6 ημέρες ετησίως (Biel 1944, Ραπαγορούλιος 1996). Η ταχύτητα ανέμου στην περιοχή είναι χαμηλή, κυμαινόμενη από 0 έως 1 m/sec (Καρυώτης 1995).

Άλλα μετεωρολογικά μεγέθη της περιοχής έρευνας, όπως αυτά προκύπτουν από τις χρονοσειρές (1955-2001) των δεδομένων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2012) (ΥΠΕΝ, πρώην ΥΠΕΚΑ) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2, ως μέσες τιμές:

Πίνακας 5.2. Μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής έρευνας (1955-2001).

	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
Μέση μηνιαία θερμοκρασία 24 ώρου [°C]	5.2	6.8	9.5	14.0	19.7	25.2	27.3	26.3	21.9	16.3	10.9	6.5
Μέση μηνιαία θερμοκρασία κατά την διάρκεια της ημέρας [°C]*	6.6	8.4	11.1	15.7	21.5	27.0	29.1	28.2	23.9	18.1	12.4	7.9
Μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία [°C]	9.8	12.1	14.9	19.8	25.8	31.1	33.2	32.7	28.5	22.3	15.9	11.0
Μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία [°C]	0.7	1.3	3.3	6.3	11.0	15.3	17.8	17.4	14.1	10.0	5.8	1.9
Μέση απόλυτως μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία [°C]	17.3	19.5	22.5	26.0	33.0	37.8	39.6	38.3	34.7	29.5	22.6	18.2
Μέση απόλυτως ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία [°C]	-6.7	-5.5	-3.3	0.2	4.9	10.0	13.3	12.9	8.5	3.4	-2.1	-5.0
Μέση μηνιαία σχετική υγρασία [%]	79.8	75.0	72.6	68.1	61.3	48.8	46.3	49.9	58.7	69.8	79.2	82.0
Μέση ταχύτητα του ανέμου [m/s]	1.2	1.5	1.7	1.6	1.6	2.0	2.1	1.9	1.7	1.4	1.0	0.9

	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m ² .mo)]	55.1	71.4	112.1	151.1	190.9	210.8	215.8	194.3	145.9	97.8	61.2	47.8
Μέση θερμοκρασία δικτύου νερού (°C)**	10.0	9.4	10.8	14.1	16.7	20.2	22.7	24.7	23.8	21.2	16.7	14.0
Κλιματικά Στοιχεία των δυσμενέστερων μηνών Χειμώνα - Θέρος												
	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ					ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ				
Απόλυτη Ελάχιστη [°C]	-21.6	-10.5					11.0	10.0				
Μέση Ελάχιστη [°C]	0.7	1.3					17.8	17.4				
Μέση Μέγιστη [°C]	9.8	12.1					33.2	32.7				
Απόλυτη Μέγιστη [°C]	22.8	25.2					45.4	45.0				
Επικρατούσα Δ/νση Ανέμου	B	A					A	A				
Ένταση Ανέμου (Beaufort)	0.8	1.1					1.6	1.5				
Διάρκεια Ηλιοφάνειας (ώρες/μήνα)	114.6	121.7					337.1	319.7				
Μέση Νέφωση (σε Όγδοα)***	4.9	4.7					2.0	1.9				
Ύψος Υετού (mm/μήνα)	32.7	33.4					18.7	15.7				

* μέση θερμοκρασία για την περίοδο ηλιοφάνειας της ημέρας

** σύμφωνα με ΕΛΟΤ 1291. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία νερού δικτύου θεωρείται ίση με την θερμοκρασία εδάφους σε βάθος 0.5 m

*** Η νέφωση εκφράζεται, διεθνώς, σε όγδοα καλυμμένου ουρανού. Νέφωση (0) δηλώνει: ουρανός τελείως ακάλυπτος από νέφη. Νέφωση 8/8 δηλώνει: ουρανός τελείως καλυμμένος από νέφη (νεφοσκεπής)

Με βάση τον Πίνακα 5.2 μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συνοπτικά συμπεράσματα για την περιοχή έρευνας, βασιζόμενοι πάντα στα στοιχεία του ΥΠΕΝ (μετεωρολογικός σταθμός της Λάρισας):

- η περιοχή έρευνας, με βάση τις μέσες μηνιαίες παρατηρήσεις παρουσιάζει ετήσια θερμοκρασιακή διακύμανση 24ώρου 22.1°C, ενώ παρόμοια είναι και η αντίστοιχη διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας (22.5 °C),
- η ετήσια θερμοκρασιακή διακύμανση των μέσων μέγιστων μηνιαίων τιμών είναι 23.4°C και είναι παρόμοια με την ετήσια θερμοκρασιακή διακύμανση των μέσων απολύτως μέγιστων μηνιαίων τιμών (22.3°C). Οι αντίστοιχες διακυμάνσεις των μέσων ελάχιστων και των μέσων απολύτως ελάχιστων μηνιαίων τιμών, παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τους, 17.1 και 20°C αντίστοιχα,
- παρατηρείται η έντονη διαφοροποίηση της σχετικής υγρασίας το χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι, χαρακτηριστικό του Μεσογειακού κλίματος στο οποίο ανήκει η περιοχή,
- η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει σχεδόν διπλάσιες τιμές το καλοκαίρι έναντι του χειμώνα,
- η διάρκεια της μηνιαίας ηλιοφάνειας τους καλοκαιρινούς μήνες τριπλασιάζεται σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες, ενώ το ύψος υετού υποδιπλασιάζεται (σύγκριση δυσμενέστερων μηνών).

5.2.1.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Η βροχόπτωση αποτελεί βασικό στοιχείο του υδρολογικού κύκλου και αφορά, την ποσότητα του νερού που πέφτει από τα σύννεφα προς τη γη είτε σε υγρή (βροχή), είτε σε στερεή (χιόνι, πάγος) μορφή. Η συνολική ποσότητα από βροχή, χιόνι και χαλάζι αποτελούν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (Μπαλαφούτης 2003).

Την πιο κοινή μορφή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων αποτελεί η βροχή, η ετήσια πορεία της οποίας στην περιοχή έρευνας ακολουθεί το Μεσογειακό τύπο. Σύμφωνα με τον τύπο αυτό, το μέγιστο και το ελάχιστο ύψος βροχής σημειώνονται το χειμώνα και το καλοκαίρι αντίστοιχα (Φλόκας 1994).

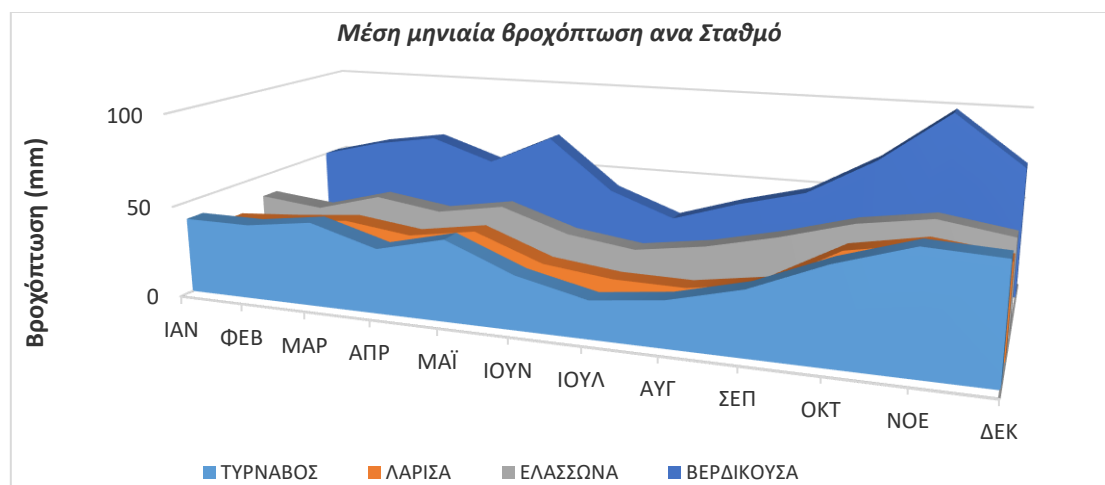
Αν και η αλλουβιακή υπολεκάνη του Τυρνάβου καλύπτεται επαρκώς από τους δύο μετεωρολογικούς σταθμούς της Λάρισας και του Τυρνάβου, όσον αφορά τα βροχομετρικά δεδομένα, ωστόσο μελετήθηκε ένα ευρύτερο υδρολογικό δίκτυο αποτελούμενο από 4 σταθμούς, προκειμένου να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα για την κατανομή των βροχοπτώσεων στην ευρύτερη περιοχή και το καρστ, το οποίο αποτελεί τον βασικό τροφοδότη του αλλουβιακού συστήματος. Η ανάγκη αυτή προκύπτει όχι μόνο από την έκταση της περιοχής του καρστικού συστήματος, αλλά και από το υψομετρικό εύρος που χαρακτηρίζει το ανάγλυφό του. Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι δύο εντός της περιοχής έρευνας, Λάρισας και Τυρνάβου, καθώς και οι Βερδικούσα, και Ελασσώνα, οι οποίοι και διαθέτουν πλήρη χρονοσειρά δεδομένων από το 1981 έως και το 2018. Οι αναλυτικές χρονοσειρές των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών για κάθε σταθμό παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1, ενώ στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μέσων μηνιαίων βροχοπτώσεων για κάθε επιλεγμένο σταθμό, από τον οποίο προκύπτει και το Διάγραμμα 5.1 με τη γραφική απεικόνιση των τιμών του.

Πίνακας 5.3. Μέσες τιμές των μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (1981-2018) για κάθε έναν από τους 4 επιλεγμένους σταθμούς.

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
ΤΥΡΝΑΒΟΣ	40.9	40.7	45.5	35.0	43.6	28.7	20.2	24.6	34.1	50.1	62.1	60.3
ΛΑΡΙΣΑ	32.3	34.7	38.0	33.3	38.9	25.1	20.7	20.2	26.1	47.1	54.0	49.4
ΕΛΑΣΣΩΝΑ	37.8	33.9	43.5	38.2	44.2	32.1	27.0	32.5	41.1	51.7	57.5	51.7
ΒΕΡΔΙΚΟΥΣΑ	50.3	59.4	65.1	53.1	69.9	41.0	27.4	39.2	48.9	70.3	98.8	71.4
Μ.Ο	40.3	42.2	48.0	39.9	49.2	31.7	23.8	29.1	37.6	54.8	68.1	58.2

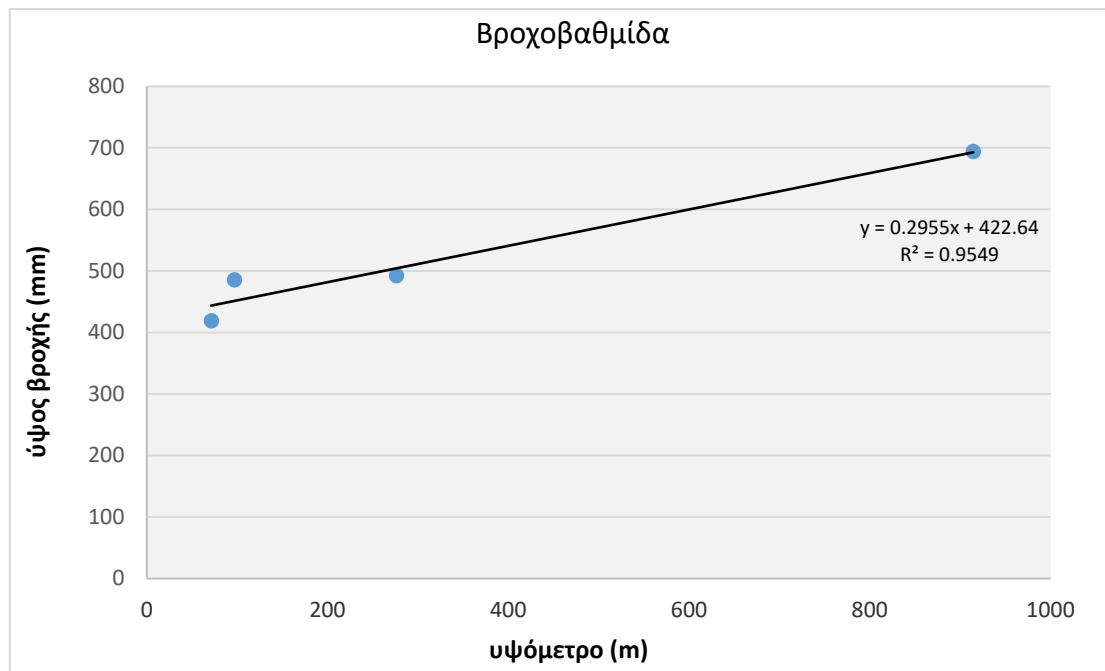
Οι πιο ξηροί μήνες, λαμβάνοντας υπόψη ότι μεταξύ των επιλεγμένων σταθμών είναι και κάποιοι με μεγάλα σε σχέση με την περιοχή υψόμετρα, είναι ο Ιούλιος, ο Αύγουστος και ο Σεπτέμβριος, ενώ το μέγιστο ποσοστό της βροχόπτωσης παρατηρείται το μήνα Νοέμβριο. Παρότι τα κατακρημνίσματα παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές τους κατά την περίοδο των εντατικών αρδεύσεων, οι τιμές τους δεν

είναι αμελητέες και επομένως συνεισφέρουν στην κάλυψη μικρού μέρους των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών.



Διάγραμμα 5.1. Γραφική απεικόνιση των μέσων τιμών των μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης για κάθε έναν από τους επιλεγμένους σταθμούς.

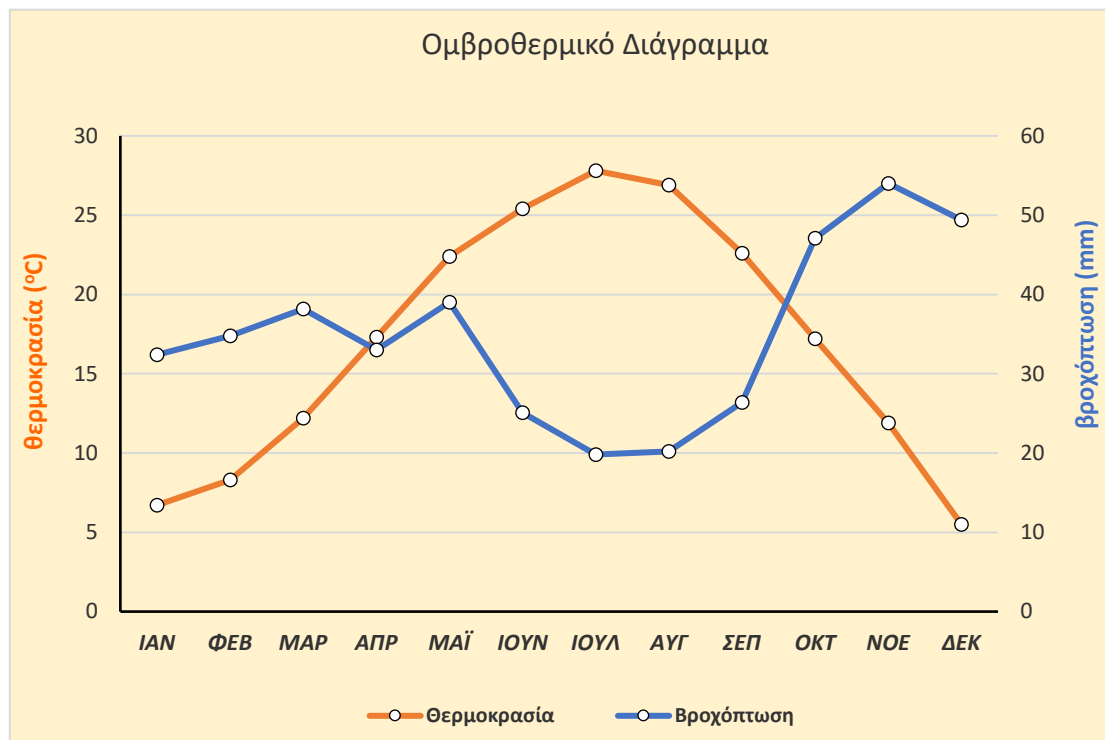
Από την επεξεργασία των χρονοσειρών των επιλεγμένων αυτών σταθμών (1981-2018), χρησιμοποιώντας το μέσο όρο των ετήσιων κατακρημνισμάτων σε σχέση με το απόλυτο υψόμετρό τους, προκύπτει η εξίσωση της βροχοβαθμίδας ($y = 0.29x + 422.5$) για την ευρύτερη περιοχή (Διάγραμμα 5.2). Λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή συσχέτισης ($R^2 = 0.95$) του Διαγράμματος 5.2, προκύπτει ότι η εξίσωση αυτή αποδίδει σε ικανοποιητικό βαθμό την κύμανση του ύψους βροχόπτωσης με τη μεταβολή του απόλυτου υψομέτρου, καλύπτοντας το εύρος υψομέτρων τόσο της κύριας όσο και της ευρύτερης περιοχής έρευνας (καρστικό σύστημα).



Διάγραμμα 5.2. Διάγραμμα βροχοβαθμίδας βασισμένη στη σχέση ύψους κατακρημνισμάτων και απόλυτου υψομέτρου για την ευρύτερη περιοχή έρευνας.

Ο μετεωρολογικός σταθμός της Λάρισας είναι αυτός που έχει τα περισσότερα και πιο πλήρη μετεωρολογικά δεδομένα και ταυτόχρονα βρίσκεται στο νοτιοδυτικό όριο της στενής περιοχής έρευνας. Θεωρώντας αυτό το σταθμό ως αντιπροσωπευτικό για την περιοχή υπολογίστηκε στη συνέχεια ο μέσος όρος των μέσων μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για τη χρονική περίοδο 1981-2018. Με βάση τους προαναφερόμενους μέσους όρους, προέκυψε το ομβροθερμικό διάγραμμα (Διάγραμμα 5.3), το οποίο αποτυπώνει τα κύρια στοιχεία που διαμορφώνουν το κλίμα της περιοχής έρευνας.

Με βάση το ομβροθερμικό διάγραμμα προκύπτει ότι η υγρή περίοδος διαρκεί από τα μέσα Σεπτεμβρίου έως τις αρχές Απριλίου, με το μέσο ύψος υετού να κυμαίνεται μεταξύ 32 και 57mm. Αντίστοιχα, η έναρξη της ξηρής περιόδου σηματοδοτείται από τις αρχές Απριλίου, διαρκεί 5.5 μήνες περίπου, έως τα μέσα Σεπτεμβρίου, με μέσο ύψος βροχόπτωσης στα 27mm περίπου.



Διάγραμμα 5.3. Ομβροθερμικό διάγραμμα βασισμένο στο μέσο όρο των μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης του αντιπροσωπευτικού για την περιοχή μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας (1981-2018).

5.2.1.2 Θερμοκρασία

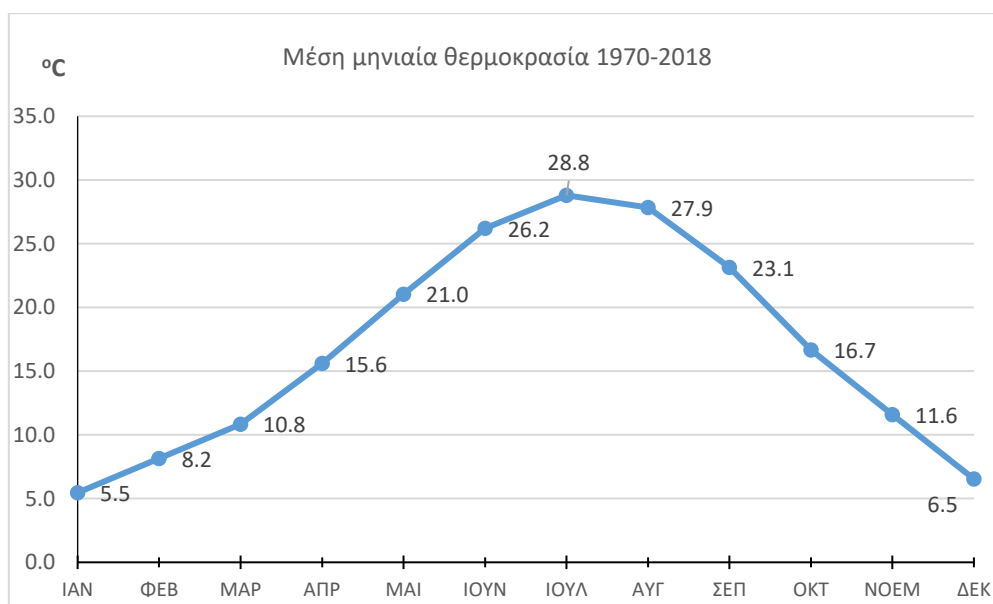
Η θερμοκρασία αποτελεί μια σημαντική κλιματική παράμετρο για κάθε περιοχή, καθώς επηρεάζει ουσιαστικά τη διαμόρφωση του υδρολογικού ισοζυγίου. Από τη θερμοκρασία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η εξατμισοδιαπνοή, σε συνδυασμό με την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου. Η ημερήσια κύμανση της θερμοκρασίας αέρα μιας κανονικής ημέρας (χωρίς σύννεφα και με νημεμία) ακολουθεί, κατά κανόνα, την αντίστοιχη κύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όσον αφορά την ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας παρουσιάζει συνήθως απλή κύμανση. Οι μέγιστες τιμές σημειώνονται τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιο-Αύγουστο και οι ελάχιστες τους χειμερινούς Ιανουάριο-Φεβρουάριο (Φλόκας 1994, Χαμπίδη 2012).

Για την περιοχή έρευνας αξιοποιήσιμα δεδομένα (χρονοσειρά έως και το 2018) αναφορικά με τη θερμοκρασία αέρα, προέρχονται μόνο από τον αντιπροσωπευτικό μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας. Στο Παράρτημα 1 φαίνεται αναλυτικά ο πίνακας με τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες από το 1970 μέχρι και το 2018 (ΕΜΥ, http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city), βάσει των οποίων προκύπτει το διάγραμμα με τον μέσο όρο των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών για το διάστημα αυτό (Διάγραμμα 5.4).

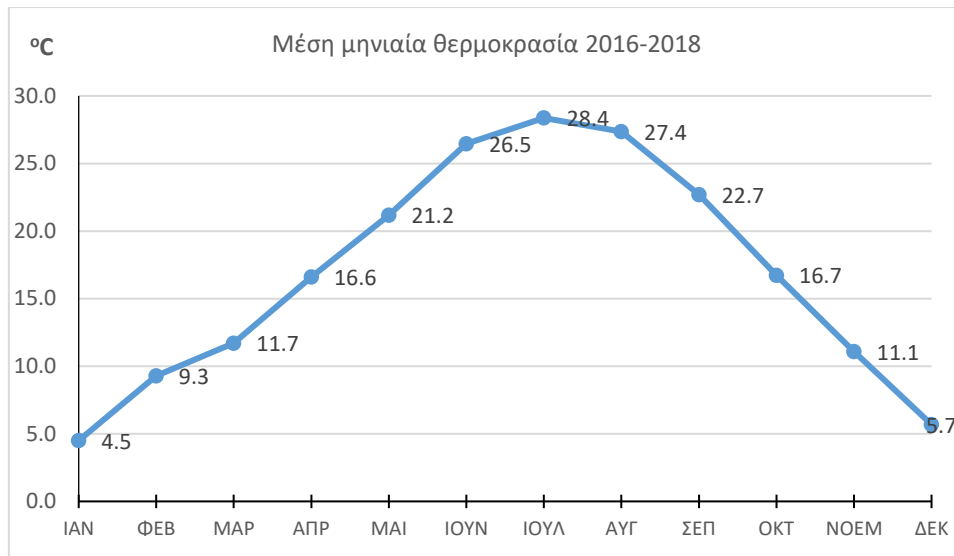
Οι υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως είναι λογικό, παρουσιάζονται τους καλοκαιρινούς μήνες, με μεγαλύτερη τους 28.8 °C για το μήνα Ιούλιο (μέσος όρος μέσων τιμών Ιουλίου) ενώ οι αντίστοιχες χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά τους χειμερινούς μήνες, με μικρότερη στους 5.5 °C για το μήνα Ιανουάριο (μέσος όρος μέσων τιμών Ιανουαρίου).

Συγκρίνοντας την προβολή των τιμών του Διαγράμματος 5.4 με τις τιμές του Διαγράμματος 5.5, στο οποίο φαίνεται ο μέσος όρος των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών για τη χρονική περίοδο των πρωτογενών δεδομένων της παρούσας έρευνας (2016-2018), προκύπτει ότι:

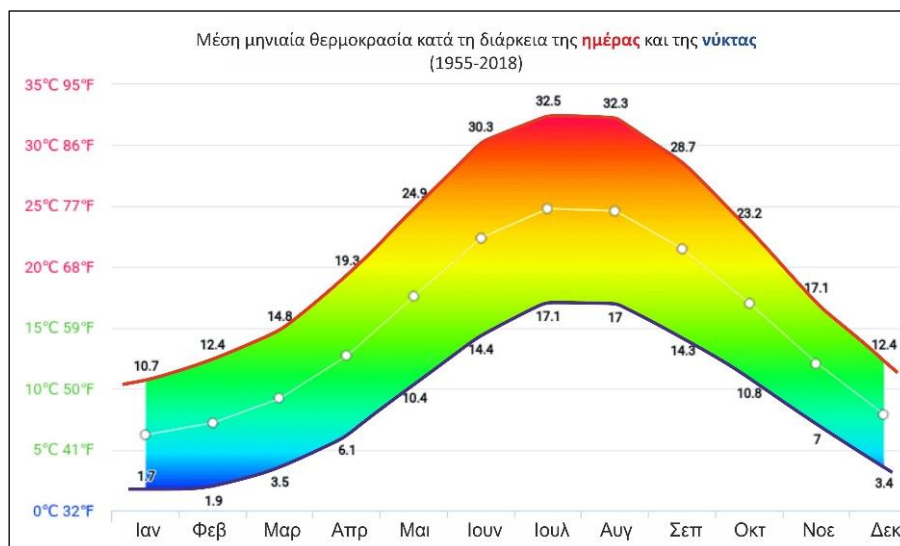
- οι αντίστοιχες καμπύλες παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή και οι αντίστοιχες τιμές δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις,
- η μέγιστη απόκλιση των μέσων τιμών για τους αντίστοιχους μήνες των δύο χρονικών περιόδων είναι 1.1 °C και παρουσιάζεται τον Φεβρουάριο,
- ο θερμότερος μήνας, και στις δύο περιπτώσεις είναι ο Ιούλιος, με τη διαφορά μεταξύ των δύο περιόδων να είναι 0.4 °C,
- ο ψυχρότερος μήνας, και στις δύο περιπτώσεις είναι ο Ιανουάριος, με τη διαφορά μεταξύ των δύο περιόδων να είναι 1.0 °C,
- η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας από μήνα σε μήνα παρουσιάζεται κατά τους μήνες Σεπτέμβριο – Οκτώβριο και είναι 6.5 °C για τη χρονική περίοδο 1970-2018 και 6.0 °C για τη χρονική περίοδο 2016-2018.



Διάγραμμα 5.4. Μέση μηνιαία θερμοκρασία για την περιοχή έρευνας (Σταθμός Λάρισας) για τη χρονική περίοδο 1970-2018 (στοιχεία ΕΜΥ).



Διάγραμμα 5.5. Μέση μηνιαία θερμοκρασία για την περιοχή έρευνας (Σταθμός Λάρισας) για τη χρονική περίοδο 2016-2018 (στοιχεία από ΕΜΥ).



Διάγραμμα 5.6. Μέση μηνιαία θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας (κόκκινη γραμμή) και της νύκτας (μπλε γραμμή) για τη χρονική περίοδο 1955-2018 (Πηγή: <http://hikersbay.com/climate-conditions/greece/larissa>).

Στο Διάγραμμα 5.6 απεικονίζεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά τη διάρκεια της νύκτας, για την περιοχή της Λάρισας για τη χρονική περίοδο 1955-2018 (<http://hikersbay.com>). Με βάση τις μέσες τιμές του διαγράμματος αυτού προκύπτει ότι, η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύκτας παρουσιάζεται τον μήνα Ιούνιο (15.9 °C) ενώ η μικρότερη αντίστοιχη διαφορά τους μήνες Ιανουάριο και Δεκέμβριο (9 °C).

Με βάση τις διαθέσιμες χρονοσειρές δεδομένων θερμοκρασίας (1980-2001) από το δίκτυο της ΕΜΥ, για μετεωρολογικούς σταθμούς της Θεσσαλίας, προέκυψε η συσχέτιση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο για την ευρύτερη περιοχή. Ο ρυθμός ελάττωσης της θερμοκρασίας με την αύξηση του υψομέτρου ονομάζεται θερμοβαθμίδα και η εξίσωση που εκφράζει αυτή τη σχέση είναι της μορφής: $y=ax+b$. Τα αναλυτικά δεδομένα θερμοκρασίας των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν για τη χρονική περίοδο 1980-2001, επισυνάπτονται στο Παράρτημα 1 της παρούσης εργασίας. Στον παρακάτω Πίνακα 5.4 φαίνεται ο μέσος όρος των μέσων μηνιαίων τιμών (1980-2001) για κάθε σταθμό, καθώς και το υψόμετρό του, βάσει των οποίων υπολογίστηκε η θερμοβαθμίδα για την ευρύτερη περιοχή. Η εξίσωση που τη χαρακτηρίζει, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5.7, είναι η:

$$y = -0.0039x + 16.581 \quad (5.1)$$

με συντελεστή προσαρμογής $R = 0.9066$, όπου

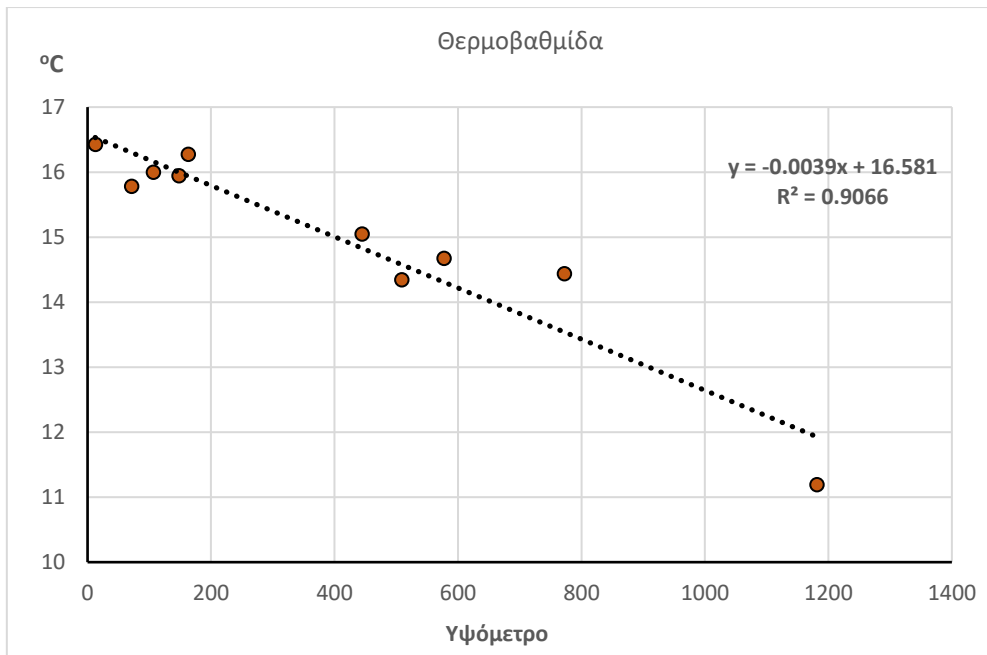
y = η μέση ετήσια θερμοκρασία

x = το απόλυτο υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών.

Όπως προκύπτει από τη Σχέση 5.1, η θερμοκρασία ελαττώνεται κατά 0.39°C ανά 100m υψομετρικής διαφοράς.

Πίνακας 5.4. Μέσος όρος μέσων μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας (1980-2001) και υψόμετρο μετεωρολογικών σταθμών για την εξαγωγή της θερμοβαθμίδας.

	ΑΓΧΙΛΟΣ	ΛΑΡΙΣΑ	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	ΦΑΡΣΑΛΑ	ΤΡΙΚΑΛΑ	ΣΚΟΠΙΑ	Μ.ΚΕΡΑΣΙΑ	ΜΑΚΡΗΡΑΧΗ	ΛΟΥΤΡΟΠΗΓΗ	ΛΙΒΑΔΙ
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	12.4	73.1	106.7	148	163	444.7	509	577.2	772.3	1181.3
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ (mm)	16.43	15.78	16.00	15.94	16.28	15.05	14.34	14.67	14.44	11.19



Διάγραμμα 5.7. Διάγραμμα θερμοβαθμίδας βασισμένη στη σχέση θερμοκρασίας και απόλυτου υψομέτρου για την ευρύτερη περιοχή έρευνας.

5.2.1.3 Σχετική Υγρασία

Η σχετική υγρασία (RH) αποτελεί την πιο κοινή έκφραση της ατμοσφαιρικής υγρασίας και ορίζεται ως, ο λόγος της ποσότητας των υδρατμών που πραγματικά υπάρχουν στον αέρα, σε μια δεδομένη τιμή πίεσης και θερμοκρασίας, προς τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που θα μπορούσε να κατακρατήσει η ίδια αέρια μάζα υπό τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (Μακρογιάννης κ.α. 1993, Μπαλαφούτης 2003):

$$RH = \frac{m_v}{m_{sv}} \quad (5.2)$$

όπου:

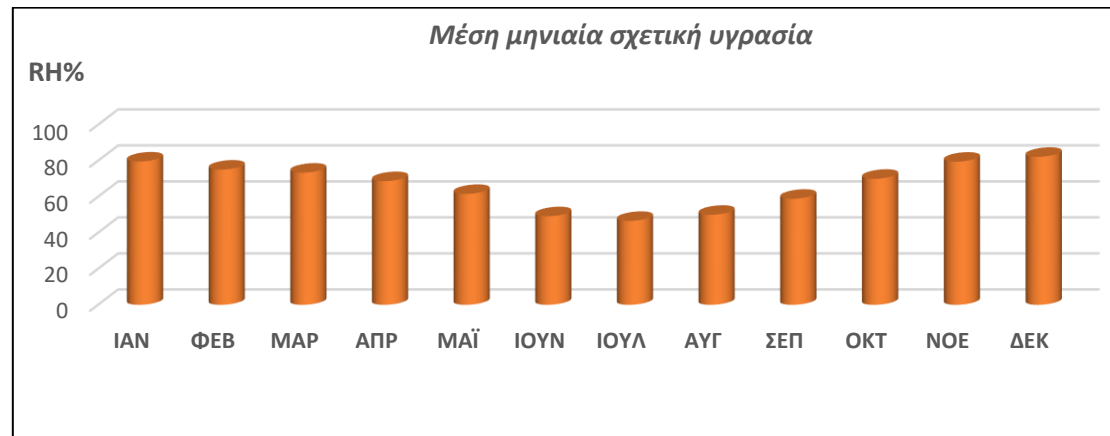
m_v = πραγματική ποσότητα υδρατμών αέριας μάζας

m_{sv} = ποσότητα υδρατμών κορεσμένης αέριας μάζας

Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας ακολουθεί μια αντίστροφη πορεία σε σχέση με την πορεία της θερμοκρασίας του αέρα (σε ένα 24ώρο). Οι μέγιστες τιμές της σχετικής υγρασίας σημειώνονται τις πρωινές ώρες, ενώ οι ελάχιστες τις μεσημβρινές. Σε ετήσια κλίμακα η σχετική υγρασία ακολουθεί απλή κύμανση, διαφέροντας στην ξηρά από ότι στη θάλασσα. Σε χερσαίες εκτάσεις οι μέγιστες τιμές σχετικής υγρασίας παρατηρούνται το χειμώνα και οι ελάχιστες το καλοκαίρι, ενώ το αντίθετο ακριβώς

λαμβάνει χώρα σε θαλάσσιες περιοχές με μικρότερες, ωστόσο, διαφορές μεταξύ χειμώνα και θέρους (Μπαλαφούτης 2003).

Με βάση τα στοιχεία της ΕΜΥ, οι μέσες μηνιαίες τιμές σχετικής υγρασίας για την περιοχή της Λάρισας απεικονίζονται στο ραβδόγραμμα του Διαγράμματος 5.8. Με βάση τα στοιχεία αυτά, ο μήνας με τη χαμηλότερη σχετική υγρασία είναι ο Ιούλιος (46.6%), ενώ ο μήνας με τη μεγαλύτερη σχετική υγρασία είναι ο Δεκέμβριος (82.2%). Μια μέση ετησία τιμή της σχετικής υγρασίας για την περιοχή έρευνας είναι περίπου 66%, βασιζόμενοι πάντα στα ίδια δεδομένα.



Διάγραμμα 5.8. Μέση μηνιαία σχετική υγρασία για την περιοχή έρευνας (ΕΜΥ 1970-2018).

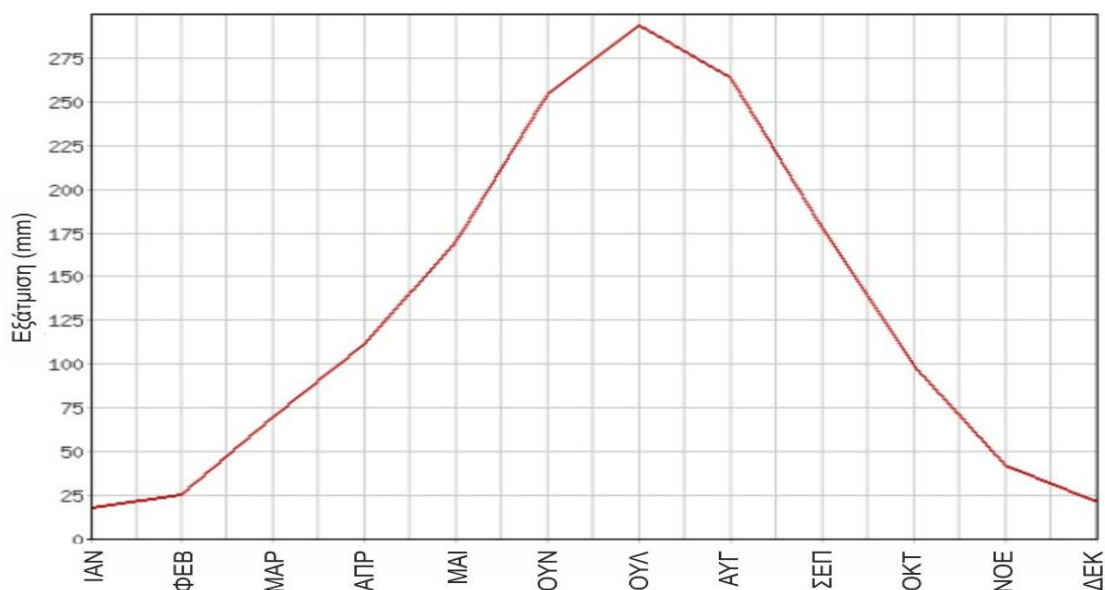
5.2.1.4 Εξάτμιση - Εξατμισοδιαπνοή

Ως *εξάτμιση (E)* ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο τα μόρια ενός σώματος μεταπίπτουν από την υγρή ή τη στερεά φάση, στην αέρια. Η εξάτμιση αποτελεί κύριο συστατικό του υδρολογικού κύκλου και επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων οι οποίοι είναι (Ven Te Chow 1964, Panagorouλος 1995):

- i) η λανθάνουσα θερμότητα, η οποία απαιτείται για την μετατροπή από την υγρή φάση στην αέρια,
- ii) η θερμοκρασία του υγρού και του περιβάλλοντος αέρα,
- iii) η χωρητικότητα του αέρα σε ατμούς,
- iv) η ταχύτητα του ανέμου,
- v) το πρότυπο καιρού (πίεση),
- vi) η φύση της επιφάνειας εξάτμισης,
- vii) η περιεκτικότητα της εδαφικής υγρασίας.

Από τα διαθέσιμα στοιχεία, με τη μορφή συνολικών μηνιαίων τιμών εξάτμισης, από τον σταθμό της Λάρισας για την χρονική περίοδο 1977-2018, προκύπτει ότι η δυνητική εξάτμιση ποικίλει σημαντικά κατά τη διάρκεια του έτους, φτάνοντας στις

υψηλότερες τιμές της τους ξηρούς καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο) και τις χαμηλότερες από τον Δεκέμβριο έως και τον Φεβρουάριο (Διάγραμμα 5.9).



Διάγραμμα 5.9. Μέση μηνιαία δυνητική εξάτμιση για την περιοχή έρευνας (Μετεωρολογικός σταθμός Λάρισας, 1977-2018 (www.emy.gr)).

Ως εξατμισοδιαπνοή (ET) ορίζεται, το μέρος εκείνο των κατακρημνισμάτων που επανέρχεται στην ατμόσφαιρα, είτε από εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους, από τις ελεύθερες επιφάνειες νερού, από το νερό που με μορφή λεπτού υμενίου περικαλύπτει τα φυτά κατά τη βροχή (ή που επικάθεται σε αυτά με μορφή σταγόνων), είτε από τη διαπνοή των φυτών (Σούλιος 1986). Δηλαδή είναι κάθε είδους φυσικές πρωτογενείς απώλειες του νερού των κατακρημνισμάτων από εξάτμιση ή διαπνοή που επανέρχονται άμεσα στην ατμόσφαιρα.

Στη φύση τόσο στην περίπτωση της εξάτμισης όσο και της διαπνοής, αυτές λαμβάνουν χώρα με το μέγιστο δυνατό βαθμό, όταν υπάρχει πλήρης προσφορά νερού, ενώ όταν η προσφορά αυτή είναι περιορισμένη, περιορίζονται και οι δύο αυτές διαδικασίες. Γίνεται φανερό λοιπόν ότι στο φυσικό περιβάλλον μπορούν να διακριθούν δύο περιπτώσεις (Σούλιος 1986):

α) Η κατάσταση εκείνη κατά την οποία υπάρχει στην επιφάνεια και στο υπέδαφος τέτοια προσφορά νερού ώστε να μπορεί τουλάχιστον να αντισταθμίζει συνεχώς την εξατμισοδιαπνοή, οπότε αυτή μπορεί να λάβει τη μέγιστη δυνατή τιμή της για τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Αυτή η οριακή τιμή που μπορεί να φθάσει η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί την *δυνητική εξατμισοδιαπνοή (ET_p)*. Αποτελεί την οριακή δηλαδή τιμή που θα μπορούσε να φθάσει η εξατμισοδιαπνοή αν η προσφορά νερού κάλυπτε συνεχώς τις απώλειες από εξάτμιση και διαπνοή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στα εύκρατα κλίματα, όπως το κλίμα στον ελληνικό χώρο, συνθήκες δυνητικής

εξατμισοδιαπνοής μπορούν να υπάρχουν μόνο για περιορισμένα χρονικά διαστήματα και σχεδόν ποτέ συνεχώς. Αποτελεί κλιματικό δείκτη μιας περιοχής και δείχνει το όριο που θα μπορούσε να φθάσει η πραγματοποιούμενη διαπνοή κάτω από τις παρούσες κλιματικές συνθήκες αν υπήρχε η απαιτούμενη προσφορά νερού. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εκφράζει κυρίως θερμοκρασιακές συνθήκες.

β) Η πραγματική κατάσταση που επικρατεί, που είναι εναλλαγή μεταξύ της δυνατότητας προσφοράς νερού σε ποσότητα που να αντισταθμίζει την εξατμισοδιαπνοή και της έλλειψης προσφοράς νερού έτσι ώστε να μην αντισταθμίζεται πάντοτε η εξατμιζόμενη ποσότητα. Στην περίπτωση αυτή η πραγματοποιούμενη εξατμισοδιαπνοή είναι η *πραγματική εξατμισοδιαπνοή* (ET_a). Είναι αυτή που πραγματικά λαμβάνει χώρα κάτω από τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες γενικότερα και τις συνθήκες προσφοράς νερού ειδικότερα. Αποτελεί το πραγματικό μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής και αυτό που ενδιαφέρει στη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι πάντοτε μικρότερη της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, για τις κατοικημένες περιοχές της γης, με ελάχιστες ίσως εξαιρέσεις για τις περιοχές όπου η βροχή είναι καθημερινό φαινόμενο.

Εκτός των δύο παραπάνω περιπτώσεων υπάρχουν επίσης και άλλες δύο θεωρητικές τιμές της εξατμισοδιαπνοής. Αυτές είναι: (i) η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o), η οποία ορίζεται ως η εξάτμιση μιας εκτεταμένης επιφάνειας μικρού ύψους πράσινης βλάστησης (π.χ. γρασίδι), που σκιαάζει απόλυτα το έδαφος, ενιαίου ύψους και με πλήρη επάρκεια νερού και συνεπώς αντιπροσωπεύει το μέγιστο της δυνατής απώλειας νερού λόγω εξάτμισης από μια φυτοκαλυμμένη περιοχή (Φλόκας 1994) και (ii) η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c), η οποία είναι η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή που παρατηρείται από μια δυναμικά αναπτυσσόμενη καλλιέργεια κάτω από τυποποιημένες συνθήκες με καλή λίπανση, απαλλαγμένη ασθενειών, εγκατεστημένη σε μεγάλο αγρό και με βέλτιστες συνθήκες εδαφικής υγρασίας και η οποία θα μπορούσε να αποδώσει την μέγιστη παραγωγή, κάτω από συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες. Μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς πολλαπλασιαζόμενη με τον συντελεστή φυτικής καλλιέργειας K_c , δηλαδή $ET_c = K_c \cdot ET_o$. Ο συντελεστής K_c διαφοροποιείται με βάση τα ειδικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και εξαρτάται από το φυτικό είδος, το στάδιο ανάπτυξης, την ταχύτητα του ανέμου στα 2m και την ελάχιστη σχετική υγρασία (RH_{min}), η οποία, όπως ήδη ειπώθηκε, παρατηρείται το μεσημέρι (Φλόκας 1994).

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς υπάρχει ένας αριθμός μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούνται. Η πιστοποίηση της ακρίβειας των εξισώσεων που χρησιμοποιούν οι μέθοδοι αυτές μπορεί να γίνει μόνο με τη συλλογή μετρήσεων των απαραίτητων για την καθεμιά, μετεωρολογικών παραμέτρων, πάνω από μια εκτεταμένη καλλιέργεια αναφοράς και τη χρήση λυσιμέτρων. Σήμερα γίνεται αποδεκτό ότι η εξίσωση FAO Penman-Monteith για χορτοτάπητα, όπως αυτή διαμορφώθηκε από τους Allen et al. 1998 και η αντίστοιχη για χαμηλή καλλιέργεια

αναφοράς ASCE-standardized Penman-Monteith εξίσωση (Allen et al. 2005), αποτελούν τις πιο ακριβείς μεθόδους υπολογισμού της E_T , χορτοτάπητα, έχουν φυσική βάση και συμπεριλαμβάνουν βιολογικές και αεροδυναμικές παραμέτρους (Παπαμιχαήλ & Μπαμπατζιμόπουλος 2015). Όπως ειπώθηκε, η μέθοδος αυτή είναι η πλέον αποδεκτή και ακριβής, ωστόσο λόγω της πολυπλοκότητας της εξίσωσής της αλλά και του μεγάλου αριθμού δεδομένων που απαιτεί η εφαρμογή της, πολλές φορές αναγκαστικά αποφεύγεται. Ιδιαίτερα στον ελληνικό χώρο λόγω των μεγάλων ελλείψεων σε δεδομένα, ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής πραγματοποιείται με πιο απλουστευμένες, άρα και λιγότερο ακριβείς, μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούν λιγότερα και πιο άμεσα διαθέσιμα δεδομένα.

Στην παρούσα έρευνα και με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι (δύο πραγματικής και δύο δυνητικής), έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί διερεύνηση των διαφοροποιήσεων μεταξύ κοινά χρησιμοποιούμενων μεθόδων, αλλά και να αξιολογηθεί η διαφοροποίηση μεταξύ δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Οι εμπειρικοί τύποι αυτοί είναι:

- i) του Thornwaite (Thornwaite 1948, Thornwaite & Mather 1957),
- ii) του Serra (Serra 1954),
- iii) του Turc (Turc 1961) και
- iv) του Coutagne (Coutagne 1954).

i) Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Thornwaite

Η εμπειρική σχέση που διατύπωσε ο Thornwaite (1948), για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής είναι:

$$E_{Tp} = 16 * L_d * \left(10 * \frac{T}{I}\right)^a \quad (5.3)$$

όπου:

E_{Tp} = η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm,

L_d = συντελεστής διόρθωσης με βάση το γεωγραφικό πλάτος στον οποίο υπεισέρχονται τόσο ο αριθμός των ημερών κάθε μήνα όσο και των πραγματικών ωρών μεταξύ ανατολής και δύσης,

T = η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρος για τον μήνα αναφοράς σε °C,

$$a = 6.75 * 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239$$

όπου I ο ετήσιος θερμικός δείκτης που δίνεται από τον τύπο $I = \sum_{i=1}^{12} i$

και i ο μηνιαίος θερμικός δείκτης που δίνεται από τον τύπο $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$

Χρησιμοποιώντας τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες από το σταθμό της Λάρισας, με τα περισσότερα και πιο πρόσφατα δεδομένα θερμοκρασίας (1970-2018) και λαμβάνοντας υπόψη το γεωγραφικό του πλάτος για τον υπολογισμό του L_d (Πίνακας 5.5), υπολογίζεται η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή (Σχέση 5.3) και στη συνέχεια αθροίζοντας τις επιμέρους τιμές προκύπτει η τελική ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή, η οποία είναι $ET_p = 877.4$ mm (Αναλυτικός πίνακας υπολογισμού στο Παράρτημα 1).

Πίνακας 5.5. Εξαγωγή της τιμής του συντελεστή L_d για το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού Λάρισας (39.646), με βάση τις βιβλιογραφικές τιμές αναφοράς για τα γεωγραφικά πλάτη 39° και 40°.

Γεωγραφικό πλάτος	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
39°	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40°	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
39.646°	0.846	0.836	1.03	1.11	1.236	1.246	1.266	1.18	1.04	0.96	0.836	0.816

ii) Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Serra

Ο εμπειρικός τύπος του Serra (1954) για την δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι:

$$ET_p = 270 * e^{0.064444T} \quad (5.4)$$

όπου:

ET_p = η μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm,

T = η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρος σε °C,

Από τη Σχέση 5.4, και με βάση τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες από το μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας προκύπτει η μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή $ET_p = 747.4$ mm (Αναλυτικός πίνακας υπολογισμού στο Παράρτημα 1).

iii) Υπολογισμός πραγματικής εξατμισοδιαπνοής κατά Turc

Για την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, οι συνήθεις εμπειρικοί τύποι που προτάθηκαν περιέχουν και τον παράγοντα των κατακρημνισμάτων (P), τον βασικό παράγοντα που τη ρυθμίζει, σε αντίθεση με τους τύπους της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, οι οποίοι περιέχουν συνήθως τη θερμοκρασία (T). Το γεγονός αυτό δικαιολογείται απόλυτα καθώς στην περίπτωση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, εξ' ορισμού, τα κατακρημνίσματα είναι τόσα ώστε να καλύπτουν συνεχώς τις ανάγκες της εξατμισοδιαπνοής.

Ο τύπος του Turc (1961) είναι:

$$ET_a = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (5.5)$$

όπου:

ET_a = η πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή σε mm

P = το ύψος των ετήσιων κατακρημνισμάτων σε mm

$$L = 300 + 25 * T + 0.05 * T^3$$

T = η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα σε °C

Ο εμπειρικός τύπος του Turc ανταποκρίνεται σε εδάφη με μέση λιθολογική σύσταση και δίνει καλά αποτελέσματα όταν η περιοχή δεν είναι πολύ μικρής ή μεγάλης ηλιοφάνειας και όταν η μέση ετήσια βροχόπτωση ξεπερνά τα 700mm (Σούλιος 1985). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής με βάση τον εμπειρικό τύπο του Turc, με τα αποτελέσματα άμεσων πραγματικών μετρήσεων σε διασκορπισμένες λεκάνες σε όλη την επιφάνεια της γης, προέκυψε ικανοποιητική σύμπτωση μεταξύ τους (Σούλιος 1986).

Εφόσον τα δεδομένα το επιτρέπουν είναι προτιμότερο στη Σχέση 5.5 να χρησιμοποιείται αντί της μέσης θερμοκρασίας (T), η διορθωμένη (T_{cor}) που δίνεται από τον τύπο:

$$T_{cor} = \frac{P_1 * T_1 + P_2 * T_2 + \dots + P_{12} * T_{12}}{P_1 + P_2 + \dots + P_{12}} \quad (5.6)$$

όπου:

P_1, P_2, \dots, P_{12} = τα ύψη των κατακρημνισμάτων σε κάθε έναν από τους μήνες του χρόνου

T_1, T_2, \dots, T_{12} = η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία του αέρα

Χρησιμοποιώντας τις μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας, προκύπτουν με βάση τις Σχέσεις 5.5 και 5.6, οι τιμές για την πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή πριν και μετά τη διόρθωση της θερμοκρασίας (Αναλυτικός πίνακας υπολογισμού στο Παράρτημα 1):

$$ET_a = 396.5 \text{ mm}$$

και

$$ET_{a_{corr}} = 387.1 \text{ mm}$$

iv) Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής κατά Coutagne

Σύμφωνα με τον Coutagne (1954), η πραγματική εξατμισοδιαπνοή δίνεται από τον τύπο:

$$ET_a = P - \lambda * P^2 \quad (5.7)$$

όπου:

ET_a = η πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή σε mm

P = το ύψος των ετήσιων κατακρημνισμάτων σε m και

$\lambda = \frac{1}{0.8+0.14*T}$, όπου T η μέση ετήσια θερμοκρασία σε °C.

Όπως και στην περίπτωση του τύπου του Turc, ο τύπος του Coutagne ανταποκρίνεται καλύτερα σε εδάφη με μέση λιθολογική σύσταση και σε περιοχές ούτε πολύ μικρής ούτε μεγάλης ηλιοφάνειας. Επίσης ο τύπος αυτός δίνει μικρότερα σφάλματα όταν επικρατούν υψηλά ποσοστά κατακρημνισμάτων (Σούλιος 1985).

Η Σχέση 5.7 είναι εφαρμόσιμη για τιμές ετήσιων κατακρημνισμάτων για τις οποίες ισχύει η ακόλουθη ανισότητα:

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{\lambda} \quad (5.8)$$

όπου το P εκφράζεται σε m.

Χρησιμοποιώντας τις μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας, επαληθεύεται η Ανισότητα 5.8, οπότε ο τύπος του Coutagne είναι πρακτικά και θεωρητικά εφαρμόσιμος για την περιοχή έρευνας, θεωρώντας πάντα ότι ο μετεωρολογικός σταθμός της Λάρισας είναι αντιπροσωπευτικός της όλης περιοχής.

Η τιμή για την πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τη Σχέση 5.7 και τις τιμές P και T του προαναφερόμενου μετεωρολογικού σταθμού, είναι (Αναλυτικός πίνακας υπολογισμού στο Παράρτημα 1):

$$ET_a = 356.6 \text{ mm}$$

Συνοψίζοντας, σχετικά με τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής θα μπορούσαν να ειπωθούν τα εξής: ο πιο ασφαλής τρόπος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας γίνεται με άμεσες μεθόδους, οι οποίες απαιτούν πειραματικές μετρήσεις της μεταβολής της εδαφικής υγρασίας. Ωστόσο, υπάρχουν και οι έμμεσες μέθοδοι υπολογισμού, οι οποίες είναι λιγότερο ακριβείς και απαιτούν σε πρώτο στάδιο τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o). Στη συνέχεια, η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ET_o με τον φυτικό συντελεστή (K_c). Και στην περίπτωση των έμμεσων μεθόδων ωστόσο υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων που υπάρχουν και ταυτόχρονα τον σκοπό για τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής. Στο Κεφάλαιο αυτό της παρούσας έρευνας παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, που αναφέρθηκαν παραπάνω και οι οποίοι συνοψίζονται στον Πίνακα 5.6, ως μια παράθεση στοιχείων και ως μια εκτίμηση της τάξης μεγέθους της

εξατμισοδιαπνοής για την περιοχή έρευνας, σύμφωνα πάντα με τα διαθέσιμα δεδομένα. Οι δύο πρώτες μέθοδοι (Thornwaite και Serra) εκτιμούν της δυνητική εξατμισοδιαπνοή, ενώ οι δύο επόμενες (Turc και Coutange) την πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Από τις δύο πρώτες, η μέθοδος Thornwaite φαίνεται να υπερτερεί καθώς συνυπολογίζει και το γεωγραφικό πλάτος έναντι της μεθόδου Serra, η οποία λαμβάνει υπόψη θερμοκρασιακά δεδομένα. Μεταξύ των δύο επόμενων μεθόδων (Turc και Coutange), η μέθοδος Turc έχει το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιεί τη διορθωμένη θερμοκρασία έναντι της μέσης, ενώ η μέθοδος του Coutange έχει και τον περιορισμό εφαρμογής σύμφωνα με τη Σχέση 5.8, αναφορικά με το ύψος των κατακρημνισμάτων.

Ενδεικτικά, λαμβάνοντας υπόψη το μέσο όρο (1970-2018) των ετήσιων κατακρημνισμάτων για το σταθμό της Λάρισας (με βάση τον οποίο προέκυψαν οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής), η πραγματική εξατμισοδιαπνοή αποτελεί το 90% περίπου της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, σύμφωνα με τη μέθοδο του Turc και το 85% περίπου αντίστοιχα, σύμφωνα με τη μέθοδο του Coutange.

Πίνακας 5.6. Σύνοψη διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής για την περιοχή έρευνας.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΕΤ (mm)
Thornwaite	Δυνητική	877.4
Serra	Δυνητική	747.4
Turc	Πραγματική	387.1
Coutange	Πραγματική	356.6

5.3 ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Ως επιφανειακή απορροή ορίζεται το τμήμα εκείνο του νερού των κατακρημνισμάτων, που μόλις πέσει στην επιφάνεια του εδάφους ρέει επιφανειακά και εισέρχεται στο υδρογραφικό σύστημα, από το οποίο απάγεται και οδηγείται τελικά στη θάλασσα (ή σε λίμνη) όπου και εκβάλλει. Στην επιφανειακή απορροή υπάγεται και η *υποδερμική απορροή*, δηλαδή οι μικρές συνήθως ποσότητες νερού που διαπερνούν την επιφάνεια του εδάφους, κινούνται για λίγο στα επιπόλαια τμήματα του εδάφους-υπεδάφους, για να επανέλθουν πάλι στην επιφάνεια και να εισέλθουν στο υδρογραφικό σύστημα, χωρίς να έχουν φθάσει κατά την υπόγεια διαδρομή τους στους υδροφόρους (Σούλιος 1986).

Οι κύριοι παράγοντες που ρυθμίζουν την επιφανειακή απορροή χωρίζονται στους κλιματικούς και τους φυσιογραφικούς. Στους κλιματικούς ανήκουν η βροχόπτωση (ένταση, κατανομή, συνολικό ετήσιο ύψος) και η θερμοκρασία, ενώ στους φυσιογραφικούς ανήκουν η κλίση του εδάφους, η βλάστηση, το υπάρχον

υδρογραφικό δίκτυο και η φύση του εδάφους-υπεδάφους (λιθολογική σύσταση). Ο τελευταίος παράγοντας είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς περατά εδάφη παρουσιάζουν μεγάλη κατείδυση και ως εκ τούτου μικρή επιφανειακή απορροή, ενώ αδιαπέρατα εδάφη ευνοούν την επιφανειακή απορροή έναντι της κατείδυσης.

5.3.1 ΠΗΝΕΙΟΣ ΠΟΤΑΜΟΣ

Ο ποταμός Πηνειός, με μόνιμη ροή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ρέει επιφανειακά διασχίζοντας την δυτική θεσσαλική πεδιάδα πριν εισέλθει στην υπολεκάνη Τυρνάβου. Έχοντας διασχίσει μεγάλο μέρος με χαμηλές κλίσεις, έχει ήδη εναποθέσει τα αδρομερή υλικά του, με αποτέλεσμα στα πρηνή της κοίτης του εντός της περιοχής έρευνας τα ιζήματα να είναι λεπτόκοκκα, αποτελούμενα κυρίως από άμμο και άργιλο. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ιζήματα της κοίτης του, τα οποία δεν ξεπερνούν σε πάχος τα 6m (Danalatos 1993), να παρουσιάζουν πολύ χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Ως εκ τούτου και η όποια υδραυλική επικοινωνία μεταξύ του ποταμού και του ανώτερου υδροφόρου είναι περιορισμένη.

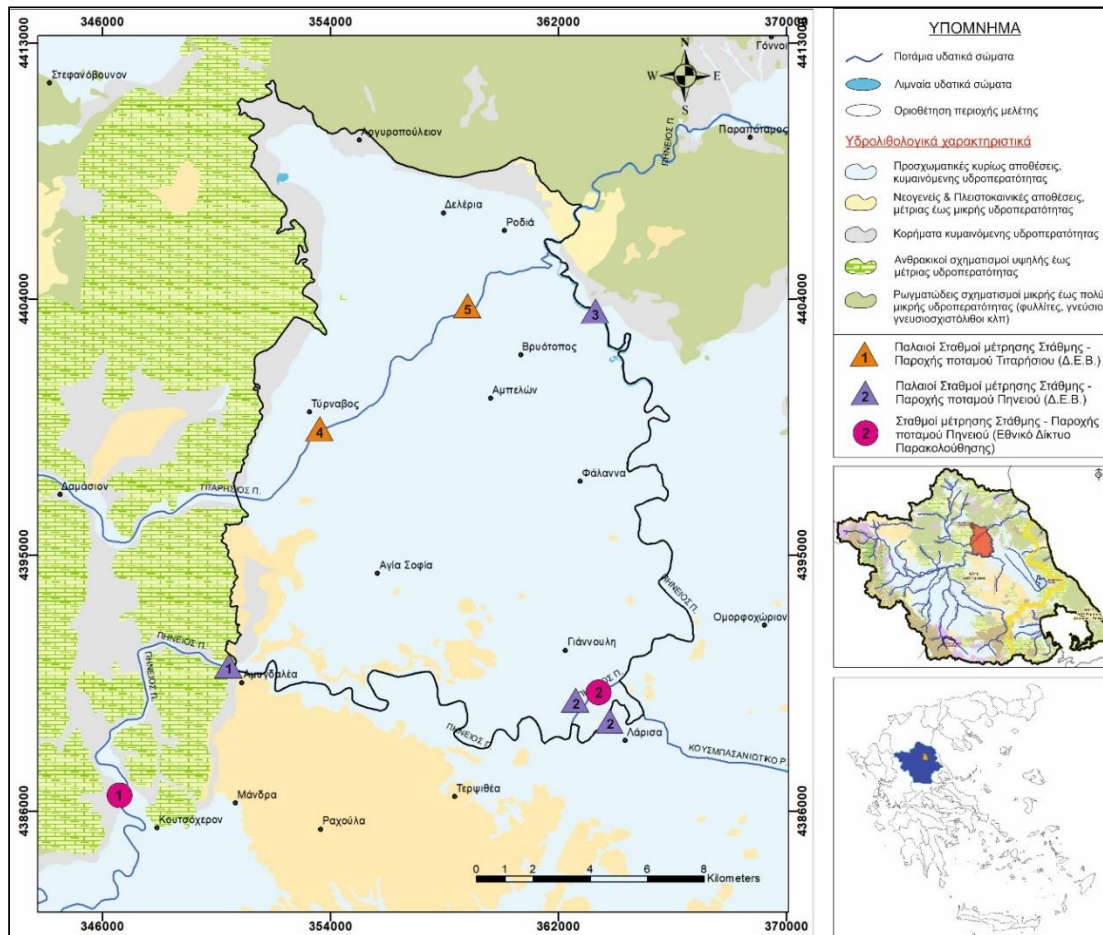
Στο τμήμα του ποταμού Πηνειού εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου υπήρχαν τρεις (3) σταθμοί μέτρησης της στάθμης και της παροχής του. Ο πρώτος εξ' αυτών στην είσοδο του Πηνειού στην υπολεκάνη Τυρνάβου (στενά Καλαμακίου-Αμυγδαλέα), ο δεύτερος στην πόλη της Λάρισας (Αλκαζάρ και Γιάννουλη) και ο τρίτος στην περιοχή της Γυρτώνης, λίγο πριν τη συμβολή του Πηνειού με τον Τιταρήσιο (Εικόνα 5.3). Οι μετρήσεις αυτές διεξάγονταν μία φορά το μήνα από την Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων της Λάρισας από τα τέλη του 1960. Ωστόσο ο ένας από τους τρεις (3) σταθμούς (Γυρτώνη) εγκαταλείφθηκε το 1980. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν και συμπληρώθηκαν (Κουτσογιάννης 1997, Ναλμπάντης & Κουτσογιάννης 1997, Ξανθοπούλου κ.α. 1997). Παρόλη την επεξεργασία και αποσφαλμάτωση των πρωτογενών δεδομένων, η ακρίβειά τους περιορίζεται, ως ένα βαθμό, από διάφορους παράγοντες οι οποίοι και αναφέρονται στη συνέχεια:

1) Όπως αναφέρθηκε, οι μετρήσεις παροχής γίνονταν μία φορά το μήνα λόγω της έλλειψης αυτόματων καταγραφικών οργάνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι μετρήσεις της στάθμης και της ταχύτητας ροής να αντιπροσωπεύουν την απόκριση του συστήματος σε μια συγκεκριμένη στιγμή εντός του μήνα και όχι μια μέση τάση. Συνεπώς, η απόκριση του ποταμού σε ένα παρατεταμένο γεγονός βροχόπτωσης δεν μπορεί να απεικονίζεται στις μετρήσεις, εάν αυτές πραγματοποιήθηκαν λίγο πριν από την εμφάνιση του συμβάντος. Ομοίως, εάν οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά από ένα μεμονωμένο ή ακόμα και τυχαίο γεγονός βροχόπτωσης, που έλαβε χώρα μετά από παρατεταμένη περίοδο ξηρασίας, η απόκριση θα είναι επίσης παραπλανητική. Εκτός από τα παραπάνω, οι μετρήσεις της παροχής στους τρεις (3) σταθμούς δεν γίνονταν πάντοτε την ίδια μέρα του μήνα, κάτι το οποίο συνιστά μια πρόσθετη πιθανή πηγή σφάλματος, καθώς στο χρονικό διάστημα μεταξύ των

μετρήσεων σε γειτονικούς σταθμούς μέτρησης ενδέχεται να σημειώθηκε ένα σημαντικό επεισόδιο βροχόπτωσης.

2) Οι μετρήσεις στάθμης-παροχής πρέπει να γίνονται σε ένα τμήμα του ποταμού, όπου υπάρχει ρυθμιζόμενη ροή και σταθερή διατομή της κοίτης (Shaw 1994, Panagoroulos 1995). Εφόσον οι μετρήσεις της παροχής βασίζονται στη ταχύτητα ροής του ποταμού σε συγκεκριμένη θέση, εάν η διατομή της κοίτης του ποταμού στο σταθμό μέτρησης μεταβληθεί μεταξύ δύο μετρήσεων, τα αποτελέσματα που θα ληφθούν δεν θα είναι άμεσα συγκρίσιμα. Οι διαφορές στις μετρούμενες ταχύτητες δεν θα αντικατοπτρίζουν μόνο τις μεταβολές στη ροή αλλά και θα είναι αποτέλεσμα και της μεταβαλλόμενης διατομής της κοίτης του ποταμού. Τέτοιες μεταβολές στη διατομή της κοίτης του Πηνειού έχουν παρατηρηθεί κατά μήκος του ποταμού, εντός της περιοχής έρευνας και λαμβάνουν χώρα επίσης και στους σταθμούς μέτρησης. Στις περιπτώσεις που δεν υπήρχαν συντελεστές διόρθωσης έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι πιθανές αυτές μεταβολές, οι ληφθείσες μετρήσεις δεν ήταν απόλυτα ακριβείς.

Από τα τέλη του 2013 έως και τον Νοέμβριο του 2015, καθώς και από τον Απρίλιο του 2018 μέχρι και σήμερα, μετρήσεις στάθμης και παροχής, στον ποταμό Πηνειό πραγματοποιούνται από το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων (Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων) του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού «ΔΗΜΗΤΡΑ», στο πλαίσιο του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης της ποιότητας και της ποσότητας των υδάτων της χώρας. Οι σταθμοί μέτρησης που αφορούν άμεσα την παρούσα διατριβή είναι δυο (2), ο πρώτος στη γέφυρα στην περιοχή Κουτσόχερο, λίγο πριν την είσοδο του Πηνειού στην υπολεκάνη Τυρνάβου και ο δεύτερος στην περιοχή της Γιάννουλης στην πόλη της Λάρισας (Εικόνα 5.3). Οι μετρήσεις στους σταθμούς αυτούς, πραγματοποιούνται την ίδια ημέρα με μηνιαία συχνότητα, από εξειδικευμένο συνεργείο. Ως εκ τούτου το πρόβλημα αναφορικά με την αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων, που αναφέρθηκε για την περίπτωση των παλαιότερων μετρήσεων, υφίσταται και σε αυτές τις μετρήσεις, όσον αφορά τη συχνότητα αυτών. Ωστόσο, η διαδικασία μέτρησης της παροχής πλέον, γίνεται αποτυπώνοντας κάθε φορά την υγρή διατομή της κοίτης και μετρώντας την ταχύτητα σε κάθε υπο-τμήμα της κοίτης, που θεωρείται ότι η ταχύτητα μεταβάλλεται. Έτσι, όσο περισσότερες μετρήσεις ταχύτητας καταγράφονται επί της συνολικής κοίτης, τόσο πιο ακριβής είναι ο υπολογισμός της παροχής. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει μια καλύτερη προσέγγιση της παροχής, εξαλείφοντας ουσιαστικά τον δεύτερο περιοριστικό παράγοντα, που αναφέρθηκε προηγουμένως.



Εικόνα 5.3. Σταθμοί μέτρησης στάθμης και παροχής των ποταμών Πηνειού και Τιταρήσιου για την περιοχή έρευνας.

Οι απώλειες μεταφοράς μεταξύ δύο τμημάτων του ποταμού υπολογίζονται από την εξίσωση (Lerner et al. 1990):

$$\Delta Q = Q_{up} - Q_{down} + \sum Q_{in} - \sum Q_{out} - E_{\alpha} - \frac{\delta S}{\delta t} \quad (5.9)$$

όπου:

ΔQ = απώλειες μεταφοράς (m^3/sec)

Q_{up} = Παροχή στο ανάντη τμήμα του ποταμού (m^3/sec)

Q_{down} = Παροχή στο κατόντη τμήμα του ποταμού (m^3/sec)

$\sum Q_{in}$ = Εισροές από παραποτάμους, αστικά λύματα, επιστροφές αρδεύσεων (m^3/sec)

$\sum Q_{out}$ = Εκροές λόγω τροφοδοσίας και αρδεύσεων (m^3/sec)

E_{α} = Εξάτμιση από την επιφάνεια ή από την κοίτη του ποταμού (m^3/sec)

$\frac{\delta S}{\delta t}$ = Μεταβολή των αποθεμάτων στην κοίτη ή την ακόρεστη ζώνη

Λαμβάνοντας υπόψη ότι: (α) δεν υπάρχουν παραπόταμοι μεταξύ των συγκεκριμένων σταθμών μέτρησης και (β) οι εισροές-εκροές προς και από τον Πηνειό, η εξάτμιση και

οι μεταβολές των αποθεμάτων είναι αμελητέες σε σχέση με τις παροχές, η Σχέση 5.9 απλοποιείται σε:

$$\Delta Q = Q_{up} - Q_{down} \quad (5.10)$$

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, διακρίνονται δύο περιπτώσεις, ανάλογα με το πρόσημο των απωλειών μεταφοράς (ΔQ):

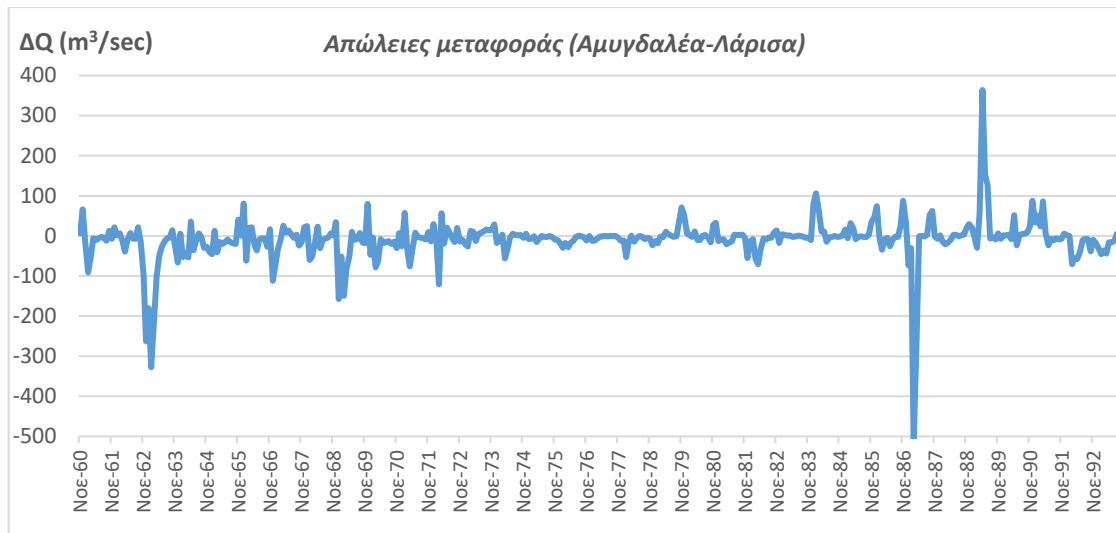
I) στην περίπτωση που το ΔQ είναι θετικό, τότε η παροχή στο ανάντη τμήμα του ποταμού είναι μεγαλύτερη από την παροχή στο κατάντη τμήμα αυτού και ως εκ τούτου το ποτάμι δρα ως τροφοδότης, παροχετεύει δηλαδή νερό προς την ακόρεστη ζώνη, το οποίο φθάνει μετέπειτα στον υδροφόρο. Με τη διαδικασία λοιπόν αυτή το ποτάμι συνεισφέρει στην τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος.

II) στην περίπτωση που το ΔQ είναι αρνητικό, τότε η παροχή στο ανάντη τμήμα του ποταμού είναι μικρότερη από την παροχή στο κατάντη τμήμα αυτού και ως εκ τούτου το ποτάμι λειτουργεί ως δέκτης όγκου νερού, είτε από τις επιστροφές αρδεύσεων, είτε από τη διήθηση νερού της βροχής από την ακόρεστη ζώνη, εκφορτίζοντας με αυτό τον τρόπο μέρος του υδροφόρου συστήματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που αναφέρθηκαν παραπάνω, μελετήθηκαν τα υδρογραφήματα του ποταμού Πηνειού, σε μια προσπάθεια να εξεταστεί η υδραυλική σχέση μεταξύ του ποταμού και του ανώτερου υδροφόρου, καθώς και η εγκυρότητα των υποθέσεων που έγιναν.

Απώλειες μεταφοράς μεταξύ σταθμών μέτρησης Αμυγδαλέας - Λάρισας

Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 5.10 και τα επεξεργασμένα δεδομένα παροχών (Κουτσογιάννης 1997, Ξανθοπούλου κ.α. 1997), υπολογίστηκαν οι απώλειες μετάδοσης μεταξύ των σταθμών μέτρησης 1 (Αμυγδαλέα) και 2 (Λάρισα=Γιάννουλη+Αλκαζάρ). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο γράφημα του Διαγράμματος 5.10.



Διάγραμμα 5.10. Απώλειες μεταφοράς μεταξύ σταθμών Αμυγδαλέας-Λάρισας για τον ποταμό Πηνειό (1960-1993).

Προκειμένου να συσχετισθούν οι παροχές των δύο σταθμών μέτρησης, υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών τους. Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από +1 έως -1, όπου +1 μαρτυρά απόλυτη θετική συσχέτιση των δεδομένων ενώ η τιμή -1 αποδίδει απόλυτη αρνητική συσχέτιση, με την τιμή 0 να δείχνει ότι δεν υπάρχει καμία γραμμική συσχέτιση των δεδομένων. Δίνεται από την εξίσωση:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n (x_n - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_n - \bar{y})^2 \right\}}} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5.11)$$

όπου:

r_{xy} = ο συντελεστής συσχέτισης,

x, y = ζεύγη μεταβλητών (μηνιαίες τιμές παροχής)

\bar{x} = μέση τιμή της x μεταβλητής

\bar{y} = μέση τιμή της y μεταβλητής

n = αριθμός των ζευγών μεταβλητών

$\text{cov}(x, y)$ = συνδιακύμανση των μεταβλητών

σ_x, σ_y = τυπική απόκλιση των μεταβλητών

Ο μέσος συντελεστής συσχέτισης, με βάση τις 395 κοινές καταγραφές των παροχών των δύο σταθμών (1960-1993), υπολογίστηκε με βάση τη Σχέση 5.11, ότι είναι $r = 0.78$.

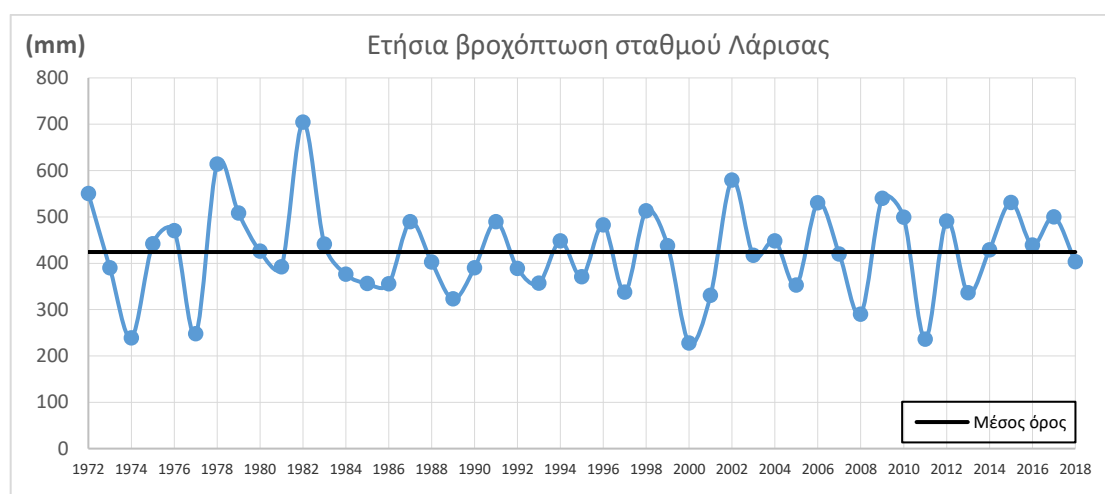
Η τιμή αυτή του συντελεστή είναι ενδεικτική μιας υψηλής συσχέτισης μεταξύ των δύο συνόλων δεδομένων που εξασφαλίζει, με τους περιορισμούς που συζητήθηκαν προηγουμένως, ποιοτικά συμπεράσματα που μπορούν να αντληθούν με ασφάλεια από τη μελέτη των απωλειών μετάδοσης μεταξύ των δύο σταθμών.

Οι παρατηρούμενες τάσεις που εξάγονται από το διάγραμμα είναι οι εξής:

1) Από την αρχή των μετρήσεων έως περίπου και το 1974, επικρατούν οι αρνητικές τιμές του ΔQ και παρατηρούνται επίσης εκτεταμένες περιόδους συνεχόμενων αρνητικών τιμών (π.χ. 01/61 έως 09/61, 10/62 έως 9/63, 01/70 έως 11/70). Οι αρνητικές αυτές τιμές κατά το διάστημα αυτό έχουν μεγάλο εύρος κύμανσης. Η επικράτηση αυτή των εκτεταμένων περιόδων, όπου η παροχή στον ανάντη σταθμό είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή του κατόντη σταθμού ($\Delta Q < 0$), υποδηλώνουν ότι, κατά την περίοδο αυτή (1960-1974), το ποτάμι δρα κυρίως ως αποδέκτης όγκου νερού. Οι μεγαλύτερες αρνητικές τιμές της περιόδου αυτής παρουσιάζονται το χειμώνα και πιθανότατα οφείλονται σε έτη με μεγάλο ύψος κατακρημνισμάτων καθώς, όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 5.10, οι τιμές αυτές δεν είναι μεμονωμένες αλλά έχουν μεγάλο χρονικό εύρος. Αναφορικά με τις θετικές τιμές του ΔQ της περιόδου αυτής, αυτές παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τους κατά κανόνα επίσης κατά τους χειμερινούς μήνες. Στη περίπτωση αυτή, εφόσον πρόκειται και για χειμερινούς μήνες χωρίς αρδεύσεις και με χαμηλές τιμές εξάτμισης, το ποτάμι δρα ως τροφοδότης του συστήματος, καθώς μέρος του όγκου του νερού στα ανάντη μετακινείται προς την ακόρεστη ζώνη και στη συνέχεια προς τον υδροφόρο. Συνολικά, η εικόνα των μέγιστων τιμών υδραυλικής επικοινωνίας κατά τη χειμερινή (υγρή) περίοδο που ελέγχεται από το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και την απορροή του ποταμού, ως κρατούσα κατάσταση αποδίδει σχέση τροφοδοσίας του ποταμού από την ακόρεστη ζώνη του υδροφόρου συστήματος, με περιορισμένης έντασης και έκτασης επεισόδια αντιστροφής της υδραυλικής σχέσης επικοινωνίας. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να συσχετιστεί επομένως τόσο με τον όγκο απορροής, όσο και με την υγρασιακή κατάσταση της ακόρεστης ζώνης του υδροφόρου συστήματος που αναπτύσσεται στην περιοχή. Είναι χαρακτηριστικό ότι σχεδόν σε κάθε ξηρή περίοδο παρατηρείται ανάπτυξη υδραυλικής σχέσης επικοινωνίας εκφόρτισης του Πηνειού προς το σύστημα. Η ένταση και χρονική έκταση του φαινομένου διαφοροποιείται από έτος σε έτος, με μια τάση μείωσης προς το τέλος της εξεταζόμενης περιόδου. Ως γενικό κανόνα λοιπόν, με τις προαναφερθείσες ωστόσο εξάρσεις και εξαιρέσεις, παρατηρείται τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος από τον ποταμό κατά την ξηρή περίοδο, η ένταση της οποίας προοδευτικά αυξάνεται μέχρι την έναρξη της υγρής περιόδου, οπότε και η ροή αναστρέφεται προς τον Πηνειό και προοδευτικά αυξάνεται μέχρι το πέρας της υγρής περιόδου.

2) Από το 1974 έως και το 1984 περίπου, η μορφή του διαγράμματος αλλάζει σε σχέση με αυτή της προηγούμενης περιόδου. Επικρατούν πάλι οι αρνητικές τιμές των

απωλειών μετάδοσης ωστόσο έχουν μικρότερο εύρος κύμανσης και ως εκ τούτου μικρότερες μέγιστες τιμές. Παρουσιάζονται και σε αυτήν την περίπτωση εκτεταμένες περίοδοι συνεχόμενων αρνητικών τιμών. Οι μέγιστες αρνητικές τιμές παρουσιάζονται κατά την άνοιξη και το χειμώνα και ως εκ τούτου πρέπει να οφείλονται κατά κύριο λόγο στη διήθηση του νερού βροχόπτωσης και την εκφόρτιση της ακόρεστης ζώνης στον Πηνειό, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τις παρατηρούμενες βροχοπτώσεις του μετεωρολογικού σταθμού της Λάρισας (Διάγραμμα 5.11), που παρατίθεται ως πλέον αξιόπιστος για την ευρύτερη περιοχή. Όπως προκύπτει, κατά την περίοδο αυτή καταγράφηκαν τα πιο υγρά έτη από τότε που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Τα μεγάλα ετήσια ύψη βροχόπτωσης ευνοούν τις διηθήσεις προς το ποτάμι και δικαιολογούν την αύξηση της παροχής στον κατάντη σταθμό. Οι θετικές τιμές της περιόδου αυτής είναι πολύ μικρές (έως οριακές) εκτός ορισμένων δυο (2) ή τριών (3) περιπτώσεων κατά τους μήνες Νοέμβριο-Δεκέμβριο, προς το τέλος της περιόδου αυτής. Η μείωση της παροχής προς τα κατάντη κατά τους χειμερινούς κυρίως μήνες, υποδηλώνει την έστω και μικρή, τροφοδοσία του ποταμού προς το υδατικό σύστημα. Συνολικά, προκύπτει για την περίοδο αυτή διαφοροποιημένη τάση υδραυλικής επικοινωνίας, με μικρότερες τιμές αυτής αλλά μεγαλύτερη σταθερότητα στην κατεύθυνση ροής (από τον Πηνειό προς το σύστημα), ως αποτέλεσμα κατά πάσα πιθανότητα, των αυξημένων ετήσιων κατακρημνισμάτων, σε σχέση τουλάχιστον με την μεταγενέστερη περίοδο.



Διάγραμμα 5.11. Ετήσια βροχόπτωση μετεωρολογικού σταθμού της Λάρισας (1972-2018).

3) Η τελευταία περίοδος που μπορεί να διαχωρισθεί από το Διάγραμμα 5.10 είναι από το 1985 έως και το 1993. Κατά την περίοδο αυτή τόσο η μορφή όσο και η επικρατούσα τάση έχει διαφοροποιηθεί. Επικρατούν πλέον οι θετικές τιμές των απωλειών μετάδοσης και παρουσιάζεται τόσο η μέγιστη θετική (05/89) όσο και η μέγιστη αρνητική τιμή αυτών (03/87). Η επικράτηση των θετικών τιμών των απωλειών μετάδοσης κατά την περίοδο αυτή, σε σχέση με τις προηγούμενες,

υποδηλώνουν ότι ο Πηνειός πλέον από δέκτης όγκου νερού, κατά κύριο λόγο, μετατρέπεται σε τροφοδότη. Εκτιμάται ότι η παρατηρούμενη αυτή αλλαγή στην υδραυλική επικοινωνία του ποταμού με το υδροφόρο σύστημα οφείλεται στην έναρξη της έντονης εκμετάλλευσης – υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδατικών πόρων, που χρονικά τοποθετείται στην περίοδο αυτή, όπως προκύπτει από την ανάλυση των δεδομένων (βλέπε επόμενο Κεφάλαιο Υδρογεωλογίας). Η εντατικοποίηση των αρδεύσεων, σε συνδυασμό με τις έντονες περιόδους ξηρασίας και μειωμένων επιφανειακών απορροών, οδήγησαν σε υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών πόρων με αποτέλεσμα την έντονη και διαρκή πτώση της στάθμης των υπόγειων υδάτων. Η έντονη αυτή πτώση της στάθμης οδήγησε και στην αντίστοιχη μείωση των υδατικών αποθεμάτων των υδροφόρων. Υπήρχαν ωστόσο οι δίοδοι επικοινωνίας, όπως φαίνεται και από τις προηγούμενες περιόδους, του ποταμού με τον υδροφόρο καθώς υπήρχαν μικρές μεν αλλά υπαρκτές μεταβιβάσεις από τον Πηνειό προς το υδροφόρο σύστημα. Η μεταβολή λοιπόν της υδραυλικής ισορροπίας μεταξύ υδροφόρου συστήματος και Πηνειού εκτιμάται ότι διαμόρφωσε μια νέα κατάσταση τροφοδοσίας της υπόγειας υδροφορίας σε σημαντικής χρονικής έκτασης περιόδους εντός του έτους. Οι μεγαλύτερες θετικές τιμές του ΔQ της περιόδου αυτής, παρουσιάζονται από τον Οκτώβριο έως και τον Μάιο. Πρόκειται ουσιαστικά για τη μη αρδευτική περίοδο, τότε που το σύστημα επανακάμπτει και ο Πηνειός ποταμός συμβάλει σε αυτό έχοντας και τη δυνατότητα λόγω του μεγαλύτερου όγκου νερού, που απορρέει με την έναρξη των βροχοπτώσεων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η μέγιστη αρνητική τιμή, της περιόδου αυτής, καταγράφηκε τον Μάρτιο του 1987. Από την αναλυτική χρονοσειρά των δεδομένων βροχόπτωσης για το σταθμό της Λάρισας (Παράρτημα 1) προκύπτει ότι τον Μάρτιο του 1987 το ύψος των κατακρημνισμάτων έφτασε τα 116.4 mm, γεγονός που συνάδει με την τροφοδοσία του ποταμού, λόγω της διήθησης της βροχόπτωσης και την εμφάνιση πολύ μεγαλύτερης παροχής στον κατάντη σταθμό μέτρησης. Παρότι η κυρίαρχη σχέση επικοινωνίας κατά την περίοδο αυτή είναι από τον Πηνειό προς το υδροφόρο σύστημα, δεν απουσιάζει και η αντίστροφη σχέση (εκφόρτιση υδροφόρου προς τον Πηνειό). Παρότι δεν παρατηρείται συστηματικότητα στις χρονικές περιόδους εμφάνισης των σχέσεων αυτών, διακρίνεται τάση σύνδεσής τους με τις αρδευτικές περιόδους, γεγονός που θα πρέπει να αποδοθεί στην εκφόρτιση των διηθούμενων από την πλεονασματική άρδευση ποσοτήτων νερού δια της ακόρεστης ζώνης στον Πηνειό.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5.12 των απωλειών μεταφοράς για τα πιο πρόσφατα δεδομένα των παροχών, μεταξύ των σταθμών μέτρησης στο Κουτσόχερο και την Λάρισα, τα οποία έχουν προκύψει στο πλαίσιο του έργου λειτουργίας του εθνικού δικτύου παρακολούθησης των υδατικών πόρων της χώρας, και δέον να αναφερθεί ότι για το συγκεκριμένο τμήμα του έργου οι μετρήσεις διενεργούνται από το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων του ΕΛΓΟ, με συμμετοχή του συγγραφέα της

παρούσης διατριβής. Η θέση μέτρησης στο Κουτσόχερο βρίσκεται σε μικρή απόσταση ανάντη της προηγούμενης θέσης στην Αμυγδαλέα (Εικόνα 5.3) και για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο γίνεται η παραδοχή μη ουσιαστικής διαφοροποίησης της μετρούμενης παροχής στις δύο θέσεις, καθώς οι απολήψεις νερού και η υδραυλική σχέση επικοινωνίας μεταξύ του ποταμού και των περιβαλλόντων σχηματισμών θεωρούνται αμελητέες. Υπό τις παραδοχές αυτές οι μετρήσεις απορροής στις δύο προαναφερόμενες θέσεις είναι συγκρίσιμες. Πράγματι, δεν υπάρχουν απολήψεις στο μεσοδιάστημα των δύο σταθμών μέτρησης, ενώ οι πηγές Αμυγδαλέας που εκφόρτιζαν στο παρελθόν στο ύψος της κοίτης του ποταμού, δεν εμφανίζουν ουσιαστική απορροή πλέον.



Διάγραμμα 5.12. Απώλειες μεταφοράς μεταξύ σταθμών Κουτσόχερου-Λάρισας για τον ποταμό Πηνειό (2013-2015 & 2018-2019), Εθνικό δίκτυο παρακολούθησης υδατικών πόρων.

Από την ανάλυση του Διαγράμματος 5.12 προκύπτει ότι η μορφή του συγκρίνεται καλύτερα με την 3^η περίοδο ανάλυσης του Διαγράμματος 5.10, με τις μεγαλύτερες θετικές τιμές να παρουσιάζονται την περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου και Μαρτίου. Θα μπορούσε λοιπόν να ειπωθεί ότι αποτελεί τη χρονική συνέχεια της τελευταίας περιόδου του προηγούμενου διαγράμματος και ως εκ τούτου ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα, ίσως με μια μικρότερη τάση τροφοδοσίας του υδροφόρου συστήματος από τον Πηνειό.

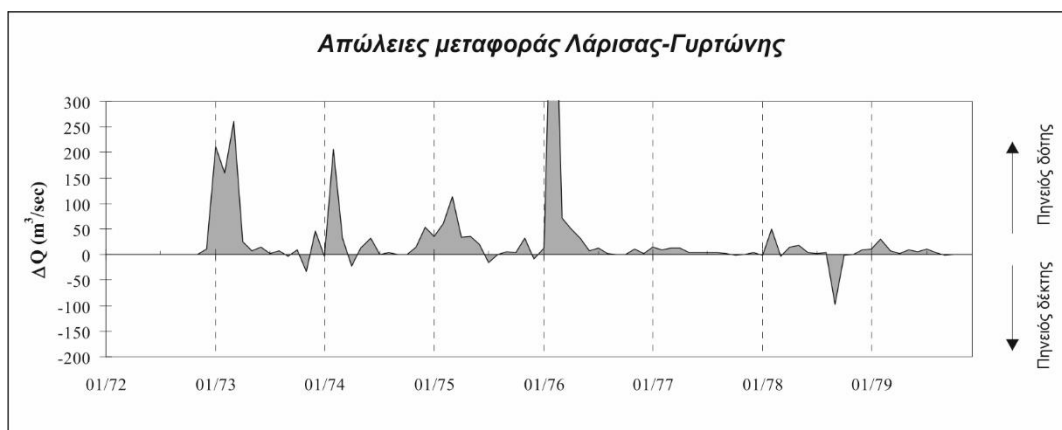
Με βάση τα παραπάνω προκύπτει, ότι γενικά πληρούνται οι αρχικές υποθέσεις που έχουν τεθεί για την εφαρμογή της Σχέσης 5.10. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, οι μετρούμενες παροχές, παρόλες τις βελτιώσεις, δεν είναι απόλυτα ακριβείς και συνεπώς οι υπολογισθείσες απώλειες μετάδοσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ποσοτική ανάλυση. Παρόλα αυτά, η παραπάνω ανάλυση παρέχει μια συνολική ποιοτική ένδειξη της υδραυλικής σχέσης και της τάσης μεταβολής της μεταξύ του ποταμού Πηνειού, της ακόρεστης ζώνης και του υδροφόρου.

Απώλειες μεταφοράς μεταξύ σταθμών μέτρησης Λάρισας - Γυρτώνης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο τρίτος σταθμός μέτρησης της παροχής του Πηνειού που παρακολουθούνταν από την Δ.Ε.Β. του Ν Λάρισας, στην περιοχή της Γυρτώνης, εγκαταλείφθηκε το 1980 (Εικόνα 5.3). Ως εκ τούτου η μελέτη των απωλειών μεταφοράς μεταξύ των σταθμών Λάρισας και Γυρτώνης, περιορίζεται στην οκταετία 1972-1980. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενη έρευνα (Panagoroulos 1995) και στη συνέχεια αναφέρονται επιγραμματικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των τιμών των δύο σταθμών υπολογίστηκε ότι είναι $r=0.53$. Η τιμή αυτή δείχνει ότι η συσχέτιση μεταξύ των δύο σταθμών είναι αρκετά χαμηλή και συνεπώς τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από τη συγκριτική ανάλυση των σχετικών συνόλων δεδομένων, δεν είναι απόλυτα ακριβή.

Με βάση το Διάγραμμα 5.13 προκύπτει ότι κατά μήκος του τμήματος αυτού του Πηνειού, ο ποταμός τροφοδοτεί με νερό την ακόρεστη ζώνη, το οποίο στη συνέχεια φθάνει στον υδροφόρο. Ο ρυθμός διήθησης εντούτοις μειώνεται με το χρόνο, δείχνοντας έτσι μια τάση μείωσης της υδραυλικής αλληλεπίδρασης μεταξύ του ποταμού και της ακόρεστης ζώνης.



Διάγραμμα 5.13. Απώλειες μεταφοράς μεταξύ σταθμών Λάρισας-Γυρτώνης για τον ποταμό Πηνειό (από Panagoroulos 1995).

Με βάση τα πιεζομετρικά δεδομένα της περιοχής για την περίοδο αυτή (βλέπε 7^ο Κεφάλαιο), θα έπρεπε η ροή να συγκλίνει από τον ανώτερο υδροφόρο προς τον ποταμό Πηνειό, κατά μήκος του βορειότερου τμήματος της περιοχής έρευνας, καθώς η επιφάνεια του υδροφόρου βρισκόταν ψηλότερα από την κοίτη του ποταμού. Επομένως, αναμενόταν ο ποταμός να λειτουργεί ως δέκτης και όχι ως τροφοδότης, όπως υποδηλώνουν οι υπολογιζόμενες απώλειες μετάδοσης.

Τα ίδια προβλήματα που συζητήθηκαν στην ανάλυση των απωλειών μετάδοσης μεταξύ των προηγούμενων σταθμών, ισχύουν στην περίπτωση αυτή. Επιπλέον, στην

περίπτωση αυτή, τα αντιφατικά αποτελέσματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, οφείλονται στους εξής περιοριστικούς παράγοντες:

1) Λαμβάνουν χώρα σημαντικές απολήψεις από τον ποταμό Πηνειό κατάντη της πόλης της Λάρισας. Αυτές οι υδροληψίες κάλυπταν μέρος του αρδευτικού σχεδιασμού με επιφανειακά ύδατα και εν μέρει τις οικιακές ανάγκες νερού της πόλης της Λάρισας μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Τα επεξεργασμένα λύματα από τις μικρές βιομηχανικές μονάδες και από τις οικιακές χρήσεις της πόλης της Λάρισας απορρίπτονται στον ποταμό. Ωστόσο, οι όγκοι που απορρίπτονται στον Πηνειό θεωρούνται πολύ μικρότεροι σε σύγκριση με εκείνους που αντλούνται από αυτόν.

Αυτές οι απολήψεις αντικατοπτρίζουν, λανθασμένα, τις υπολογιζόμενες απώλειες μετάδοσης, ως τροφοδοσία προς την ακόρεστη ζώνη. Αλλά και αντίστροφα, ενδεχομένως να καλύπτουν και οποιαδήποτε εκροή νερού από την ακόρεστη ή/και την κορεσμένη ζώνη προς τον Πηνειό, διαφοροποιώντας έτσι πλήρως την υπάρχουσα υδραυλική σχέση μεταξύ του ποταμού και της ακόρεστης-κορεσμένης ζώνης. Εφόσον δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα τόσο για τους όγκους που αντλούνται όσο και για τους όγκους εκφόρτισης, δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια διόρθωση στον υπολογισμό των απωλειών μετάδοσης. Ως εκ τούτου, δεν πληρείται μία από τις αρχικές υποθέσεις που αναφέρθηκαν, έτσι ώστε να ισχύει η Σχέση 5.10, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των απωλειών μετάδοσης.

2) Κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου, η ροή του ποταμού ρυθμίζεται ή τουλάχιστον ρυθμιζόταν κατά το παρελθόν, από μικρά προσωρινά φράγματα κατά την αρδευτική περίοδο, τα οποία περιόριζαν σημαντικά ή και διέκοπταν περιοδικά πλήρως τη ροή προς τα κατάντη. Έτσι, οι υπολογιζόμενες απώλειες μετάδοσης υφίστανται σημαντική αλλοίωση. Σήμερα, οι φραγμοί αυτοί έχουν αντικατασταθεί από τον ρουφράκτη αναρρύθμισης της Γυρτώνης (Εικόνα 5.3).

Από την παραπάνω συζήτηση προκύπτει ότι για το τμήμα αυτό του Πηνειού ποταμού, δεν μπορούν να εξαχθούν ουσιαστικά συμπεράσματα, παρά μόνο να αποτυπωθούν ενδείξεις σχετικά με την αλληλεπίδραση ποταμού-υδροφόρου καθώς εμπλέκονται επιπλέον παράμετροι που τροποποιούν τις υπολογιζόμενες απώλειες μετάδοσης.

5.3.2 ΤΙΤΑΡΗΣΙΟΣ ΠΟΤΑΜΟΣ

Ο ποταμός Τιταρήσιος ή Ξεριάς, όπως υποδηλώνει το όνομά του και έχει ειπωθεί στο Κεφάλαιο 3, εντός της περιοχής έρευνας, έχει παροδική ροή και χειμαρρώδη χαρακτήρα. Πηγάζοντας στα ορεινά, από τις δυτικές κλιτύες του Ολύμπου, παρουσιάζει συνεχή ροή έως ότου ελαχιστοποιηθεί η κλίση του, πριν εισέλθει στην πεδιάδα του Τυρνάβου. Κατά τη διάρκεια της πορείας του εντός της πεδιάδας, παρουσιάζει ροή μόνο κατά τη διάρκεια έντονων επεισοδίων βροχόπτωσης, ενώ η ροή αυτή σπάνια φθάνει κατάντη της πόλη του Τυρνάβου (Εικόνα 5.3). Εισέρχεται

στην υπολεκάνη αμέσως μετά την αλλαγή της κλίσης του και ως εκ τούτου αποθέτει τα αδρομερή υλικά του κατά μήκος της κοίτης του σχηματίζοντας έτσι κώνο κορημάτων μεγάλης σημασίας για την περιοχή έρευνας. Τα αδρομερή αυτά υλικά λόγω της μεγάλης διηθητικότητάς τους απορροφούν άμεσα το νερό της κοίτης και τροφοδοτούν το αλλουβιακό σύστημα της περιοχής, σημαντικό τμήμα του οποίου αποτελούν και αυτά. Η λειτουργία αυτή του Τιταρήσιου αποτελεί έναν βασικό μηχανισμό της υδροδυναμικής λειτουργίας και εξέλιξης του εν λόγω συστήματος, καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο στη δίαιτα των υπόγειων υδάτων και στην διαμόρφωση του υδατικού του ισοζυγίου. Στη συνέχεια της πορείας του ο Τιταρήσιος, αφού διασχίσει τη περιοχή με ΒΑ διεύθυνση, συμβάλει με τον ποταμό Πηνειό στην περιοχή της Ροδιάς.

Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του ποταμού Τιταρήσιου, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δεν υπάρχουν ουσιαστικά δεδομένα μετρήσεων στάθμης και παροχής, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να υπολογισθούν οι απώλειες μεταφοράς, όπως έγινε στην περίπτωση του Πηνειού. Είχαν εγκατασταθεί παλαιότερα δύο σταθμοί μέτρησης, κατά μήκος της πορείας του ποταμού στην πεδιάδα του Τυρνάβου (Εικόνα 5.3), ωστόσο εγκαταλείφθηκαν σύντομα, καθώς οι μετρήσεις ροής ήταν πολύ σπάνιες. Στο πλαίσιο παλαιότερης έρευνας που διεξήχθη στη δεκαετία του 1960, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διαπερατότητας κατά μήκος του ποταμού (Electrowatt Engineering Services 1967). Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών έδειξαν ότι, η υδραυλική αγωγιμότητα στην κοίτη του ποικίλει σημαντικά από $K = 5.0 \cdot 10^{-2} \text{ m/sec}$ ($= 4,320 \text{ m/day}$) στα ανάντη στον κώνο κορημάτων, έως $K = 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec}$ ($= 86.4 \text{ m/day}$) κατάντη στο βόρειο τμήμα του ποταμού. Αν και η μείωση των εκτιμώμενων τιμών είναι δραστική, από τον κώνο προς τα κατάντη, ακόμη και η μικρότερη από αυτές τις τιμές θεωρείται αρκετά υψηλή, προσδίδοντας έτσι αντίστοιχα και υψηλές τιμές διαπερατότητας. Στα ανάντη, η κοίτη του Τιταρήσιου βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του υδροφόρου, γεγονός που δικαιολογεί την διήθηση από τον ποταμό προς την ακόρεστη και τελικά την κορεσμένη ζώνη. Μεταβαίνοντας προς τα κατάντη, προς το βόρειο τμήμα της πεδιάδας του Τυρνάβου, το υψόμετρο της κοίτης του ποταμού μειώνεται πλησιάζοντας έτσι την ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου. Για τον λόγο αυτό ευνοείται η περιστασιακή εκφόρτιση του υδροφόρου προς τον ποταμό.

Η συνεισφορά ωστόσο του Τιταρήσιου στην τροφοδοσία του υδροφόρου μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η στάθμη του υδροφόρου, πάνω από τον οποίο ρέει ο ποταμός Τιταρήσιος πριν από την είσοδό του στη πεδιάδα του Τυρνάβου, μειώνεται, ως αποτέλεσμα της εντατικής εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων. Μειούμενη η στάθμη του υδροφόρου αυξάνονται οι κατακόρυφες υδραυλικές κλίσεις μεταξύ του ποταμού και του υδροφόρου οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερες απώλειες μεταφοράς. Συνεπώς, κατά την είσοδο του Τιταρήσιου στην πεδιάδα του Τυρνάβου, η απορροή

του έχει απομειωθεί και το διαθέσιμο νερό προς διήθηση στον ανώτερο υδροφόρο του εξεταζόμενου συστήματος είναι λιγότερο.

Συμπερασματικά, ο ποταμός Τιταρήσιος βρίσκεται σε ισχυρή υδραυλική σχέση με τον ανώτερο υδροφόρο του συστήματος, τον οποίο τροφοδοτεί κατά τη διάρκεια των έντονων βροχοπτώσεων, δεδομένου ότι υπάρχει ροή στον ποταμό. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, όταν η στάθμη του υδροφόρου ανεβαίνει, ο ποταμός, ενδεχομένως, εκφορτίζει τον υδροφόρο, στα κατάντη, κατά μήκος του βορειότερου τμήματος του ποταμού.

5.4 ΑΛΛΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΩΜΑΤΑ

5.4.1 ΚΟΥΣΜΠΑΣΑΝΙΩΤΙΚΟ ΡΕΜΑ

Στο ΝΑ τμήμα της περιοχής έρευνας, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, συμβάλει στον Πηνειό και το Κουσμπασανιώτικο ρέμα. Πηγάζει νότια της Λάρισας και αφού διασχίσει το κεντρικό τμήμα της ανατολικής πεδιάδας της Θεσσαλίας συμβάλει με τον Πηνειό (Εικόνα 5.3). Το Κουσμπασανιώτικο ρέμα αποτελεί ουσιαστικά αρδευτική τάφρο και μετά τη διευθέτησή του καλύπτει μέρος των αρδευτικών αναγκών της γύρω περιοχής.

Το τμήμα του άνω ρου του, πριν τη συμβολή του με τον Πηνειό, έκτασης 27km², ανήκει στις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ), σύμφωνα με την Κοινοπραξία Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Ηπείρου, Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και Θεσσαλίας 2017. Το τελευταίο αυτό τμήμα της λεκάνης απορροής του Κουσμπασανιώτικου ρέματος αποτελείται εξ' ολοκλήρου από πεδινές εκτάσεις, που καλύπτονται επιφανειακά από προσχώσεις ενώ λιμνοποτάμιες αποθέσεις βρίσκονται περιμετρικά και στο κέντρο της λεκάνης. Στο τμήμα αυτό, η κατανομή των χρήσεων γης έχει ως εξής: το 97.7%, αφορά καλλιεργήσιμες εκτάσεις, το 1.5% δασικές εκτάσεις και μόλις από 0.1% βοσκότοπους και αστικές-περιαστικές εκτάσεις. Το υπόλοιπο ποσοστό (0.6%) κατανέμεται σε αδιαπέρατες επιφάνειες και γυμνά εδάφη (Κοινοπραξία Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Ηπείρου, Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και Θεσσαλίας 2017).

5.4.2 ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΙΟΥ

Στο ΒΑ τμήμα της περιοχής έρευνας, περίπου 20 km από την πόλη της Λάρισας (Εικόνα 5.3), βρίσκεται η τεχνητή λίμνη Αργυροπούλιου (Εικόνα 5.4). Αν και αποτελεί επιφανειακή υδάτινη επιφάνεια, η τροφοδοσία της πραγματοποιείται από τις πηγαίες εκφορτίσεις της περιοχής Μάτι Τυρνάβου.



Εικόνα 5.4. Αριστερά: Γενική άποψη τεχνητής λίμνης Αργυροπουλίου (www.yrethe.gr). Δεξιά: Εικόνα της λίμνης δίπλα στην εμφάνιση των πηγών Μάτι Τυρνάβου.

Πρόκειται για εξωποτάμιο ταμιευτήρα και εξαιτίας του γεγονότος ότι στην αρχική θέση όπου κατασκευάστηκε, προϋπήρχε λίμνη προσδιορίστηκε κατ' αρχήν ως ιδιαίτερος τροποποιημένο υδάτινο σώμα. Εμπίπτει στη λεκάνη Πηνειού (EL16) και έχει επιφάνεια 0.49 km², ενώ κατά το παρελθόν η έκτασή της κάλυπτε περίπου 700 στρέμματα. Χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν και μέχρι πρόσφατα συστηματικά ως βασική πηγή τροφοδοσίας της κύριας αρδευτικής διώρυγας του Τ.Ο.Ε.Β. Μάτι Τυρνάβου, αλλά και με απευθείας αντλήσεις για άρδευση των περιμετρικών αυτής αγρών και λόγω της υπεράντλησης των υδάτων της, έχει στειρευσει δύο φορές. Επίσης, υποβαθμίστηκε σημαντικά η ορνιθοπανίδα της, καθώς και η καλλιέργεια της καραβίδας, στην οποία βασιζόταν τμήμα της οικονομίας της περιοχής. Λόγω του νέου φράγματος που έχει κατασκευαστεί (Εικόνα 5.5), διατηρούνται σημαντικές ποσότητες νερού στη λίμνη και έχει παρατηρηθεί ότι άρχισε πάλι να αποτελεί καταφύγιο για διάφορα είδη πουλιών.



Εικόνα 5.5. Θυρόφραγμα Λίμνης Αργυροπουλίου (ampelwnaslarisas.blogspot.com).

6 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Αντικείμενο της υδρογεωλογίας είναι η μελέτη του υπόγειου νερού. Η μελέτη αυτή όμως του υπόγειου νερού δεν θα μπορούσε να είναι ολοκληρωμένη εφόσον δε ληφθούν υπόψη κάποια απαραίτητα στοιχεία της επιφανειακής υδρολογίας και της υδρομετεωρολογίας (Σούλιος 1986). Συνεπακόλουθα η υδρογεωλογία άπτεται των θεμάτων που αφορούν:

- την επιφανειακή υδρολογία κυρίως υπό το πρίσμα της διασύνδεσης επιφανειακού και υπόγειου νερού,
- τον τρόπο αποθήκευσης και κατανομής του υπόγειου νερού και το ρόλο που παίζουν γι' αυτό οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί και οι διάφορες γεωλογικές δομές,
- τους νόμους που διέπουν τις φυσικές κινήσεις του υπόγειου νερού και το ρόλο που παίζουν σε αυτές η γεωλογική σύσταση και η δομή του υπεδάφους,
- τα υδρομαστευτικά έργα και τους νόμους που διέπουν τις υπόγειες ροές προς αυτά αλλά και την τεχνική κατασκευή τους,
- τα αποθέματα του υπόγειου νερού, τις μεταβολές τους και τους τρόπους εκμετάλλευσής τους,
- τις μεταβολές των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του υπόγειου νερού και την προστασία του από τη ρύπανση-μόλυνση
- τις μεθόδους διασκόπησης-αναζήτησης του υπόγειου νερού.

Με τον όρο υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής αναφερόμαστε στις συνθήκες κίνησης (επιφανειακά και υπόγεια) και κατείσδυσης του νερού. Οι συνθήκες αυτές διαμορφώνονται αφενός μεν από την υδρολιθολογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών αφετέρου δε από τη γεωμετρία της επαφής μεταξύ υδροπερατών και αδιαπέρατων στρωμάτων. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών εξαρτάται από τη λιθολογική τους σύσταση, από τη κοκκομετρία τους, τον βαθμό διαγένεσης και το βαθμό τεκτονισμού που έχουν υποστεί κατά τις διάφορες φάσεις σχηματισμού τους (Δημόπουλος 1983, Χαριζόπουλος 2013). Επομένως, όταν πρόκειται (α) για συνεκτικούς σχηματισμούς ή πετρώματα, η υδρολιθολογική τους συμπεριφορά εξαρτάται από τη λιθολογική τους σύσταση και την τεκτονική τους καταπόνηση, (β) για πρόσφατους, κοκκώδεις και χαλαρούς σχηματισμούς, από την κοκκομετρική τους σύσταση και το βαθμό διαγένεσής τους και (γ) στην περίπτωση των ανθρακικών ιζημάτων, από το βαθμό διάβρωσης και ρηγματώσής τους (Λάππας 2018).

6.2 ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Κάθε γεωλογικός σχηματισμός έχει την ικανότητα να μεταβιβάζει ρευστό μέσα από τα διάκενα που υπάρχουν στη μάζα του και ειδικότερα τους πόρους που επικοινωνούν μεταξύ τους. Το σύνολο του όγκου των διακένων προς τον αντίστοιχο όγκο του πετρώματος συνιστά το πορώδες του πετρώματος ή του χαλαρού ιζήματος. Ο συνολικός όγκος των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους προς τον αντίστοιχο όγκο του πετρώματος συνιστά το ενεργό πορώδες. Όταν το πορώδες ενός σχηματισμού οφείλεται στις αρχικές γεωλογικές διαδικασίες σχηματισμού των πετρωμάτων είναι πρωτογενές, ενώ όταν οφείλεται σε διαρρήξεις της βραχώμαζας ή σε χημική διάλυσή της (π.χ. καρστικά συστήματα), δευτερογενές.

Ο όρος διαπερατότητα εκφράζει την ικανότητα των γεωλογικών σχηματισμών να μεταβιβάζουν ρευστό μέσω του πορώδους τους. Στις περισσότερες των περιπτώσεων το ρευστό αυτό είναι το νερό (ή άλλο υδατικό διάλυμα) και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται ο όρος υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα. Η υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο το πορώδες μέσο μεταβιβάζει το νερό μέσω μοναδιαίας διατομής. Ανάλογα με το πόσο εύκολα ή δύσκολα οι γεωλογικοί σχηματισμοί διακινούν το νερό στη μάζα τους, κατατάσσονται στις τρεις ακόλουθες γενικές κατηγορίες:

(α) *Υδροπερατοί σχηματισμοί*: στη περίπτωση αυτή το νερό κινείται εύκολα και μεγάλη ταχύτητα εντός της μάζας των σχηματισμών, παρουσιάζοντας επομένως υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα.

(β) *Ημιπερατοί σχηματισμοί*: σε αυτούς το νερό κινείται με σχετικά μέτρια δυσκολία εντός της μάζας των σχηματισμών, παρουσιάζοντας επομένως μέτρια υδραυλική αγωγιμότητα.

(γ) *Αδιαπέρατοι σχηματισμοί*: όπου το νερό κινείται με πολύ μικρή ταχύτητα εντός της μάζας των σχηματισμών, οπότε πρακτικά μπορεί να θεωρηθούν ως αδιαπέρατοι, παρουσιάζοντας πολύ χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα.

Στη συνέχεια, οι σχηματισμοί που απαντώνται στην περιοχή έρευνας ταξινομήθηκαν στις τρεις αυτές υδρολιθολογικές κατηγορίες και συντάχθηκε ο υδρολιθολογικός χάρτης για την υπολεκάνη Τυρνάβου (Εικόνα 6.1) βασισμένος στη μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Καραβοκύρης κ.α. 2014).

Υδροπερατοί σχηματισμοί

Οι σχηματισμοί της υπολεκάνης Τυρνάβου που ανήκουν στην κατηγορία αυτή οι καρστικοί σχηματισμοί στα δυτικά κράσπεδα και οι κοκκώδεις χαλαροί σχηματισμοί (Panagorouλος 1995, Παγώνης κ.α. 2007).

Οι ανθρακικοί καρστικοί σχηματισμοί (μάρμαρα Τυρνάβου), στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης, παρουσιάζουν υψηλή υδροπερατότητα εξαιτίας του υψηλού

βαθμού καρστικοποίησής τους και του έντονου τεκτονισμού τους. Οι σχηματισμοί αυτοί «φιλοξενούν» δυναμικές υδροφορίες, οι οποίες εξαρτώνται από την επιφανειακή ανάπτυξή τους, από τη γεωμετρία τους, το βαθμό τεκτονισμού, την πυκνότητα των καρστικών αγωγών και από το ύψος των κατακρημνισμάτων που δέχονται. Στην περίπτωση τοπικών παρεμβολών αδιαπέρατων στρώσεων εντός της μάζας των καρστικών σχηματισμών (π.χ. σχιστόλιθοι), μειώνεται η υδραυλική τους αγωγιμότητα δημιουργώντας ζώνες και κατευθύνσεις εκλεκτικής υπόγειας ροής. Οι σχηματισμοί αυτοί εκφορτίζονται από καρστικές πηγές υπερπλήρωσης (Μάτι Τυρνάβου, Αγ. Άννα, Αμυγδαλέα), οι οποίες εκρέουν στα όρια της επαφής της καρστικής μάζας με τις μικρότερης περατότητας αλλουβιακές προσχώσεις της πεδιάδας (βλέπε Εικόνα 6.7 στο τέλος του Κεφαλαίου).

Οι αδρομερείς αποθέσεις του Τεταρτογενούς (κροκάλες, χάλικες, άμμοι, οι οποίοι αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο στον κώνο κορημάτων του ποταμού Τιταρήσιου, στο ΒΔ τμήμα της υπολεκάνης, παρουσιάζουν επίσης υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα και «φιλοξενούν» δυναμικές υπόγειες υδροφορίες. Στις αποθέσεις αυτές η συμμετοχή της αργίλου είναι μικρή. Οι υδροπερατές αυτές αποθέσεις εκτός από την πλήρη, κατά την κάθετη έννοια, ανάπτυξή τους στον κώνο του Τιταρήσιου συνεχίζονται προς τα κατάντη, όπου βυθίζονται κάτω από τα λεπτόκοκκα επιφανειακά υλικά του κεντρικού τμήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου. Στο τμήμα αυτό συμπλέκονται και με άλλα λεπτόκοκκα στρώματα ιλύος και αργίλου, σχηματίζοντας έτσι αλληπάλληλα υπό πίεση (ή μερικώς υπό πίεση) υδροφόρα στρώματα.

Ημιπερατοί σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή των σχηματισμών μπορούν να τοποθετηθούν οι πλειοκαινικές αποθέσεις των λόφων, που συναντώνται επιφανειακά στο νότιο τμήμα της περιοχής έρευνας, αλλά έχουν εντοπιστεί και σε γεωτρήσεις εντός της περιοχής έρευνας ως υπόβαθρο των τεταρτογενών αποθέσεων, εξαιτίας των συχνών εναλλαγών υδροπερατών (άμμων, ψαμμιτών, κροκαλοπαγών) με αδιαπέρατους (μάργες, άργιλοι, πηλοί) σχηματισμούς. Τοπικά, οι ανωτέρω σχηματισμοί, ανάλογα με την επικράτηση των αδρομερών ή μη μελών τους, παρουσιάζουν μέση υδατοπερατότητα. Το γεγονός όμως του γενικού «εγκλωβισμού» τους από αδιαπέρατα στρώματα μαργών και αργίλων και της δυσκολίας τροφοδοσία τους με νερό, οδηγούν στην κατάταξη των αποθέσεων αυτών, στο σύνολο τους, ως ημιπερατών με μεγάλη δυσκολία ανανέωσης των αντλούμενων αποθεμάτων τους.

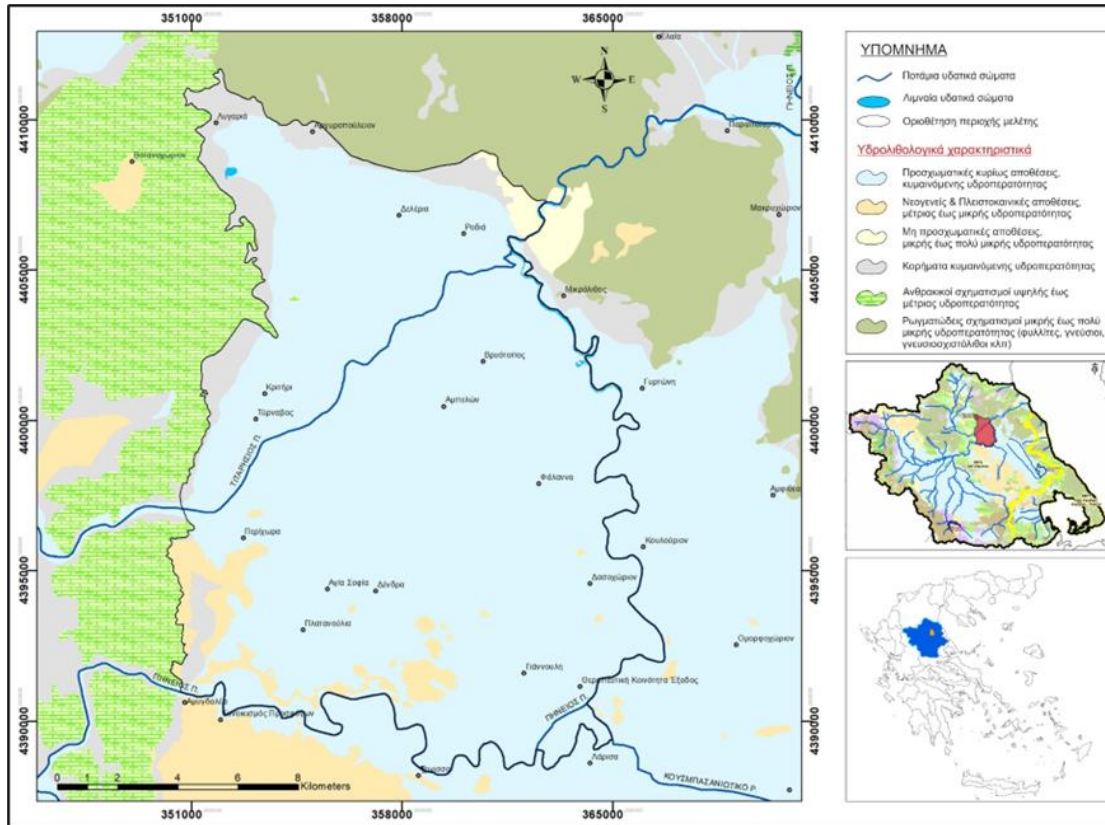
Για τον ίδιο ακριβώς λόγο, δηλαδή της δύσκολης επικοινωνίας και της παρουσίας εναλλαγών λεπτόκοκκων με αδρομερείς αποθέσεις, οι προσχώσεις στο κέντρο της υπολεκάνης Τυρνάβου, μακριά από τον κώνο του Τιταρήσιου, χαρακτηρίζονται πλέον από πιο λεπτομερή υλικά και από μια έντονη χωρική ετερογένεια, ως αναμένεται σε τυπικές αλλουβιακές αποθέσεις. Συνεπώς, η υδροπερατότητα του συνολικού πακέτου των αλλουβιακών αποθέσεων είναι πολύ μικρότερη, ώστε να μπορούν να θεωρηθούν στο σύνολό τους ημιπερατοί σχηματισμοί. Σημειώνεται πάντως ότι είναι

δυνατόν να εντοπισθούν υψηλού δυναμικού τοπικές υδροφορίες στους ανωτέρω σχηματισμούς, μικρής όμως έκτασης και δύσκολης αναπλήρωσής τους, με αποτέλεσμα την ταχεία μείωση των αποδόσεων των γεωτρήσεων.

Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή μπορούν να υπαχθούν (ουσιαστικά αποτελούν σχηματισμούς πολύ μικρής διαπερατότητας) οι λεπτομερείς αποθέσεις ιλύος και αργίλου που εμφανίζονται κατά τόπους και χαρακτηρίζονται από ανομοιογενή ανάπτυξή τους, τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κάθετο διεύθυνση. Η κατά τόπους ανάπτυξή τους συμβάλλει αφενός στον οριζόντιο διαχωρισμό των προαναφερόμενων υδροπερατών Τεταρτογενών σχηματισμών και αφετέρου στην δημιουργία μιας υπερκείμενης ελεύθερης και μιας υποκείμενης υπό πίεση υδροφορίας.

Στην ίδια κατηγορία κατατάσσονται οι συμπαγείς σχηματισμοί γνεύσιοι και σχιστόλιθοι που συναντώνται στα βόρεια κράσπεδα του πεδινού τμήματος, όταν έχουν τη μορφή υγιούς, μη τεκτονισμένου και μη διαβρωμένου πετρώματος. Τα συμπαγή ανωτέρω πετρώματα, εξαιτίας του τεκτονισμού τους και της διαδικασίας της αποσάθρωσης στα επιφανειακά τους κυρίως τμήματα, επιτρέπουν την κυκλοφορία μικρών ποσοτήτων νερού χωρίς όμως να αναπτύσσονται ουσιαστικές υπόγειες υδροφορίες. Η σημασία τους ωστόσο είναι σημαντική τοπικά, για την κάλυψη περιορισμένων αναγκών σε νερό.



Εικόνα 6.1. Υδρολογικός χάρτης υπολεκάνης Τυρνάβου (Σύμφωνα με τη «Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας» (Καραβοκύρης κ.α. 2014).

6.3 ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

Με βάση την οριοθέτηση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, στο πλαίσιο της μελέτης διαχείρισης υδατικών πόρων του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Καραβοκύρης κ.α. 2014), η λεκάνη ανατολικής Θεσσαλίας αποτελείται από δύο πρακτικά ενιαία υπόγεια υδατικά συστήματα, τα οποία διαχωρίζονται για διαχειριστικούς λόγους. Το πρώτο είναι το Υπόγειο Υδατικό Σύστημα Λάρισας-Κάρλας με κωδικό EL0800110 και το δεύτερο το Υπόγειο Υδατικό Σύστημα κώνου Τιταρήσιου με κωδικό EL0800220.

Η περιοχή έρευνας ανήκει εξολοκλήρου στο Υπόγειο Υδατικό Σύστημα κώνου Τιταρήσιου (EL0800220) και σε αυτή διακρίνονται επιμέρους υδρογεωλογικές ενότητες που έχουν υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους. Η ένταση και φορά ωστόσο της επικοινωνίας αυτής μεταβάλλεται σημαντικά ως συνάρτηση των υδρολογικών συνθηκών και των συνθηκών εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων στην ευρύτερη περιοχή, με αποτέλεσμα αυτή κατά περιόδους να διακόπτεται πλήρως ή να περιορίζεται σημαντικά, ανάλογα με την διαμόρφωση της υπόγειας στάθμης σε κάθε μια από τις ενότητες αυτές. Στο συμπέρασμα αυτό οδηγήθηκαν παλαιότερες έρευνες που διεξάχθηκαν στην περιοχή (Panagoroulios 1995), αλλά και η ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν στο πλαίσιο της τρέχουσας διατριβής, όπως αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια. Ως αποτέλεσμα, υδραυλικά, οι ενότητες αυτές άλλες φορές φέρονται να συνδέονται μεταξύ τους (μεταγγίσεις υπογείων υδάτων), ορισμένες φορές όμως παρουσιάζονται και ανεξάρτητες η μία από την άλλη (διακοπή υδραυλικής επικοινωνίας). Τρεις είναι οι κύριοι τύποι υδροφόρων που αναπτύσσονται στην υπολεκάνη και στα κράσπεδα αυτής.

- Ο ελεύθερης πιεζομετρικής επιφάνειας υδροφόρος.
- Οι επάλληλοι υπό-πίεση υδροφόροι.
- Ο καρστικός υδροφόρος που αναπτύσσεται στα ανθρακικά πετρώματα στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης (μάρμαρα Τυρνάβου) και που παρουσιάζει επιμέρους διαφοροποιήσεις όσον αφορά την υδραυλική του συμπεριφορά.

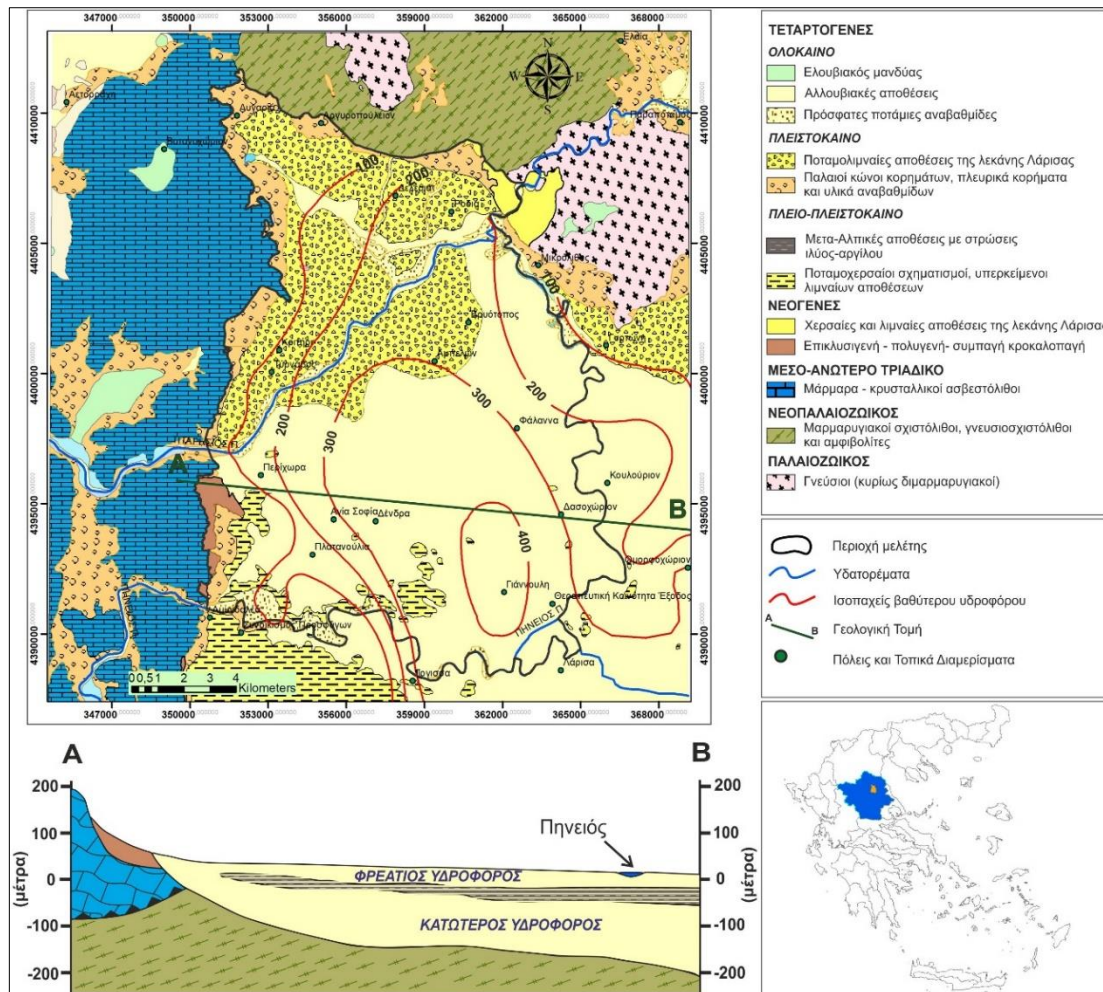
Οι δύο πρώτοι τύποι υδροφόρων αναπτύσσονται στους αλλουβιακούς σχηματισμούς της πεδιάδας και ενδεχομένως και στα Νεογενή που τοπικά αποτελούν το υπόβαθρο των σύγχρονων αποθέσεων. Η δυναμικότητα των υδροφόρων ποικίλει τόσο στα αλλούβια όσο και στις καρστικές περιοχές. Αυτή εξαρτάται στα μεν αλλούβια από την κοκκομετρία και την τροφοδοσία, ενώ στους καρστικούς υδροφόρους από το βαθμό καρστικοποίησης. Στη συνέχεια εξετάζονται ξεχωριστά οι υδροφόροι των τεταρτογενών αποθέσεων από αυτούς των καρστικών ενοτήτων.

6.3.1. ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΙΕΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υπολεκάνη Τυρνάβου έχει ως νότιο και ανατολικό όριο τον ποταμό Πηνειό, ενώ στα βόρεια και δυτικά περικλείεται από τους λόφους του μεταμορφωμένου συστήματος της Πελαγονικής ζώνης (μάρμαρα, γνεύσιοι). Στο νότιο όριο, στο ύψος του Πηνειού, αναπτύσσονται πλειοκαινικές (νεογενείς) μικρής περατότητας αποθέσεις, οι οποίες συναντώνται τοπικά και ως υπόβαθρο των σύγχρονων αποθέσεων. Η πρόσχωση της υπολεκάνης με αδρομερή περατά υλικά πραγματοποιήθηκε κυρίως από τον ποταμό Τιταρήσιο. Ο ποταμός αυτός κατά τη διαδρομή του, πριν την είσοδο του στο πεδινό τμήμα, διέρχεται κυρίως από ανθρακικά πετρώματα μεταφέροντας υλικά τα οποία αποθέτοντας δημιουργούν ένα ευρύ κώνο αποθέσεων. Αντίθετα, ο Πηνειός έχει ήδη διανύσει μεγάλο τμήμα πεδινής έκτασης (δυτική Θεσσαλία) και έχει ήδη εναποθέσει τα χονδρόκοκκα μεταφερόμενα υλικά. Επομένως, κατά τη διαδρομή του από την ανατολική Θεσσαλία έως τις εκβολές του, εναποθέτει μόνο λεπτομερή υλικά (άμμος, ιλύς, άργιλος).

Οι χονδρόκοκκες αλλουβιακές αποθέσεις του Τιταρησίου αναπτύσσονται επιφανειακά με σχετική ομοιογένεια μέχρι περίπου το κέντρο της υπολεκάνης, ενώ ανατολικότερα, και μέχρι το όριο του Πηνειού ποταμού, οι χονδρόκοκκες αποθέσεις διαχωρίζονται από συνεχή στρώματα αργίλου. Το πάχος των αλλούβιων στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης (περιοχή Αμπελώνας-Φαλάνης) είναι αρκετές εκατοντάδες μέτρα και στις γεωτρήσεις που διανοίχθηκαν, κατά μήκος τους, δεν συναντήθηκε το υπόβαθρό τους. Στην περιοχή των Τοπικών Διαμερισμάτων, Δένδρων, Αγίας Σοφίας και Πλατανούλια, το υπόβαθρο αποτελείται από Νεογενείς αποθέσεις, όπως αυτές εμφανίζονται νότια του Πηνειού (περιοχή Ταουσάνης) και βρίσκεται σε βάθος 50-100m. Τέλος, στο βόρειο-βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής το υπόβαθρο, που αποτελείται από γνεύσιους και κρυσταλλικούς σχιστόλιθους, κυμαίνεται από 180-250m.

Οι τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις της υπολεκάνης Τυρνάβου φιλοξενούν μια ελεύθερη υδροφορία κοντά στον κώνο κορημάτων του Τιταρησίου στα ΒΔ. Οι αδρομερείς περατές αποθέσεις του Τιταρησίου, που φιλοξενούν την υδροφορία αυτή, προς το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης βυθίζονται κάτω από πλέον λεπτομερή στρώματα (άργιλοι, ιλύες) και κατ' αυτόν τον τρόπο η ελεύθερη υδροφορία μεταπίπτει σε ένα σύστημα δύο υδροφοριών, μιας φρεάτιας και μιας βαθύτερης υπό-πίεση (ή μερικώς υπό-πίεση), οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους από τις στρώσεις αυτές της ιλύος και της αργίλου (Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2. Ισοπαχείς καμπύλες βαθύτερου αλλουβιακού υδροφόρου (Sogreah 1974) και απλοποιημένη γεωλογική τομή με τη δομή του αλλουβιακού υδροφόρου συστήματος (τροποποιημένη από Panagoroulos 1995).

Το πάχος της φρεατίας υδροφορίας ποικίλλει γενικότερα όμως είναι μικρότερο από 70m. Λιθολογικά, η μονάδα αυτή αποτελείται από λεπτότερα υλικά από ότι αυτή του βαθύτερου υπό-πίεση υδροφόρου. Λόγω του περιορισμένου πάχους της, η δυναμική της συγκεκριμένης υδροφορίας είναι περιορισμένη και για το λόγο αυτό αξιοποιήθηκε κυρίως κατά το παρελθόν, ενώ σήμερα εμφανίζεται, ανάλογα με την περιοχή και το υδρολογικό έτος, εξασθενημένη ή εξαντλημένη. Η τροφοδοσία από την κατείδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, τους ποταμούς, τις απώλειες των καναλιών και τις επιστροφές αρδεύσεων εμπλουτίζουν τον επιφανειακό αυτό υδροφόρο και στη συνέχεια μεταβιβάζονται στο κύριο υδατικό σύστημα. Επίσης, η φρεατία αυτή υδροφορία είναι υψηλής σημασίας λόγω της προστασίας που προσφέρει, στην υποκείμενη υπό-πίεση υδροφορία από ρύπανση, παίζοντας ουσιαστικά το ρόλο του προστατευτικού καλύμματος. Επομένως, αν και ο επιφανειακός υδροφόρος δεν είναι σημαντικός ως παραγωγική μονάδα τροφοδοσίας, προσφέρει ουσιαστικά στη διαδικασία τροφοδοσίας ολόκληρου του

συστήματος και στην προστασία του βαθύτερου υδροφόρου, όπου και εντοπίζεται το υψηλό υδατικό δυναμικό. Οι δύο υδροφορίες (φρεάτια και υπό-πίεση) συνδέονται προς τα περιθώρια της υπολεκάνης στα δυτικά, όπως απεικονίζεται στο εννοιολογικό διάγραμμα του συστήματος, στην Εικόνα 6.2.

Αναφορικά με το στρώμα ιλύος και αργίλου μεταξύ των δύο υδροφοριών, αυτό προτάθηκε αρχικά από την Sogreah (1974) και την Compagnie Generale de Geophysique (1972), οι οποίες υποστήριξαν την ύπαρξή του μέσω γεωφυσικών ερευνών που πραγματοποίησαν στην περιοχή, αλλά και την ανάλυση των λιθολογικών τομών γεωτρήσεων που ανορύχθηκαν στην περιοχή. Το πάχος του δεν ξεπερνά τα 50m στα κεντρικά τμήματα του υδροφόρου, ενώ μειώνεται ακόμη περισσότερο προς τα περιθώρια της υπολεκάνης, όπου τελικά εξαφανίζεται (Panagoroulos 1995, Alexandridis et al. 2014). Από τη μελέτη των λιθολογικών τομών των γεωτρήσεων προέκυψε μια διακριτή διαφορά στη λιθολογία, με υψηλό ποσοστό αργίλου και πολύ λεπτόκοκκα υλικά, όπου υπάρχει αυτό το στρώμα. Όπως έχει ειπωθεί, το στρώμα αυτό εμφανίζεται σαν επάλληλες στρώσεις ιλύος και αργίλου, και όχι ως ένα ομοιόμορφο στρώμα χαμηλής διαπερατότητας.

Το στρώμα αυτό παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία και εξέλιξη του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Παρόλο που η υδραυλική αγωγιμότητα (η κατακόρυφη συνιστώσα της) του στρώματος αυτού είναι ιδιαίτερα μικρή, στη κλίμακα της περιοχής έρευνας, θεωρείται ότι παίζει ρυθμιστικό ρόλο για το σύστημα υπόγειας ροής και συνεπακόλουθα την υδροχημική εξέλιξη της υπόγειας υδροφορίας. Η φορά της κατακόρυφης κίνησης εξαρτάται από το σχετικό υψόμετρο της πιεζομετρικής επιφάνειας του επιφανειακού και του βαθύτερου υδροφόρου. Από προηγούμενες μελέτες (Λουκάς κ.α. 2003) προκύπτει ότι, σε γενικές γραμμές, αυτή η κατακόρυφη κίνηση έχει φορά προς τα πάνω στα εσωτερικά τμήματα της υπολεκάνης ενώ κινούμενοι προς τα περιθώρια, προοδευτικά μεταβάλλεται προς τα κάτω. Ωστόσο, εξαιτίας της συνεχιζόμενης υπεράντλησης των υπόγειων υδατικών πόρων, ο φρεάτιος υδροφόρος τείνει να εξαντληθεί οπότε και η κατακόρυφη κίνηση, όπου υπάρχει, τείνει να είναι παντού καθοδική.

Οι υπάρχουσες γεωτρήσεις στην περιοχή έρευνας, στις περισσότερες των περιπτώσεων, δεν υπερβαίνουν τα 200m σε βάθος και επομένως δεν φθάνουν στο γεωλογικό υπόβαθρο, ωστόσο δεν απουσιάζουν και γεωτρήσεις, στα κεντρικά τμήματα της λεκάνης, το βάθος των οποίων κατά πληροφορίες υπερβαίνει τα 300 και πλέον μέτρα, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν διαθέσιμες αντίστοιχες λιθολογικές τομές. Με βάση τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας (Compagnie Generale de Geophysique 1972), το πάχος του βαθύτερου υπό πίεση υδροφόρου υπερβαίνει τα 400m στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής, ενώ λεπταίνει προς τα περιθώρια της υπολεκάνης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2. Οι περισσότερες από τις παραγωγικές γεωτρήσεις, αρδευτικής και υδρευτικής χρήσης, τροφοδοτούνται από αυτόν τον υδροφόρο, τα υλικά του οποίου είναι πιο χονδρόκοκκα από εκείνα του ανώτερου

φρεάτιου υδροφόρου, όπως αναφέρθηκε ήδη στο Κεφάλαιο 4.

Η τροφοδοσία των προσχωματικών υδροφοριών της ευρύτερης περιοχής Τυρνάβου γίνεται (α) μέσω της διήθησης των νερών του Τιταρησίου, (β) από την κατείσδυση των νερών της βροχής που δέχεται η ζώνη ανάπτυξης του κώνου και (γ) από τις πλευρικές μεταγγίσεις από το καρστικό σύστημα στα δυτικά κράσπεδα της περιοχής, προς το αλλουβιακό σύστημα. Ο Τιταρήσιος, στο ύψος του Δαμασίου πριν βγει στην πεδιάδα, σταματάει να ρέει επιφανειακά τροφοδοτώντας έτσι τόσο την υδροφορία που αναπτύσσεται στα μάρμαρα της περιβάλλουσας περιοχής όσο και αυτήν του κώνου του. Η ποσότητα των νερών του Τιταρησίου που διηθείται και τροφοδοτεί τους υπόγειους αλλουβιακούς υδροφόρους δεν μπορεί να υπολογισθεί με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα, ωστόσο βάσει παλαιότερων μελετών στην περιοχή εκτιμάται σε $1.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ για τα αλλούβια (Sogreah 1974).

6.3.2. ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΙΕΣ

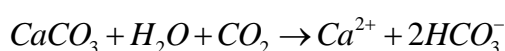
Χαρακτηριστικά καρστικών υδροφόρων

Ο όρος «καρστ» αναφέρεται στη διεύρυνση του μεγέθους των ρωγμών και των ασυνεχειών των ανθρακικών πετρωμάτων, εξαιτίας της διαλυτικής δράσης του νερού (Ambroggi et al. 1958). Εκτός των ανθρακικών πετρωμάτων, μπορούν υπό προϋποθέσεις που σχετίζονται με τις γεωχημικές συνθήκες, να προσβληθούν από τη διαβρωτική δράση του νερού και εβαποριτικοί σχηματισμοί, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό καρστ, αλλά διαφορετικής γενεσιουργού αιτίας και διεργασιών (Τζιρίτης 2008).

Οι καρστικοί υδροφόροι που αναπτύσσονται σε ανθρακικά πετρώματα είναι από τους πλέον παραγωγικούς, λόγω των ιδιαίτερων υδρογεωλογικών συνθηκών που διαμορφώνονται μέσα σε αυτούς. Οι υψηλές τιμές μεταβιβασιμότητας και παροχής, είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις μεγάλες τιμές ταχυτήτων του υπόγειου νερού και παρέχουν ένα ιδανικό γεωλογικό πλαίσιο για την υδρομαστευτική εκμετάλλευσή τους. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 60% - 80% της ροής και της μεταβίβασης του υπόγειου νερού σε ένα καρστικό υδροφόρο, γίνεται δια μέσου των καρστικών αγωγών και διακένων, παρόλο που ο συνολικός όγκος του νερού που βρίσκεται μέσα σε αυτά μια δεδομένη χρονική στιγμή είναι ίσος με το 1/29 του συνολικού όγκου (Atkinson 1975, Τζιρίτης 2008). Οι ευνοϊκές υδρογεωλογικές ιδιότητες των σχηματισμών αυτών, τους μετατρέπουν και σε ένα από τα πλέον ευαίσθητα υδατικά συστήματα, καθώς οι φυσικοί μηχανισμοί εξασθένησης, εξουδετέρωσης και αδρανοποίησης των ρύπων ελαχιστοποιούνται ή πολλές φορές εκλείπουν εντελώς. Το γεγονός αυτό, καθιστά τους καρστικούς υδροφόρους σε ευάλωτους αποδέκτες, κυρίως όταν αυτοί εκτείνονται, χωρίς παρεμβολή άλλων υπερκείμενων γεωλογικών σχηματισμών, έως την επιφάνεια.

Η διαδικασία σχηματισμού ενός καρστικού συστήματος, εκτός από τις γεωλογικές προϋποθέσεις, είναι άμεσα συνδεδεμένη με το κλίμα της περιοχής, την προσφορά σε CO₂(g) και τις βιολογικές διεργασίες. Η προσφορά του CO₂(g), που είναι και ο σημαντικότερος παράγοντας, γίνεται κυρίως μέσω της ατμόσφαιρας, είτε με απευθείας διάλυση στο νερό είτε μέσω της διαδικασίας φωτοσύνθεσης, κατά την οποία συσσωρεύεται στο οργανικό υλικό το οποίο με τη σειρά του αποσυντίθεται στον εδαφικό και υπεδαφικό ορίζοντα και απελευθερώνει ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (Yoshimura et al. 2001).

Η διαβρωτική ικανότητα του νερού εκφράζεται μέσω του pH και είναι ανάλογη με τη μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα (pCO₂). Η διάλυση του CaCO₃ πραγματοποιείται σύμφωνα με την αντίδραση:

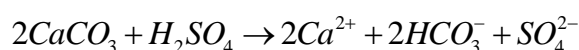


Σε περίπτωση που συνυπάρχει και δολομίτης, εκτός του ασβεστίου απελευθερώνονται και ιόντα μαγνησίου, σύμφωνα με την αντίδραση:



Ο σχηματισμός του καρστ μπορεί επίσης να προκύψει και από την προσφορά H₂SO₄ το οποίο μπορεί να διαλύσει το ανθρακικό μέρος με ταυτόχρονη απελευθέρωση θειικών ιόντων (Yoshimura et al. 1996). Το H₂SO₄ μπορεί να δημιουργηθεί είτε από την οξείδωση ορυκτών που συνυπάρχουν στο πέτρωμα (π.χ. σιδηροπυρίτης), είτε από την οξείδωση οργανικού S (Lang et al. 2006).

Η αντίδραση διάλυσης, στην περίπτωση αυτή, έχει την μορφή:



Το καρστ χαρακτηρίζεται από συνθήκες μικτής ροής (στροβιλώδης ή/και σε ευθείες παράλληλες γραμμές, διαμέσου ρωγμών, σπασμάτων, επιπέδων στρώσεων και γενικά μέσω ασυνεχειών της βραχομάζας, οι διαστάσεις των οποίων ενισχύονται από υδροχημικές διεργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα πειράματα τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο, που διεξήχθησαν από τον Greswell (1995) έδειξαν ότι σε μια καρστικοποιημένη περιοχή η ροή σε πορώδες μέσο είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη ροή μέσω του δικτύου ρωγμών, ωστόσο μπορεί να είναι σημαντική όσον αφορά τον έλεγχο του υδραυλικού φορτίου και τη διανομή της διάχυτης ροής στα χαρακτηριστικά του καρστ.

Σε κλίμακα λεκάνης, τα ποσοστά διήθησης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μπορούν να φθάσουν το 75%, ενώ η απορροή πολύ συχνά θεωρείται ότι είναι 0-1%. Οι απώλειες εξάτμισης από τις γυμνές καρστικές επιφάνειες είναι πολύ χαμηλές,

καθώς η ακτινοβολία και η επίδραση του ανέμου δεν έχουν αρκετό χρόνο για να δράσουν, λόγω της γρήγορης διήθησης του νερού στο βράχο (Soulis 1985, Panagoroulos 1995). Οι υψηλοί ρυθμοί διήθησης και η ταχεία μετακίνηση του νερού μέσω των ασυνεχειών, καθιστούν το περιβάλλον του καρστ πολύ ευάλωτο στη ρύπανση.

Λόγω της φύσης της ροής σε μια καρστική περιοχή, οι υδραυλικές ιδιότητες του σχηματισμού χαρακτηρίζονται από σημαντική ετερογένεια και ανισοτροπία τόσο κατά την οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Το πλάτος και η συχνότητα των ρωγμών, οι οποίες προκαλούνται από την τεκτονική παραμόρφωση, μειώνονται με το βάθος και το ίδιο συμβαίνει και με την καρστικοποίηση (Le Grand et al. 1971, Ford & Williams 2013).

Η διαπερατότητα και η ανάπτυξη του πορώδους είναι σημαντικά αυξημένη στα ανθρακικά πετρώματα που βρίσκονται στον πυθμένα των κοιλάδων, σε σύγκριση με το ίδιο πέτρωμα, το οποίο βρίσκεται σε περιοχές υψηλής τοπογραφίας (Rushton et al. 1989, Ford & Williams 2013). Αυτή η διαφοροποίηση ελέγχεται από διάφορους παράγοντες, σημαντικότεροι από τους οποίους είναι η τοπογραφία, η τεκτονική εξέλιξη, η επιφανειακή υδρολογία, η κλιματολογία και η γεωλογία (Brahana et al. 1988, Panagoroulos 1995).

Σε ένα τέτοιο περιβάλλον αναπτύχθηκε η έννοια του διπλού πορώδους: το πρωτογενές ή μητρικό πορώδες και το δευτερογενές πορώδες λόγω των σπηλαιώσεων, των ρωγμών και των καρστικών καναλιών που αναπτύσσονται στη μάζα του πετρώματος. Από μελέτες που διεξήχθησαν στο Διηναρικό καρστ, προέκυψε ότι οι τιμές του πορώδους κυμαίνονται μεταξύ 0.4-3.4%, ενώ το μέγιστο ενεργό πορώδες δεν υπερβαίνει το 0.167% (Milanovic 1981).

Χαρακτηριστικά καρστικού συστήματος Τυρνάβου

Το καρστικό σύστημα Τυρνάβου αναπτύσσεται στο δυτικό περιθώριο της περιοχής έρευνας (Εικόνα 6.3). Στο νότιο τμήμα υπάρχουν δύο μικρότερες επιφανειακές εκτάσεις του καρστ, οι οποίες διαχωρίζονται από τις ποτάμιες αποθέσεις των ποταμών Τιταρήσιου και Πηνειού (Εικόνα 6.3). Η έκταση της κύριας επιφανειακής ανάπτυξης του καρστ υπολογίζεται στα 117km², ενώ οι δύο μικρότερες εκτάσεις στα νότια έχουν συνολική επιφάνεια 32km². Το υψόμετρο του καρστ κυμαίνεται μεταξύ 120 και 900m, πάνω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας, ενώ στην επιφάνειά του ουσιαστικά δεν υπάρχει ανάπτυξη εδάφους ή βλάστησης (παρά μόνο περιορισμένου πάχους στα κράσπεδα αυτού, υπό τη μορφή κυρίως των αποθέσεων κλιτύος-κορημάτων), γεγονός που υποδηλώνει ότι ο βαθμός διήθησης είναι αρκετά υψηλός. Η καρστικοποίηση του ορεινού αυτού όγκου φαίνεται να έχει αναπτυχθεί με ένα πιο ομοιογενές μοτίβο και όχι με μεγάλα καρστικά κανάλια και ως εκ τούτου δεν έχουν δημιουργηθεί μεγάλοι και εντυπωσιακοί καρστικοί σχηματισμοί (π.χ. σπηλιές ή μεγάλα σπήλαια) εντός της μάζας του μαρμάρου. Στο υψόμετρο των 600m περίπου,

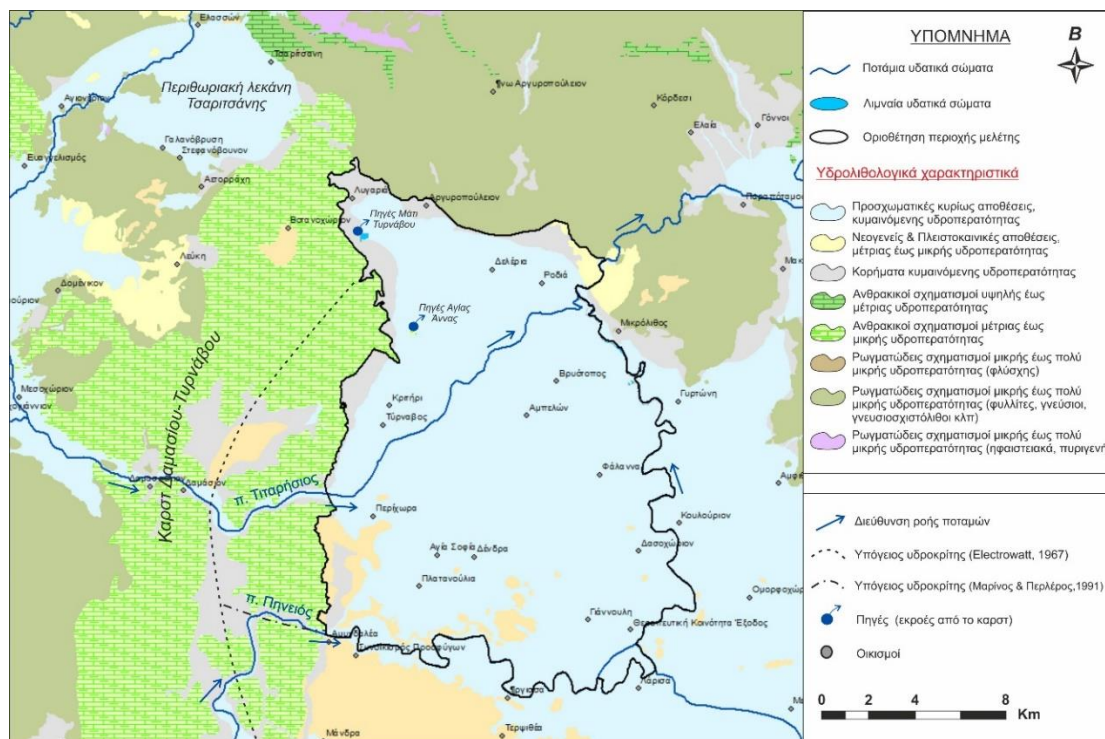
δημιουργήθηκε μια δολίνη (μικρότερου μεγέθους καρστικός σχηματισμός), η οποία καλύπτεται από ελλούβια ιζήματα και έχει συνολική έκταση 1.6km².

Σύμφωνα με τον Κωνσταντινίδη (1980), οι τρεις αυτές επιφανειακές εκτάσεις του καρστ συνδέονται υδραυλικά, σχηματίζοντας έτσι το ευρύτερο καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου-Κουτσόχερου. Σύμφωνα με άλλη μελέτη (Μαρίνος & Περλέρος 1991), υπάρχει εποχιακά διαφοροποιούμενη υδραυλική συμπεριφορά του καρστικού αυτού συστήματος. Έτσι κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων το σύστημα αποστραγγίζεται στα βόρεια από τις δύο καρστικές πηγές (Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας), ενώ κατά τη διάρκεια των υγρών περιόδων αναπτύσσεται ένας άξονας αποστράγγισης Α-Δ, κατά μήκος του ποταμού Πηνειού, ο οποίος και διαχωρίζει το σύστημα σε δύο υπολεκάνες (Εικόνα 6.3). Οι Panagoroulos et al. (1995) αναφέρουν την ύπαρξη ενός υπόγειου υδροκρίτη, παράλληλου με τον άξονα της κοίτης του Τιταρήσιου, ο οποίος διαχωρίζει το καρστικό σύστημα σε δύο υπό συστήματα. Σύμφωνα με τους ερευνητές μάλιστα, ο υδροκρίτης αυτός παρουσιάζει χρονική και χωρική μετατόπιση σαν συνάρτηση των υδροδυναμικών συνθηκών που επικρατούν (φυσική τροφοδοσία, πηγαίες εκφορτίσεις, απολήψεις από γεωτρήσεις). Τέλος, μελέτη που διεξήχθη από την Electrowatt Engineering Services (1967), πρότεινε ότι το καρστικό σύστημα χωρίζεται σε δύο υπολεκάνες, τα όρια των οποίων απεικονίζονται στην Εικόνα 6.3.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι επιφανειακές εκτάσεις του καρστ διαχωρίζονται, κατά μήκος των φαραγγιών του Πηνειού και του Τιταρήσιου, από τις ποτάμιες αποθέσεις τους. Το εκτιμώμενο πάχος των αποθέσεων αυτών στα φαράγγια, ειδικότερα του ποταμού Τιταρήσιου, υπερβαίνει τα 75m και φτάνει μέχρι και τα 100m. Από τη μελέτη των λιθολογικών τομών των καρστικών γεωτρήσεων προκύπτει, ότι το καρστ είναι καλά αναπτυγμένο στο βάθος των 40m, ενώ κάτω από το βάθος αυτό ο βαθμός καρστικοποίησης μειώνεται αισθητά και ουσιαστικά σταματάει στο βάθος των 70m (Constandinidis 1978, Soulios 1985, Panagoroulos 1995). Επομένως, κάθε υδραυλική αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων καρστικών επιφανειών είναι έμμεση και λαμβάνει χώρα μέσω των ποτάμιων αποθέσεων των φαραγγιών. Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, η κύρια καρστική επιφάνεια του Τυρνάβου, λαμβάνεται ως μεμονωμένη υδρογεωλογική ενότητα, η οποία αλληλοεπιδρά μόνο με τους όμορους αλλουβιακούς υδροφόρους.

Η καρστική αυτή ενότητα των κρασπέδων εκφορτίζεται μέσω των πηγών Αμυγδαλέας στο νότιο τμήμα της υπολεκάνης, που ωστόσο πλέον δεν εμφανίζουν συστηματική εκροή λόγω της εκμετάλλευσης του δυναμικού του κάρστ, αλλά και των πηγών Αγίας Άννας και Μάτι στο βόρειο τμήμα αυτής, όπου και λαμβάνει χώρα η κύρια αποστράγγιση του συστήματος. Οι πηγές Αγίας Άννας υδρομαστεύονται συστηματικά για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών του Τυρνάβου και εξαιτίας αυτής της αναρρύθμισης, εμφανίζουν φυσική εκφόρτιση περιστασιακά και μόνο κατά την υγρή περίοδο «πλούσιων» υδρολογικών ετών. Οι πηγές Μάτι τροφοδοτούν

το υδροτοπικό σύστημα Αργυροπούλιου και δι' αυτού μέσω ρουφρακτών τροφοδοτούν την ανενεργή κεντρική αρδευτική διώρυγα του ομώνυμου Τ.Ο.Ε.Β. Οι φυσικές πλεονάζουσες ποσότητες νερού και των δύο πηγών (Μάτι και Αγία Άννα), απορρέουν μέσω φυσικών κοιτών που τελικά εκφορτίζονται στον ποταμό Πηνειό.



Εικόνα 6.3. Ανάπτυξη του καρστικού συστήματος Δαμασίου-Τυρνάβου στο δυτικό περιθώριο της περιοχής έρευνας.

6.3.3 ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Τα βασικά υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων είναι (Βουδούρης 2006):

A) Το υδραυλικό φορτίο (Hydraulic head)

Το φορτίο H αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση ανορυγμένη σε ελεύθερο υδροφόρο. Στους υπό-πίεση υδροφόρους το φορτίο είναι το απόλυτο υψόμετρο που θα έφτανε το νερό μέσα σε μια γεώτρηση που υδρομαστεύει αποκλειστικά την υπό-πίεση υδροφορία και το οποίο είναι μεγαλύτερο από το υψόμετρο της οροφής του υδροφόρου στη θέση αυτή. Έτσι η κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται στην υδροστατική πίεση και στη θέση του ως προς το επίπεδο αναφοράς. Οι γραμμές ίσου υδραυλικού φορτίου (ισοδυναμικές ή πιεζομετρικές γραμμές) μπορεί να απεικονισθούν με τη βοήθεια χαρτών. Οι γραμμές ροής είναι κάθετες στις ισοδυναμικές γραμμές.

Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται *υδραυλική κλίση* και δίνεται από τη σχέση: $i=dH/dl$. Το υδραυλικό φορτίο H σε ένα σημείο του πορώδους μέσου πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας g , δίνει το δυναμικό ροής Φ στο σημείο αυτό: $\Phi=H \cdot g$. Με άλλα λόγια το Φ είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας και το H η ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Το υδραυλικό φορτίο δεν μένει σταθερό, αλλά μειώνεται κατά την κίνηση του υπόγειου νερού, λόγω απωλειών (τριβές).

Β) Διαπερατότητα-Υδροπερατότητα (Permeability-Hydraulic conductivity)

Η διαπερατότητα είναι μια σταθερά, που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη των κόκκων).

Η υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα (K) χρησιμοποιείται στην Υδρογεωλογία γιατί το ρευστό είναι το νερό. Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την εσωτερική τριβή, την αντίσταση δηλ. του υγρού στη ροή. Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει διαστάσεις ταχύτητας και υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy. Με βάση τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, οι γεωλογικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε (Βουδούρης 2006):

- Πολύ υδροπερατούς όταν $K > 10^{-1}$ m/sec
- Υδροπερατούς όταν $10^{-6} < K < 10^{-1}$ m/sec
- Λίγο υδροπερατούς όταν $10^{-9} < K < 10^{-6}$ m/sec
- Πρακτικά στεγανούς όταν $K < 10^{-9}$ m/sec

Η διαπερατότητα (K_s) συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα (K) με τη σχέση: $K_s=K\mu/\gamma$

όπου μ =το δυναμικό ιξώδες ($N \cdot \text{sec}/m^2$) και γ =το ειδικό βάρος του ρευστού (N/m^3).

Γ) Μεταβιβασιμότητα (Transmissivity)

Μεταβιβασιμότητα είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) επί το πάχος του υδροφόρου στρώματος (D): $T=K \cdot D$. Εκφράζει τον όγκο νερού που διέρχεται από μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους.

Γ) Αποθηκευτικότητα (Storativity)

Ο συντελεστής εναποθήκευσης ή αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) είναι ο όγκος νερού που μπορεί να ληφθεί ή αποθηκευτεί από/σε ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου.

Έτσι ορίζεται από τη σχέση: $S=\Delta V/(A*\Delta h)$, όπου ΔV είναι ο όγκος νερού που απελευθερώνεται (ή προστίθεται) από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A , εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης (ή αύξησης) του φορτίου Δh . Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι καθαρός αριθμός και στους ελεύθερους υδροφόρους λαμβάνει τιμές μεταξύ 1% - 30%, ενώ στους υπό-πίεση από 0.0001% - 0.5% (Βουδούρης 2006).

Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά υπολογίζονται για έναν υδροφόρο μέσω των δοκιμαστικών αντλήσεων. Οι δοκιμαστικές αντλήσεις γίνονται για δύο βασικούς λόγους:

α) δίνουν πληροφορίες για την συμπεριφορά και τη δυναμικότητα του υδροφόρου ή του συστήματος των υδροφόρων που τροφοδοτούν μια γεώτρηση ή ένα ευρύτερο πεδίο γεωτρήσεων.

β) δίνουν πληροφορίες για τη δυναμικότητα, λειτουργία και απόδοση μιας συγκεκριμένης γεώτρησης.

Επομένως, από την επεξεργασία των στοιχείων της δοκιμαστικής άντλησης προσδιορίζονται αφενός οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφόρου στην περιοχή όπου γίνεται η δοκιμαστική άντληση και αφετέρου οι παράμετροι που σχετίζονται με την ίδια τη γεώτρηση. Στην πράξη υφίσταται μια διαφορά μεταξύ της δυναμικότητας της γεώτρησης και της δυναμικότητας των υδροφόρων, η οποία θεωρητικά δεν θα έπρεπε να υπάρχει. Η διαφορά όμως αυτή υφίσταται λόγω (Αντωναρόπουλος κ.α. 2010):

α) του βαθμού τελειότητας σχεδιασμού και κατασκευής της γεώτρησης και

β) διότι οι δοκιμές του υδροφόρου είναι περίπλοκες αφού απαιτούν την κατασκευή δορυφορικών πιεζομέτρων, τα οποία στην πράξη δεν υφίστανται. Την ατέλεια αυτή, με ορισμένες παραδοχές, πολλοί ερευνητές την έχουν συμπεριλάβει σε διάφορους τύπους.

Γνωρίζοντας τα υδραυλικά χαρακτηριστικά ενός υδατικού συστήματος μιας περιοχής, μπορεί να γίνει πρόβλεψη ευρείας κλίμακας και να σχεδιαστεί καλύτερα ένα μελλοντικό έργο ή πρόγραμμα αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού της εν λόγω περιοχής.

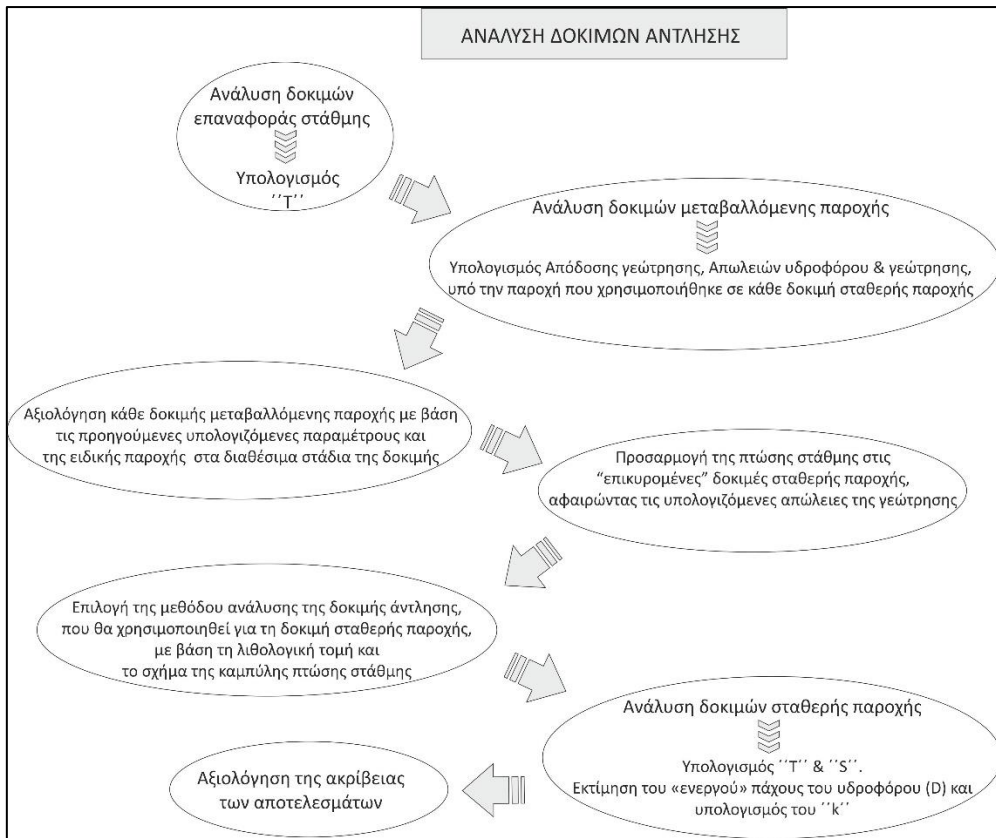
Στην περιοχή της υπολεκάνης Τυρνάβου, οι βασικές υδραυλικές παράμετροι του υπό-πίεση υδροφόρου υπολογίστηκαν σε προηγούμενη έρευνα (Panagoroulios 1995) από την ανάλυση των δεδομένων δοκιμαστικών αντλήσεων, οι οποίες έλαβαν χώρα μετά την κατασκευή των γεωτρήσεων. Τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούσαν 47 δοκιμές σταθερής παροχής (constant discharge) και 35 δοκιμές επαναφοράς στάθμης (recovery tests), οι περισσότερες από τις οποίες προέρχονται από τις ίδιες γεωτρήσεις (Sogreah 1974). Από αυτές τις δοκιμές, τέσσερεις διεξήχθησαν σε γεωτρήσεις που υδρομαστεύουν το καρστικό σύστημα, ενώ οι υπόλοιπες

προέρχονταν από γεωτρήσεις που είχαν ανορυχθεί εντός των αλλουβιακών ιζημάτων.

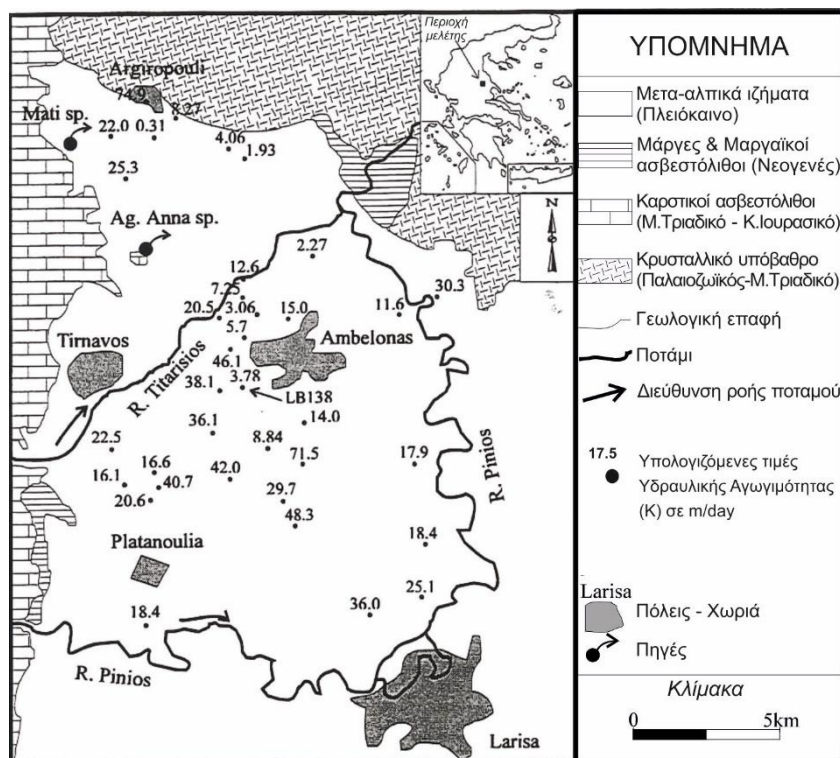
Οι γεωτρήσεις αυτές στην περιοχή έρευνας, κατασκευάστηκαν σταδιακά από το 1974 έως περίπου το 1990 και ως εκ τούτου οι δοκιμές άντλησης πραγματοποιήθηκαν εντός του ίδιου χρονικού διαστήματος. Συνεπώς, οι υπολογιζόμενες τιμές της μεταβιβαστικότητας, οι οποίες εξαρτώνται από το πάχος του κορεσμένου υδροφόρου ($T=k*D$), δεν μπορούν να συσχετισθούν. Ωστόσο, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας δεν αλλάζουν ως συνάρτηση του κορεσμένου πάχους του υδροφόρου και συνεπώς υπολογίστηκαν, χρησιμοποιώντας τις ληφθείσες τιμές μεταβιβαστικότητας, έτσι ώστε να ξεπεραστεί το υπάρχον πρόβλημα. Μοναδική εξαίρεση μη ισχύος των παραπάνω, είναι η περίπτωση μείωσης του πορώδους του υδροφόρου συστήματος λόγω υπερεκμετάλλευσης και συνεπακόλουθης συμπύκνωσης της λιθολογικής στήλης του υδροφόρου συστήματος. Επίσης, στην παραπάνω προσέγγιση, χάριν αποδοχής των υπολογισμών των τιμών υδραυλικών παραμέτρων, θεωρούμε ότι σε κλίμακα ακτίνας επίδρασης του υδροληπτικού έργου στο οποίο διενεργήθηκε η δοκιμαστική άντληση, το υδροφόρο σύστημα είναι ισότροπο και ομοιογενές. Εξαιτίας ωστόσο της ετερογένειας του υδροφόρου μέσου, της δραματικής μεταβολής των υδραυλικών συνθηκών μεταξύ της περιόδου διενέργειας των δοκιμών και της σημερινής κατάστασης, αλλά και των παραδοχών αυτών καθ' αυτών που διέπουν την ανάλυση αντλητικών δεδομένων, αναμένεται διαφοροποίηση των τιμών υδραυλικών παραμέτρων από την πραγματικότητα. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, οι τιμές που υπολογίζονται αποδίδουν μια καλή προσέγγιση της πραγματικότητας.

Σε γενικές γραμμές, τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την ανάλυση των διαθέσιμων δοκιμών άντλησης απεικονίζονται στην Εικόνα 6.4 και με βάση τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της μεταβιβαστικότητας, που προέκυψαν, κατασκευάστηκαν χάρτες χωρικής κατανομής των παραμέτρων αυτών (Ραπαγοπουλος 1995).

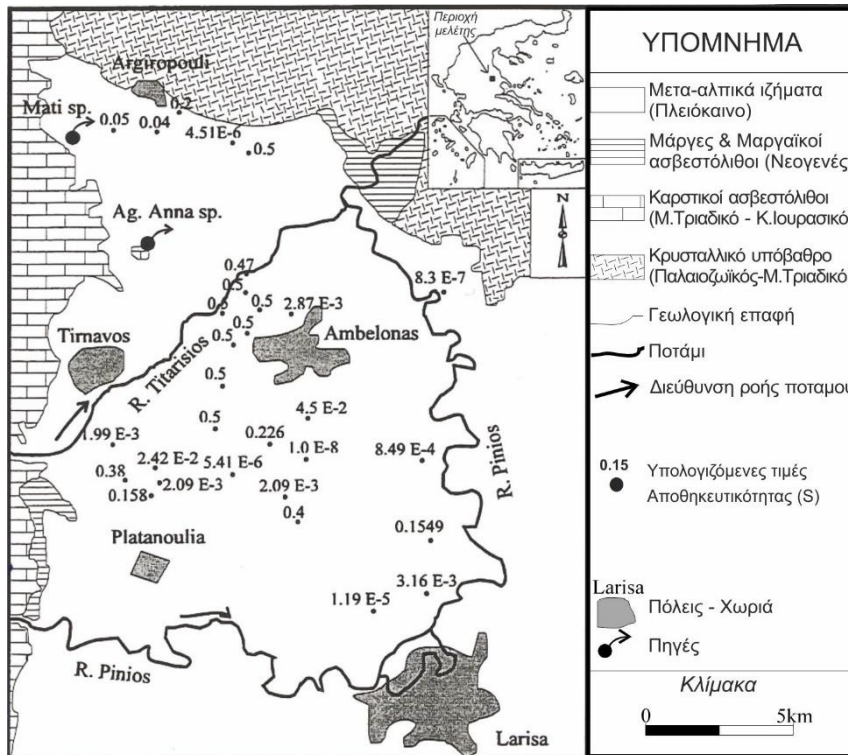
Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας τα υφιστάμενα δεδομένα αντλητικών δοκιμών, έγινε επιβεβαίωση του κορεσμένου πάχους υδροφορίας και αξιολόγηση της πιθανότητας συμπύκνωσης του υδροφόρου σχηματισμού για κάθε θέση υδροληπτικού έργου που διενεργήθηκε αντλητική δοκιμή, ώστε να γίνει η απαραίτητη διόρθωση των τιμών αυτών (υπολογιστικά για την πρώτη περίπτωση, εκτιμητικά για την δεύτερη), στο σύνολο των χωρικά κατανεμημένων τιμών που υιοθετήθηκαν για την κατάρτιση του μαθηματικού ομοιώματος της περιοχής έρευνας, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 13). Από την εξέταση των δεδομένων, δεν προέκυψε ανάγκη ουσιαστικών διορθωτικών παρεμβάσεων και ως εκ τούτου έχουν διατηρηθεί οι αρχικά υπολογισμένες τιμές υδραυλικών παραμέτρων.



Εικόνα 6.4. Μεθοδολογία ανάλυσης δοκιμών άντλησης.



Εικόνα 6.5. Χωρική κατανομή των υπολογιζόμενων τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας K (m/d) (Ραπαγορούλιος 1995).



Εικόνα 6.6. Χωρική κατανομή των υπολογιζόμενων τιμών της αποθηκευτικότητας S (Panagoroulos 1995).

Από τα lithολογικά χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων καθώς και από τη μορφή των καμπυλών πτώσης στάθμης, που προέκυψαν από όλες τις δοκιμές άντλησης, προέκυψε το συμπέρασμα ότι στην περιοχή ο υδροφόρος έχει τα χαρακτηριστικά ενός υπό-πίεση ή ενός οριζοντα με διαρροές (μερικής υπό πίεση).

Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίστηκαν από τις υπολογιζόμενες τιμές μεταβιβαστικότητας, χρησιμοποιώντας τη σχέση: $T = K \cdot D$, όπου D το πάχος του υδροφόρου. Δεδομένου ότι, οι εξεταζόμενες γεωτρήσεις δεν διεισδύουν σε όλο το πάχος του υδροφόρου, ο οποίος είναι ετερογενής και μη ισότροπος σε κλίμακα γεώτρησης, το D έπρεπε να οριστεί με ορθό μια αντιπροσωπευτικό τρόπο στο πλαίσιο της έρευνας. Η χρήση του D, ως το συνολικό πάχος του υδροφόρου, θα ήταν προφανώς μια εσφαλμένη επιλογή, καθώς το νερό δεν αντλείται από όλο το πάχος αυτού, αν και η μερική διείσδυση στον υδροφόρο επιφέρει κατακόρυφες ροές, με αποτέλεσμα το νερό να αντλείται τουλάχιστον στα τελευταία στάδια των δοκιμών και από τμήμα του συστήματος που δεν έχει διατηρηθεί. Έτσι, ορίστηκε το "αποδοτικό" πάχος, ως το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου, το οποίο υδρομαστεύει η γεώτρηση και το οποίο υπολογίζεται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της. Με βάση το πάχος αυτό υπολογίστηκαν οι υδραυλικές αγωγιμότητες, μέσω της μεταβιβαστικότητας και προήλθε ο χάρτης της χωρικής κατανομής της (Εικόνα 6.5). Από τη μελέτη του χάρτη αυτού, δεν παρατηρείται κάποια συστηματική τάση του K,

γεγονός το οποίο υποδηλώνει την έντονη ετερογένεια του υπό εξέταση υδατικού συστήματος.

Επιπλέον, από την Εικόνα 6.6, προκύπτει ότι και η χωρική κατανομή των υπολογιζόμενων τιμών της αποθηκευτικότητας, δεν αποδίδει συγκεκριμένη τάση. Πολλές από τις υπολογιζόμενες αυτές τιμές είναι ακραίες και για το λόγο αυτό θεωρούνται περιορισμένης σημασίας. Για παράδειγμα, μια τιμή αποθηκευτικότητας 0.5 είναι εξαιρετικά απίθανο να είναι αντιπροσωπευτική του υπό μελέτη συστήματος, ειδικά όταν οι επικρατούσες συνθήκες θεωρήθηκαν ως υπό-πίεση ή μερικώς υπό-πίεση. Όπως υποδεικνύεται από τη βιβλιογραφία, αν και οι τιμές μεταβιβασιμότητας μπορούν να εξαχθούν με ακρίβεια, παρόλα αυτά η εκτίμηση της αποθηκευτικότητας συνήθως δεν είναι δυνατή, από τις δοκιμές άντλησης των γεωτρήσεων από τις οποίες προήλθαν οι μετρήσεις (Rushton 1978, Walton 1970, Panagouros 1995).

Από τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους χάρτες χωρικής κατανομής (Εικόνες 6.5 & 6.6), κανένα δεν προέρχεται από γεωτρήσεις στο καρστικό σύστημα, καθώς μόνο τέσσερις τέτοιες δοκιμές ήταν διαθέσιμες και η εγκυρότητά τους αμφισβητείται, λόγω της ξεχωριστής ετερογένειας από την οποία χαρακτηρίζεται το καρστικό σύστημα σε κλίμακα γεώτρησης. Συνεπώς, οι συμβατικές μέθοδοι ανάλυσης συνήθως δεν είναι εφαρμόσιμες σε αυτές τις περιπτώσεις. Με βάση τη βιβλιογραφία (Constandinidis 1978), προτείνεται μια τιμή αποθηκευτικότητας για το καρστικό σύστημα $S = 0.18$ και μια "ισοδύναμη" μέση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας K της τάξης των 0.03 m/sec (ή $2,592 \text{ m/day}$).

Παρά τους περιορισμούς σχετικά με την δυνατότητα εφαρμογής των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από τις αναλύσεις δοκιμών άντλησης, οι εκτιμώμενες υδραυλικές παράμετροι θεωρήθηκαν χρήσιμες στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, καθώς απέδωσαν την τάξη μεγέθους κύμανσης των τιμών των παραμέτρων αυτών. Επιπλέον αποτελούν μια πρόσθετη απόδειξη της ισχυρής ετερογένειας του συστήματος και ελλείψει εναλλακτικών επιλογών, χρησιμοποιήθηκαν ως κατευθυντήρια γραμμή για να ρυθμιστεί το μοντέλο ροής υπόγειων υδάτων, το οποίο θα αναπτυχθεί στο 13^ο Κεφάλαιο.

6.4. ΠΗΓΕΣ

Οι πηγές και οι αναβλύσεις συνδέονται στενά με τον κύκλο του νερού στη φύση, την υδρολογική ισορροπία και το υδρολογικό ισοζύγιο του υπόγειου νερού. Υδρογεωλογικά, οι πηγές και γενικά οι αναβλύσεις αποτελούν στην πραγματικότητα σημεία ή περιοχές φυσικής εκφόρτισης των υδροφόρων στρωμάτων που ελέγχονται από τη στρωματογραφία και τη συνολική γεωμετρία τους, όπως έχει διαμορφωθεί τόσο από την ανάπτυξη καρστικών μορφών, όσο και την τεκτονική δράση. Οι πηγές

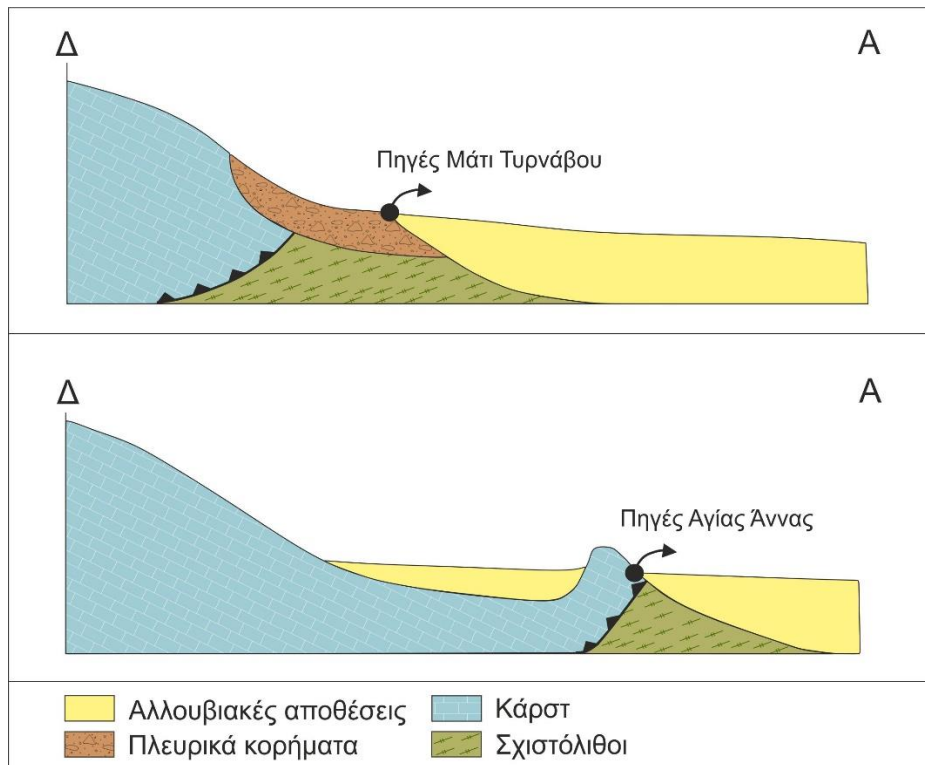
εμφανίζονται εκεί που η στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του εδάφους. Είναι ο γεωμετρικός τόπος της τομής του υδροφόρου με τη στάθμη του εδάφους (Βλαχόπουλος 2016). Γι' αυτό εμφανίζονται γεωμορφολογικά στα χαμηλότερα σημεία, στο επίπεδο βάσης, εκτός από τις πηγές που συνδέονται με επικρεμάμενους υδροφόρους. Έτσι, αν και αποτελούν επιφανειακές εμφανίσεις υδάτων ουσιαστικά πρόκειται για υπόγεια ύδατα (προερχόμενα από υπόγειους υδροφόρους) και ως τέτοια αντιμετωπίζονται και στην παρούσα έρευνα.

Οι πηγές εμφανίζονται με πολλές μορφές και η κατάταξή τους γίνεται με διάφορα κριτήρια, όπως το σημείο εμφάνισης, την κινούσα δύναμη, το διαμορφωμένο υδραυλικό φορτίο και τα χαρακτηριστικά του σημείου εμφάνισης (Στουρνάρας 2007). Στην περιοχή έρευνας, δύο είναι οι κύριες πηγές που συμμετέχουν και επηρεάζουν το υδρολογικό ισοζύγιο του υδατικού συστήματος, οι πηγές Μάτι Τυρνάβου (Εικόνες 6.7, 6.8) και οι πηγές Αγίας Άννας (Εικόνες 6.7, 6.9). Πρόκειται για καρστικές πηγές υπερπλήρωσης, πηγές δηλαδή όπου η επαφή μεταξύ υδροπερατού και αδιαπέρατου, η οποία είναι υπεύθυνη για τη συγκέντρωση του νερού, βρίσκεται τόσο σε μεγαλύτερα όσο και σε μικρότερα υψόμετρα από το υψόμετρο του σημείου εκδήλωσης της πηγής. Η γεωμετρία και ο μηχανισμός εκδήλωσης των συγκεκριμένων πηγών έχουν μελετηθεί συστηματικά σε παλαιότερες ερευνητικές εργασίες (Κωνσταντινίδης 1986, Μαρίνος κ.α. 1997).

Οι δύο αυτές πηγές βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας (Εικόνα 6.7), στην επαφή του καρστικού συστήματος με τα προσχλωσιγενή ιζήματα της υπολεκάνης και μέσω αυτών εκφορτίζεται ο καρστικός όγκος, ο οποίος τροφοδοτεί την αλλουβιακή υπολεκάνη. Οι πηγές αυτές, αποτελούν την επιφανειακή εκδήλωση της εκφόρτισης του καρστικού συστήματος προς το αλλουβιακό πεδίο της υπολεκάνης Τυρνάβου.

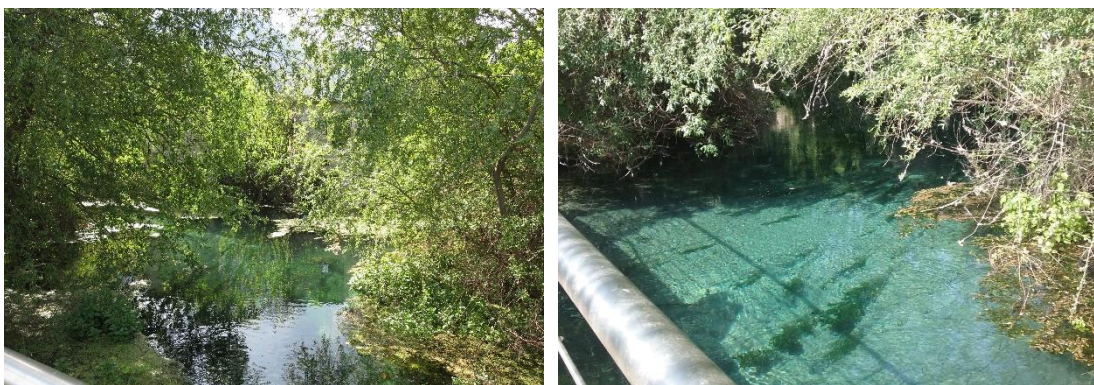
Η γεωμετρία των πηγών αυτών απεικονίζεται στις εγκάρσιες τομές της Εικόνας 6.7. Όπως φαίνεται, οι πηγές Μάτι Τυρνάβου σχηματίζονται στην επαφή των πλευρικών κορημάτων των με τα αλλουβιακά ιζήματα της υπολεκάνης του Τυρνάβου. Τα πλευρικά αυτά κορήματα αποτελούν ουσιαστικά ρυθμιστικό παράγοντα της ροής των συγκεκριμένων πηγών. Από την άλλη πλευρά, οι πηγές της Αγίας Άννας αναδύονται στην επαφή μεταξύ ενός μικρού καρστικού θόλου με τα αλλουβιακά ιζήματα, χωρίς την παρεμβολή των πλευρικών κορημάτων, που παίζουν το ρόλο ρυθμιστή στην προηγούμενη περίπτωση.

Σημειώνεται ότι, στο ΝΔ άκρο της περιοχής έρευνας, στην είσοδο του ποταμού Πηνειού στην υπολεκάνη Τυρνάβου, υπάρχουν οι πηγές της Αμυγδαλέας. Ωστόσο εξαιτίας της ελάχιστης (έως μηδενικής) παροχής τους αλλά και του παροδικού τους χαρακτήρα, δεν εξετάζονται στην παρούσα διατριβή.



Εικόνα 6.7. Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας των καρστικών πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας (χωρίς κλίμακα, Κωνσταντινίδης 1986).

Σημειώνεται επίσης ότι, στην παράγραφο αυτή αναφέρθηκαν τα γενικά στοιχεία των πηγών της περιοχής έρευνας καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Αναφορικά με τα ποσοτικά στοιχεία των πηγών (υδρογραφήματα, παροχές κ.α.) και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυσή τους, αυτά θα αναφερθούν διεξοδικά στο επόμενο Κεφάλαιο.



Εικόνα 6.8. Εμφάνιση των πηγών Μάτι Τυρνάβου στο ΒΔ τμήμα της περιοχής έρευνας.



Εικόνα 6.9. Εμφάνιση πηγών Αγίας Άννας βόρεια της πόλης του Τυρνάβου.

7 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων και της εξέλιξής της βασίζονται στην διαχρονική παρακολούθηση της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδατικού συστήματος. Ως πιεζομετρική επιφάνεια, ορίζεται η νοητή επιφάνεια που σχηματίζεται από την στάθμη των υπογείων υδάτων λόγω υδροστατικής πίεσης. Η παρακολούθηση αυτή επιτρέπει τη μελέτη των συνθηκών κίνησης του υπόγειου νερού, την εκτίμηση της υδραυλικής κλίσης και κατ' επέκταση τον εντοπισμό των κυρίων αξόνων υπόγειας ροής και των ζωνών τροφοδοσίας και εκφόρτισης των υδροφόρων. Παράλληλα οι εποχικές διακυμάνσεις της πιεζομετρικής επιφάνειας επιτρέπουν τη μελέτη των μεταβολών του όγκου των υπόγειων νερών και της αναπλήρωσης των αποθεμάτων τους (Sarma 2008).

Η υπόγεια στάθμη (ή πιεζομετρική στάθμη) του νερού, εξαρτάται από το είδος του υδροφόρου και μεταβάλλεται με την εποχή του έτους και ανάλογα με τη δίαιτα του υδροφόρου. Η κίνηση του υπόγειου νερού στην υδρολογική λεκάνη, εκτός από την πιεζομετρική επιφάνεια, ελέγχεται τόσο από την τεκτονική δομή των σχηματισμών, όσο και από την υδρολιθολογική τους συμπεριφορά (Σούλιος 1986, Λάμπας 2018).

Τέλος, η διαχρονική μελέτη των πιεζομετρικών στάθμεων σε μια λεκάνη απορροής, αποτελεί δείκτη της υδροδυναμικής λειτουργίας και εξέλιξης του υδατικού συστήματος καθώς συστηματικές πτώσεις ή άνοδοι της στάθμης μαρτυρούν γεγονότα, μικρής ή μεγάλης κλίμακας, που συνδέονται άμεσα με την ελάττωση ή αύξηση αντίστοιχα των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων.

7.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Η συλλογή πρωτογενών δεδομένων αποτελεί μία σχετικά επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία για κάθε ερευνητική εργασία. Ιδιαίτερα όταν τα πρωτογενή αυτά δεδομένα πρέπει να ληφθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα, που μπορεί να επιφέρουν σημαντικές αλλοιώσεις στην ερμηνεία τους. Αξιόπιστα πρωτογενή δεδομένα βασίζονται σε επαρκώς και κατάλληλα τεκμηριωμένα δίκτυα παρακολούθησης. Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν, τόσο τη σημασία των πρωτογενών δεδομένων, τα οποία αποτελούν θεμέλιο λίθο για την παρούσα διατριβή, αλλά και την ιδιαίτερη προσοχή που δόθηκε για τη συλλογή τους, αναφέρονται στη συνέχεια αναλυτικά οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, έτσι ώστε να συσταθούν αξιόπιστα δίκτυα παρακολούθησης ποσοτικών και ποιοτικών (Κεφάλαιο 8) χαρακτηριστικών για την περιοχή έρευνας.

7.2.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

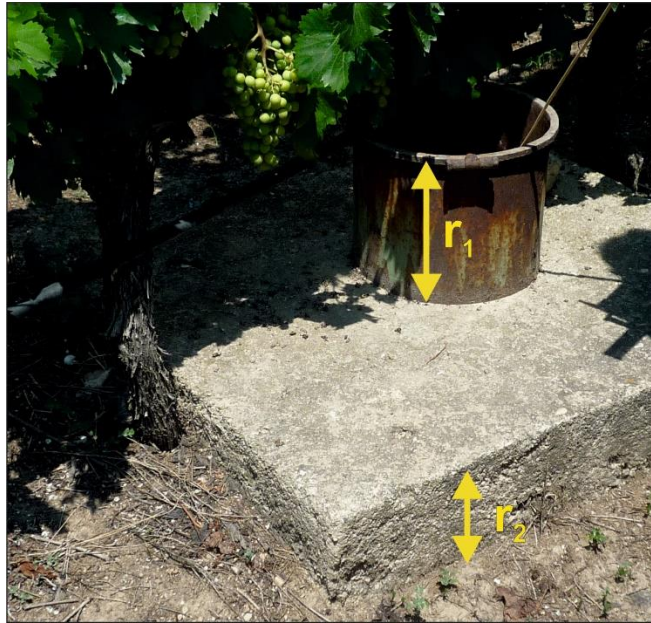
Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, έχοντας σκοπό τη μελέτη της πιεζομετρικής επιφάνειας, παράλληλα με το δίκτυο ποιοτικής παρακολούθησης των υδάτων (βλ. επόμενο Κεφάλαιο), συστάθηκε και αντίστοιχο δίκτυο παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης του υδροφόρου συστήματος.

Το σκεπτικό της σύστασης του δικτύου παρακολούθησης για την ποσοτική εκτίμηση της κατάστασης στην περιοχή έρευνας, είχε να κάνει τόσο με την αντιπροσωπευτικότητα των θέσεων παρακολούθησης όσο και με την προσπάθεια να υπάρχουν κοινά ζεύγη μετρήσεων, ποσότητας και ποιότητας. Με βάση το σκεπτικό αυτό τα βασικά κριτήρια της σύνθεσης του δικτύου παρακολούθησης, αναφορικά με τα ποσοτικά δεδομένα της περιοχής, ήταν τα εξής:

- α) να υπάρχει πλήρης και αντιπροσωπευτική κάλυψη όλων των υδροφόρων σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή,
- β) να υπάρχει πλήρης κάλυψη όλης της έκτασης των υδροφόρων αυτών αλλά και κρίσιμες περιοχές περιμετρικά από αυτούς, ώστε να καθίσταται δυνατή η μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος και κατ' επέκταση η περιγραφή και σύνθεση των οριακών συνθηκών, που θα τροφοδοτήσουν το μαθηματικό μοντέλο υπόγειας ροής,
- γ) να υπάρχουν διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα και ως εκ τούτου επιλέχθηκαν κοινές θέσεις με το δίκτυο παρακολούθησης της Διεύθυνσης Υδάτων Θεσσαλίας, προκειμένου να καταστεί δυνατή η διαχρονική μελέτη της εξέλιξης της υπόγειας υδροφορίας,
- δ) σε κάθε θέση του δικτύου, παράλληλα με τη μέτρηση της υπόγειας στάθμης, να μπορεί να πραγματοποιηθεί και ταυτόχρονη δειγματοληψία νερού.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω κριτήρια ξεκίνησαν αποστολές πεδίου τον Ιούνιο του 2016 και ολοκληρώθηκαν στα τέλη Αυγούστου του ίδιου έτους, με την αρωγή του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων (πρώην Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων) του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού «ΔΗΜΗΤΡΑ», με σκοπό την σύνθεση του δικτύου παρακολούθησης.

Η απογραφή των δυνητικών θέσεων παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης γινόταν σε ειδικά διαμορφωμένο δελτίο απογραφής (κοινό με το απογραφικό δελτίο των δειγματοληψιών, Παράρτημα 1, Εικόνα Ε1.1), στο οποίο γινόταν αναφορά στη δυνατότητα (ή μη) σταθμημέτρησης για τη συγκεκριμένη θέση καθώς και στον τρόπο επίτευξής της (σημείο σταθμημέτρησης). Επίσης, κατά την απογραφή της κάθε θέσης, καταγραφόταν η διόρθωση εδάφους (repair), η οποία έπρεπε μετέπειτα να αφαιρείται (ή να προστίθεται) κάθε φορά που γινόταν η μέτρηση, έτσι ώστε να υπάρχει ως επίπεδο αναφοράς το έδαφος (Εικόνα 7.1).



Εικόνα 7.1. Καταγραφή διόρθωσης εδάφους στη θέση SR39 ($repair=r_1+r_2$).

Οι μετρήσεις της στάθμης πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση 2 σταθμημέτρων του ιταλικού οίκου PASI, μήκους 100 και 150 μέτρων. Τα συγκεκριμένα σταθμημέτρα αποτελούνται από στρόγγυλο καλώδιο PVC με ενίσχυση Kevlar, μεγάλης ανθεκτικότητας, διαθέτουν οπτική και ηχητική ένδειξη της στάθμης καθώς και δεύτερη εξωτερική προστασία για την αποφυγή αλλοίωσης των ενδείξεων βάθους στάθμης από αμυχές στα μεταλλικά μέρη της σωλήνωσης των γεωτρήσεων. Η αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά των εν λόγω οργάνων, έγινε σκόπιμα γιατί λόγω της φύσης της συγκεκριμένης εργασίας πεδίου αλλά και των προβλημάτων που αναφέρονται στη συνέχεια, η χρήση οργάνων υψηλής λειτουργικότητας αποτέλεσαν καθοριστικό αρωγό στην επίτευξη των στόχων της παρούσας διατριβής. Η καταγραφή της στάθμης γινόταν σε συγκεκριμένο χώρο στο ειδικά διαμορφωμένο Δελτίο Δειγματοληψίας (κοινό με το καταγραφικό δελτίο των δειγματοληψιών, Παράρτημα 1, Εικόνα Ε1.3), αφού πρώτα γινόταν η διόρθωση εδάφους, όπως αυτή είχε καταγραφεί κατά τη διάρκεια της απογραφής. Η συστηματική χρήση των ίδιων σταθμημέτρων σε κάθε θέση παρακολούθησης και σε κάθε περίοδο μέτρησης, εξασφάλισε την συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων, αποφεύγοντας πιθανά σφάλματα λόγω της εύλογης επιμήκυνσης των καλωδίων που επέρχεται με το χρόνο και την έντονη χρήση των σταθμημέτρων. Για τον ίδιο λόγο πραγματοποιήθηκε και περιοδικός έλεγχος της απόκλισης των μετρήσεων μεταξύ των δύο σταθμημέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τον σκοπό αυτό.

Η εξερεύνηση θέσεων σταθμημέτρησης αποτελεί μια συχνά χρονοβόρα εργασία που εν δυνάμει συνοδεύεται από αστοχίες, λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες που εγγενώς υπάρχουν, αναφορικά με τη σύσταση δικτύων παρακολούθησης υπόγειας στάθμης,

τουλάχιστον στη χώρα μας και ειδικότερα στην περιοχή έρευνας. Οι δυσκολίες αυτές σχετίζονταν με:

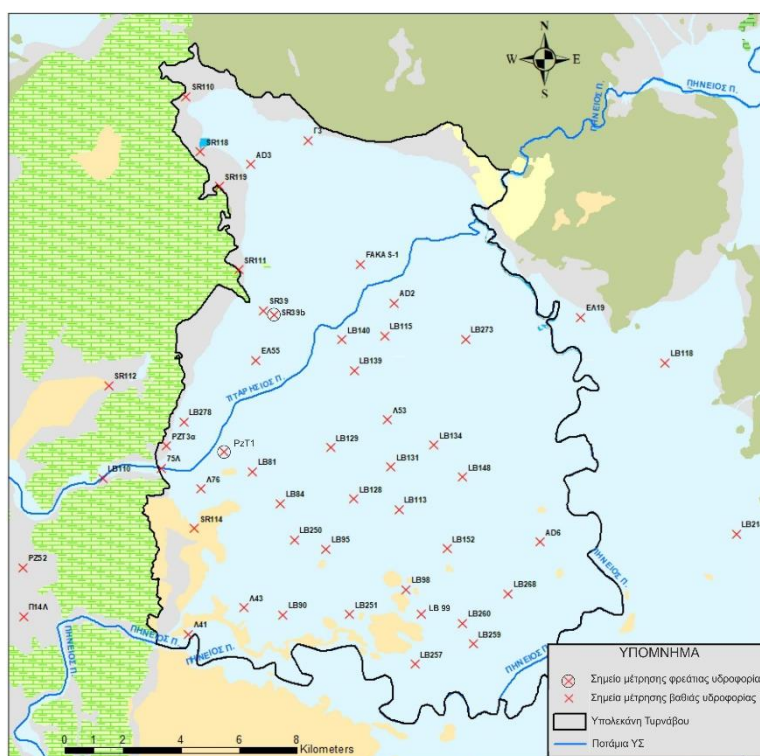
i) τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υδροληπτικών έργων (π.χ. μεγάλη δυσκολία εξεύρεσης γεωτρήσεων εξοπλισμένων με πιεζομετρικούς σωλήνες) και

ii) τη δυσκολία εξεύρεσης γεωτρήσεων εκτός περιοχών Τ.Ο.Ε.Β.

Η συντριπτική πλειοψηφία των γεωτρήσεων στην περιοχή έρευνας, όπως και σε ολόκληρη τη Θεσσαλία, είτε στερούνται πιεζομετρικού σωλήνα είτε όπου αυτός υπάρχει παρουσιάζει έμφραξη και επομένως δεν είναι λειτουργικός. Η δυσκολία αυτή αντιμετωπίστηκε προσπαθώντας να εντοπιστούν γεωτρήσεις χωρίς αντλητικά συγκροτήματα, οι οποίες αντικαταστάθηκαν με νέες παραγωγικές γεωτρήσεις πλησίον των παλαιών, επιβεβαιώνοντας στον βαθμό που αυτό ήταν εφικτό, ότι οι γεωτρήσεις αυτές δεν ήταν κατεστραμμένες σε βαθμό που δεν απέδιδαν την μέση πιεζομετρική στάθμη ηρεμίας της περιοχής. Ο παράγοντας αυτός εξασφαλίστηκε με μέτρηση του βάθους των γεωτρήσεων αυτών. Όπου το βάθος του έργου βρέθηκε ίδιο με το περιγραφόμενο από τον ιδιοκτήτη του έργου ή την λιθολογική του τομή (όπου υπήρχε διαθέσιμη), ή συναφές με το μέσο βάθος των γειτονικών γεωτρήσεων, θεωρήθηκε ότι η θέση είναι κατάλληλη για εκτέλεση μετρήσεων στάθμης και ένταξής της στο δίκτυο. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι μη εξοπλισμένες γεωτρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν ως πιεζόμετρα για την καταγραφή της στάθμης. Επίσης, σε γεωτρήσεις εξοπλισμένες με αντλητικό σύστημα κατακόρυφου άξονα (πομόνα), γινόταν προσπάθεια να βρεθεί κενό στην κεφαλή της γεώτρησης, μεταξύ της σωλήνωσης και του κατακόρυφου άξονα, έτσι ώστε να μετρηθεί η στάθμη από το διάκενο μεταξύ τους. Στις εξοπλισμένες με υποβρύχιο αντλητικό συγκρότημα γεωτρήσεις, κατ' αντιστοιχία γινόταν προσπάθεια μέτρησης της στάθμης στο διάκενο μεταξύ σωλήνωσης και του συγκροτήματος καλωδίων και καταθλιπτικού αγωγού. Σημειώνεται ότι στις δύο τελευταίες περιπτώσεις, υπήρχε το ενδεχόμενο μη δυνατότητας μέτρησης της στάθμης από περίοδο σε περίοδο, λόγω μη μόνιμης διαδρομής καθόδου του σταθμημέτρου. Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων στάθμης, ήταν συχνή η αντιμετώπιση περιπτώσεων παγίδευσης του σταθμημέτρου εντός των γεωτρήσεων λόγω του «ανορθόδοξου» τρόπου μέτρησης που επιβλήθηκε εξαιτίας των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των έργων. Σε αρκετές περιπτώσεις, αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την απώλεια ορισμένων μέτρων μήκους του σταθμημέτρου.

Στις περιοχές όπου δεν υπήρχαν συλλογικά αρδευτικά δίκτυα (περιοχές εκτός Τ.Ο.Ε.Β.), οι περισσότερες γεωτρήσεις που υπάρχουν είχαν κατασκευαστεί στο παρελθόν, χωρίς αδειοδότηση και στερούνται πιεζομετρικού σωλήνα, καθώς δεν θεωρούταν επιβεβλημένη/χρήσιμη η εγκατάστασή του. Εκτός από το γεγονός αυτό, η επιφυλακτικότητα των ιδιοκτητών για την χρήση της γεώτρησής τους για ερευνητικούς σκοπούς, υπό τον φόβο του ελέγχου, δυσχέραινε την προσπάθεια για επαρκή κάλυψη των περιοχών αυτών.

Παρόλες τις δυσκολίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, το τελικό δίκτυο που συστάθηκε, αποτελούνταν από 48 θέσεις παρακολούθησης. Από αυτές, οι 41 γεωτρήσεις βρίσκονται εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου, οι 4 γεωτρήσεις στη δυτική περίμετρο της υπολεκάνης, προς την περιοχή του Δαμασίου και οι 3 θέσεις παρακολούθησης βρίσκονται στην προέκταση της υπολεκάνης, προς τα ανατολικά. Από το σύνολο των θέσεων του παρόντος δικτύου, οι 39 είναι ταυτόχρονα και θέσεις δειγματοληψίας (ποσοστό 81.25%), ενώ οι 13 θέσεις εξ αυτών ανήκουν στο υπό λειτουργία δίκτυο της Διεύθυνσης Υδάτων Θεσσαλίας. Στην Εικόνα 7.1 που ακολουθεί αποτυπώνεται το δίκτυο παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης, όπως αυτό συστάθηκε αποκλειστικά για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας.



Εικόνα 7.2. Δίκτυο παρακολούθησης υπόγειας στάθμης για την περιοχή μελέτης.

Σημειώνεται ότι όλες οι μετρήσεις της πιεζομετρικής στάθμης αφορούσαν τον βαθύτερο υπό πίεση υδροφόρο οπότε και οι πιεζομετρικοί χάρτες που εξήχθησαν στην συνέχεια αναφέρονται σε αυτήν την υδροφορία. Πρωτογενή δεδομένα στάθμωων, αναφορικά με την φρεατία υδροφορία, υπάρχουν μόνο από μία θέση (PzT1), καθώς οι υπόλοιπες από τις ούτως ή άλλως λίγες θέσεις μέτρησης αυτής της υδροφορίας, βάσει παλαιότερων μελετών, είτε καταστράφηκαν είτε σφραγίσθηκαν. Σε κάθε περίπτωση η υδροφορία αυτή, λόγω της μικρής της δυναμικής και των συνεχόμενων υπεραντλήσεων τα τελευταία χρόνια, τείνει τα εξαντληθεί μόνιμα.

7.2.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Μετά την σύσταση του δικτύου παρακολούθησης της πιεζομετρικής επιφάνειας ξεκίνησε ο προγραμματισμός για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της υπόγειας στάθμης. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 5 περίοδοι μετρήσεων, ενώ σε κάποιες από τις θέσεις μετρήθηκε η υπόγεια στάθμη και κατά τη διάρκεια της απογραφής. Ωστόσο, εξαιτίας του γεγονότος ότι η απογραφή πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου (Ιούνιος-Αύγουστος 2016), οι περισσότερες γεωτρήσεις ήταν σε λειτουργία. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα είτε τη μη δυνατότητα μέτρησης ή στην περίπτωση που μπορούσε να μετρηθεί, θα αφορούσε τη στάθμη άντλησης. Οι 4 από τις 5 περιόδους σταθμημετρήσεων ήταν προγραμματισμένες εξ' αρχής, διότι αποτελούσαν τις κοινές περιόδους με την αντίστοιχες των δειγματοληψιών, καθώς αυτός ήταν και ένας από τους βασικούς λόγους επιλογής των θέσεων μέτρησης, να μπορούν δηλαδή να μετρηθούν ταυτόχρονα τα ποιοτικά δεδομένα (δειγματοληψίες νερού) με τα ποσοτικά (υπόγεια στάθμη). Το βασικό σκεπτικό για τον καθορισμό των προγραμματισμένων περιόδων ήταν να μετρηθούν οι υπόγειες στάθμες πριν την έναρξη και μετά το τέλος της αρδευτικής περιόδου, περίοδοι που είναι υδρολογικά σχετιζόμενες με το πέρας της υγρής και της ξηρής περιόδου, αντίστοιχα. Στοιχεία αναφορικά με την μία έκτακτη περίοδο σταθμημετρήσεων θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Το πιο σημαντικό πρόβλημα που προέκυψε κατά τη διάρκεια όλων των μετρήσεων της υπόγειας στάθμης, είχε να κάνει με το συντονισμό όλων των εμπλεκόμενων φορέων και ιδιωτών για τη διάθεση των γεωτρήσεων πριν την έναρξη και μετά το τέλος της αρδευτικής περιόδου. Λόγω των έντονων φαινομένων κλοπής καλωδίων και άλλων εξαρτημάτων από τα αντλητικά συγκροτήματα, οι περισσότεροι από τους οικίσκους των γεωτρήσεων παραμένουν σφραγισμένοι (ηλεκτροσυγκολλημένοι σε αρκετές περιπτώσεις) κατά τη διάρκεια του έτους, εκτός της αρδευτικής περιόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στις περιπτώσεις μέτρησης της στάθμης από σημείο εντός του οικίσκου, να χρειάζεται απόλυτος συντονισμός, έτσι ώστε να μετρηθεί η στάθμη πριν και μετά την αρδευτική περίοδο. Λαμβάνοντας υπόψη, ότι το σύνολο των θέσεων ανήκουν σε 5 Τ.Ο.Ε.Β. (3 εντός περιοχής και 2 περιμετρικά αυτής), αλλά και ιδιώτες, που ο καθένας μπορεί να έχει διαφορετικό πρόγραμμα έναρξης και λήξης αρδεύσεων ανάλογα με τις καλλιέργειες, γίνεται σαφής η δυσκολία στο συντονισμό των μετρήσεων, έτσι ώστε να συλλεχθούν όσο το δυνατό περισσότερα αλλά πρωτίστως και ορθά δεδομένα. Ιδιαίτερα στην τελευταία περίοδο μετρήσεων, ο συντονισμός έγινε ακόμα πιο περίπλοκος λόγω των προβλημάτων με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Στη συνέχεια αναφέρονται τα δεδομένα και ο χρόνος πραγματοποίησης για κάθε μία από τις περιόδους των μετρήσεων στάθμης.

Η πρώτη περίοδος έλαβε χώρα κατά το χρονικό διάστημα 14-29 Σεπτεμβρίου το 2016 και ήταν κοινό με τις αντίστοιχες δειγματοληψίες. Ήταν η πρώτη αναγνωριστική περίοδος μετρήσεων αμέσως μετά το τέλος της επεξεργασίας των δεδομένων της απογραφής και της σύστασης των δικτύων παρακολούθησης (ποιοτικών-ποσοτικών). Η υπόγεια στάθμη μετρήθηκε σε συνολικά 45 θέσεις, εκ των οποίων οι 40 ήταν εντός της περιοχής έρευνας και οι υπόλοιπες 5 περιμετρικά αυτής.

Η δεύτερη περίοδος πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα από 5 Απριλίου έως 10 Μάϊου του 2017, δηλαδή προς τα τέλη της υγρής περιόδου και την εμφάνιση της υψηλής στάθμης. Ταυτόχρονα την ίδια περίοδο πραγματοποιήθηκε και η αντίστοιχη συλλογή των δειγμάτων νερού. Αφορούσε την πρώτη υγρή περίοδο μετρήσεων πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου. Συνολικά ελήφθησαν μετρήσεις υπόγειας στάθμης από 38 θέσεις, εκ των οποίων οι 32 εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου και οι υπόλοιπες 6 περιμετρικά από αυτήν.

Κατά το χρονικό διάστημα 29 Αυγούστου-13 Σεπτεμβρίου του 2017, δηλαδή προς τα τέλη της ξηρής περιόδου, έλαβε χώρα η τρίτη προγραμματισμένη κοινή περίοδος μετρήσεων πεδίου (ποσοτικών και ποιοτικών). Κλείνοντας με την προηγούμενη περίοδο ένα ζεύγος μετρήσεων ξηρής-υγρής περιόδου, ξεκίνησε ο δεύτερος κύκλος συλλογής των δεδομένων (2^{ος} χρόνος) ξηρής περιόδου. Ουσιαστικά, εκτός τις επιπλέον ποσοτικής πληροφορίας, ο δεύτερος αυτός κύκλος είχε και το ρόλο της επαλήθευσης των δεδομένων του πρώτου έτους μετρήσεων. Κατά της περίοδο αυτή ελήφθησαν 38 μετρήσεις υπόγειας στάθμης, εκ των οποίων 33 εντός και 5 εκτός (περιμετρικά) της περιοχής έρευνας.

Παρατηρώντας τις μεγάλες αποκλίσεις, που παρουσίαζαν τα υψόμετρα εδάφους των θέσεων του δικτύου, ανάλογα με την πηγή προέλευσης (GPS, Διεύθυνση Υδάτων Θεσσαλίας, Διαχειριστικές μελέτες κ.α.), αλλά και της σημαντικότητας του υψομέτρου στην εξαγωγή του απόλυτου υψομέτρου της υπόγειας στάθμης, προέκυψε η ανάγκη για την αποτύπωση και καταγραφή των υψομέτρων με όσο τον δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, την περίοδο 11-12 Δεκεμβρίου του 2017, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί, για πρώτη φορά στην περιοχή έρευνας, η καταγραφή και αποτύπωση των ακριβών υψομέτρων με την χρήση διαφορικού GPS υψηλής ακρίβειας. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Real Time Kinematic (RTK) – GPS, Epoch 50, της εταιρίας Spectra Geospatial, το οποίο έχει τη δυνατότητα της online διόρθωσης των σφαλμάτων που προκύπτουν από τέτοιου είδους μετρήσεις και της αποτύπωσης του υψομέτρου με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η ακρίβεια στην αποτύπωση του υψομέτρου είναι μεγάλης σημασίας, έτσι ώστε να γίνει η σωστή μέτρηση των απόλυτων υψομέτρων της υπόγειας στάθμης και στη συνέχεια η εξαγωγή των πιεζομετρικών χαρτών. Η ερμηνεία των πιεζομετρικών χαρτών μπορεί να δώσει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα όταν οι διαφορές στα υψόμετρα είναι σημαντικές, όπως θα ειπωθεί στην επόμενη παράγραφο. Παράλληλα, με την ακριβή αποτύπωση των υψομέτρων, πραγματοποιήθηκε και μέτρηση της υπόγειας στάθμης,

στις θέσεις όπου αυτό ήταν εφικτό, καθώς ήταν μια περίοδος αδράνειας των γεωτρήσεων, με τα προβλήματα που αυτό συνεπάγεται, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν προηγουμένως. Από τις συνολικά 48 επιλεγμένες θέσεις, όπου έγινε αποτύπωση του υψομέτρου, ελήφθησαν δεδομένα από 34 θέσεις μέτρησης, εκ των οποίων οι 32 βρίσκονται εντός και οι 2 περιμετρικά της περιοχής.

Η πέμπτη κατά σειρά περίοδος σταθμημετρήσεων (4^η προγραμματισμένη), έλαβε χώρα μαζί με τις δειγματοληψίες νερού, το χρονικό διάστημα από 2 Μαΐου έως 6 Ιουνίου 2018. Ήταν η τελευταία και ιδιαίτερη περίοδος συλλογής δεδομένων πεδίου, καθώς λόγω των μεγάλων οικονομικών εκκρεμοτήτων των Τ.Ο.Ε.Β. της περιοχής προς τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας, υπήρχε μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με το πότε και αν θα ηλεκτροδοτηθούν οι γεωτρήσεις. Έτσι, δεν υπήρχε ταυτόχρονο άνοιγμα και λειτουργία τους, ακόμα και για γεωτρήσεις του ίδιου Τ.Ο.Ε.Β., με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υπάρξει κατάλληλος προγραμματισμός, έτσι ώστε να ληφθούν οι μετρήσεις. Ο συνολικός απολογισμός ήταν 29 καταγραφές υπόγειων στάθμεων, με 22 θέσεις εντός τις περιοχής και 7 περιμετρικά. Λόγω του προβλήματος που αναφέρθηκε, πολλές από τις γεωτρήσεις λειτουργούσαν κατά την ημέρα της επίσκεψής μας σε αυτές, ενώ κάποιες δεν αποσφραγίσθηκαν καθόλου. Στον παρακάτω Πίνακα 7.1 αναφέρεται συνοπτικά το πλήθος των μετρήσεων υπόγειας στάθμης που επιτεύχθηκε σε κάθε περίοδο εργασιών, τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω ενώ στο Παράρτημα 1 (Πίνακας Π1.15) επισυνάπτονται οι αναλυτικές μετρήσεις της υπόγειας στάθμης για όλες τις περιόδους.

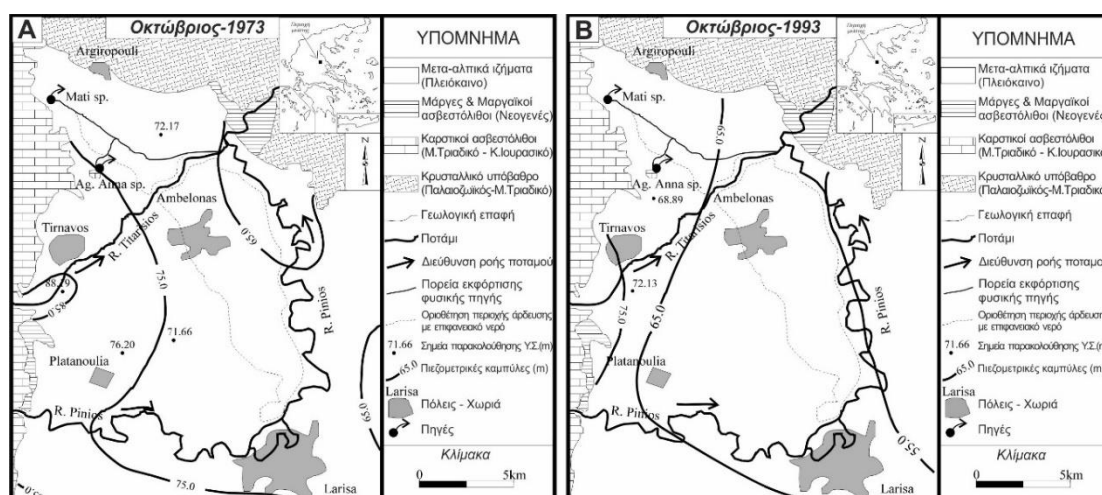
Πίνακας 7.1. Αριθμός σταθμημετρήσεων ανά περίοδο, εντός και περιμετρικά της υπολεκάνης

Περίοδος	Αριθμός σταθμημετρήσεων εντός της υπολεκάνης	Αριθμός σταθμημετρήσεων περιμετρικά της υπολεκάνης	Σύνολο σταθμημετρήσεων
<i>Σεπτέμβριος 2016</i>	41	5	46
<i>Απρίλιος-Μάιος 2017</i>	33	6	39
<i>Σεπτέμβριος 2017</i>	34	5	39
<i>Δεκέμβριος 2017</i>	32	2	34
<i>Μάιος-Ιούνιος 2018</i>	23	7	30

7.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ

7.3.1 ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ - ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΩΝ

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, τα πρωτογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν, αναφορικά με την υπόγεια στάθμη, αφορούσαν τον βαθύτερο υπό πίεση υδροφόρο. Διαθέσιμα δεδομένα που αφορούν την φρεάτια υδροφορία, αντλήθηκαν από προηγούμενες εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στην εν λόγω περιοχή έρευνας και αφορούν τα έτη 1973 (Sogreah 1974) και 1993 (Panagoroulos 1995) καθώς και από τη μοναδική θέση (PzT1) του δικτύου που συστάθηκε. Οι πιεζομετρικοί χάρτες των περιόδων 1973 και 1993 παρουσιάζονται στις Εικόνες 7.3Α και 7.3Β αντίστοιχα. Λόγω της έλλειψης πιεζομέτρων στη φρεάτια υδροφορία, η σχεδίαση των χαρτών αυτών βασίστηκε στις μετρήσεις τεσσάρων και δύο σημείων αντίστοιχα. Ως εκ τούτου οι πιεζομετρικές καμπύλες δεν αποτυπώνουν σε ικανοποιητικό βαθμό την υφιστάμενη πραγματικότητα. Έτσι, οι χάρτες αυτοί στερούνται ακρίβειας και χρησιμοποιούνται ως μια απλή ένδειξη σχετικά με τη θέση της πιεζομετρικής επιφάνειας.



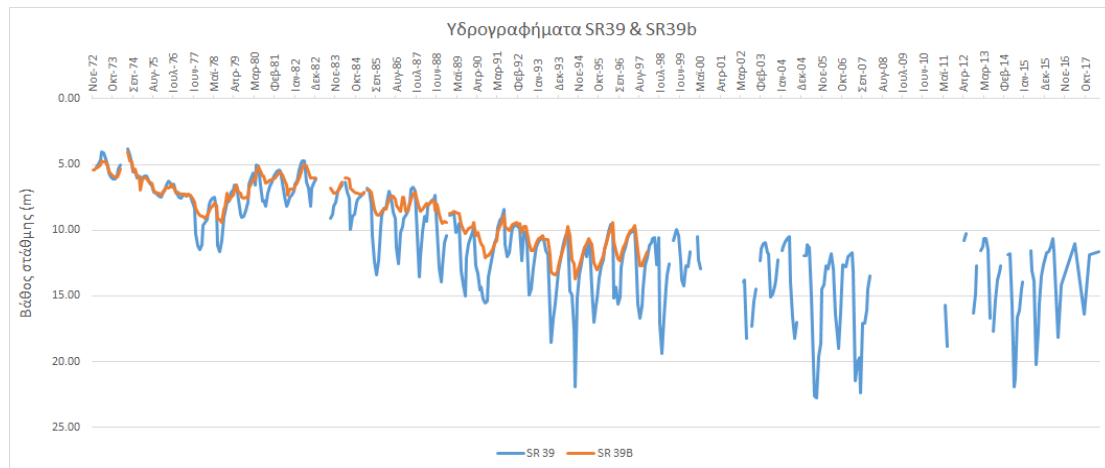
Εικόνα 7.3. Πιεζομετρικός χάρτης φρεάτιας υδροφορίας (Α) για τον Οκτώβριο του 1973 (Sogreah 1974) και (Β) για τον Οκτώβριο 1993 (Panagoroulos 1995).

Παρά την έλλειψη ικανοποιητικών δεδομένων για τη φρεάτια υδροφορία, από τη σύγκριση των χρονοσειρών μεταξύ δύο γειτονικών πιεζομέτρων, τα οποία αναφέρονται στις δύο διαφορετικές υδροφορίες, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την εξέλιξη του υδατικού συστήματος. Μια χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιων πιεζομέτρων είναι αυτή των SR39 και SR39b (Εικόνα 7.2). Το πιεζόμετρο SR39 αποδίδει την υπόγεια στάθμη της βαθιάς υδροφορίας μέχρι και σήμερα, καθώς αποτελεί και ένα από τα πιεζόμετρα του δικτύου παρακολούθησης της παρούσας έρευνας. Το πιεζόμετρο SR39b, το οποίο

βρίσκεται δίπλα στο προηγούμενο, μετρούσε αποκλειστικά τη φρεατία υδροφορία. Δυστυχώς, το συγκεκριμένο πιεζόμετρο έχει καταστραφεί και ως εκ τούτου δεν μπορούν πλέον να πραγματοποιηθούν μετρήσεις.

Στο Διάγραμμα 7.1 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα των δύο (2) προαναφερόμενων πιεζομέτρων, από το 1972 έως το 1997 για το SR39b και από το 1972 έως και σήμερα για το SR39. Από τη μελέτη των πιεζομετρικών χαρτών (7.3A & 7.3B) και των υδρογραφημάτων (Διάγραμμα 7.1) εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Από τις αποστάσεις των πιεζομετρικών καμπυλών της Εικόνας 7.3A προκύπτει ότι οι υδραυλικές κλίσεις κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70 δεν ήταν σημαντικές.
- Στην ίδια δεκαετία, η πιεζομετρική επιφάνεια του ανώτερου υδροφόρου ακολουθούσε το ίδιο μοτίβο με την πιεζομετρική επιφάνεια του βαθύτερου υδροφόρου, υποδηλώνοντας έτσι, ότι υπήρχε υδραυλική επικοινωνία και ισορροπία μεταξύ των δύο υδροφόρων.
- Με την έναρξη της εντατικής εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων στα μέσα της δεκαετίας του '80, η ισορροπία αυτή άρχισε να διαταράσσεται και οδήγησε σε εντελώς διαφορετικές συμπεριφορές τις πιεζομετρίας των δύο υδροφόρων.
- Ο βαθύτερος υδροφόρος παρουσιάζει σημαντική πτώση της πιεζομετρικής του επιφάνειας σε σύγκριση με την πιεζομετρική επιφάνεια του 1973. Ενδεικτικά, το βάθος στάθμης στην SR39 τον Σεπτέμβριο του 1973 ήταν 5.93m, τον Σεπτέμβριο του 1985 έπεσε στα 13.38m και τον Σεπτέμβριο του 1994 έφτασε στα 21.93m. Παρατηρείται δηλαδή μια πτώση στάθμης 16 μέτρων του βαθύτερου υδροφόρου μέσα σε 21 χρόνια, χαρακτηριστική της υπερεκμετάλλευσης που υπέστη από τα μέσα της δεκαετίας του '80 και μετά.
- Οι αντίστοιχες τιμές της υπόγειας στάθμης του ανώτερου υδροφόρου για τα προαναφερόμενα έτη (Σεπτεμβρίου) ήταν: 5.73m, 8.78m και 13.7m αντίστοιχα. Η πτώση δηλαδή του φρεατίου υδροφόρου σε αυτά τα 21 χρόνια ήταν περίπου 8m, υποδηλώνοντας έτσι μια πιο σταθερή αντίδραση στο επιβαλλόμενο καθεστώς εκμετάλλευσης. Ωστόσο, αυτό είναι αποτέλεσμα και της εστίασης των υδροληπτικών έργων στον βαθύτερο υδροφόρο αλλά και στο ούτως ή άλλως περιορισμένο πάχος και απόδοση του φρεατίου υδροφόρου, ο οποίος πρακτικά εξαντλείται με την παρατηρούμενη πτώση στάθμης, όπως περιγράφεται σε επόμενες παραγράφους.
- Η ετήσια διακύμανση του βαθύτερου υδροφόρου είναι μεγαλύτερη ξεπερνώντας τα 10m, ενώ στον ανώτερο υδροφόρο η διακύμανση είναι σαφώς μικρότερη και δεν ξεπερνάει τα 4m.
- Ως αποτέλεσμα των πτώσεων στάθμης στα μέσα της δεκαετίας του '80, άρχισαν να αναπτύσσονται εντονότερες υδραυλικές κλίσεις, όπως προκύπτει από την «πύκνωση» των πιεζομετρικών καμπυλών (Εικόνα 7.3B).



Διάγραμμα 7.1. Υδρογραφήματα πιεζομέτρων φρεατίας (SR39b) και βαθιάς (SR39) υδροφορίας.

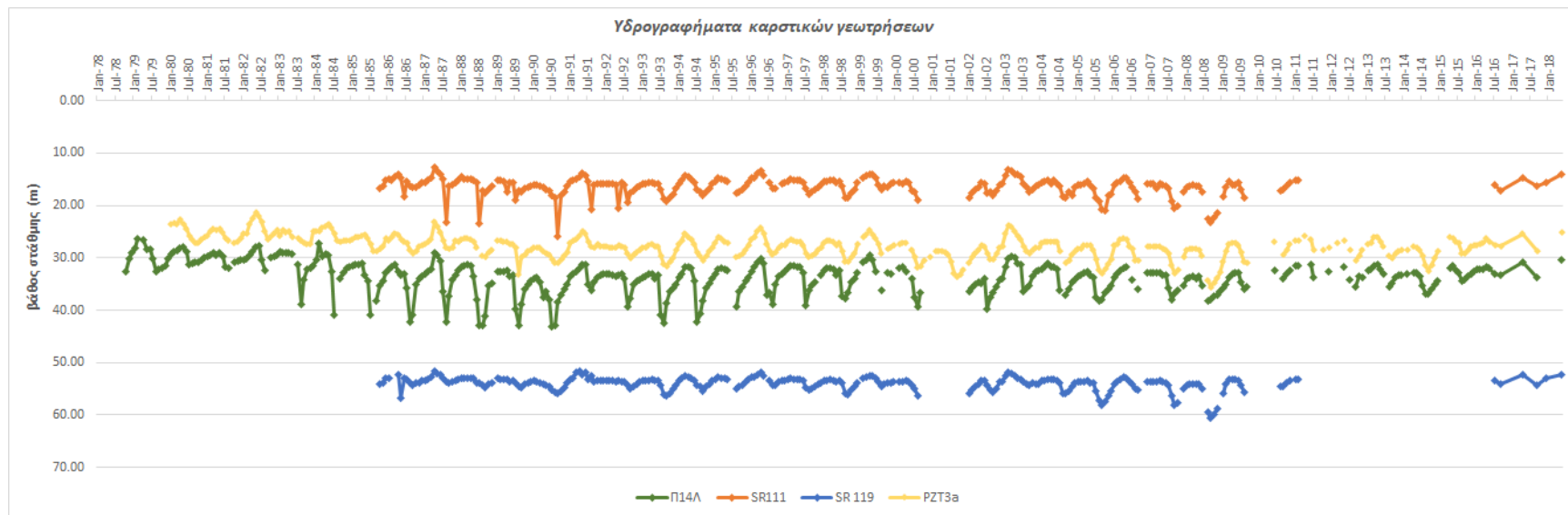
Παρατηρώντας τη συνέχεια του υδρογραφήματος για τον βαθύτερο υδροφόρο (SR39) μετά το 1994, προκύπτει ότι για την περίοδο 2002-2007 η πτώση στάθμης σταθεροποιείται με μια μέση ετήσια κύμανση στα 8m. Ακολουθεί μία περίοδος που δεν υπάρχουν δεδομένα έως και το 2012 και στη συνέχεια από το 2013 έως και το 2018, παρατηρείται μια σχετική τάση επανάκαμψης της υπόγειας στάθμης. Ταυτόχρονα κατά την ίδια περίοδο παρατηρείται μια συνεχιζόμενη μείωση της ετήσιας κύμανσης της υπόγειας στάθμης.

Η πορεία αυτή της υπόγειας στάθμης στη συγκεκριμένη θέση, από την αρχική περίοδο των διαθέσιμων δεδομένων μέχρι και σήμερα, είναι χαρακτηριστική της εξελικτικής πορείας της υδροδυναμικής κατάστασης του υδατικού συστήματος, στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης. Από την αρχή της καταγραφής το 1972 έως και τα μέσα της δεκαετίας του '80, η υπόγεια στάθμη παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις και μικρή ετήσια κύμανση, χαρακτηριστικό της ήπιας εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων και της φυσικής εξέλιξης του υδατικού συστήματος, ανάλογα με την τροφοδοσία του. Από τα μέσα της δεκαετίας του '80, με την έναρξη της συστηματικής, εντατικής και άναρχης εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, το σύστημα δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις υπέρογκες απαιτήσεις και ως εκ τούτου η υπόγεια στάθμη παρουσιάζει συνεχιζόμενη πτωτική πορεία και μεγάλες ετήσιες διακυμάνσεις. Στο γεγονός αυτό συνετέλεσε και η μείωση της τροφοδοσίας του συστήματος λόγω περιορισμού της ενεργού βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια ορισμένων χρονικών περιόδων, αλλά και της γενικευμένης εκμετάλλευσης των προς δυσμάς υδροφόρων συστημάτων που τροφοδοτούν το σύστημα του Τυρνάβου. Από τις αρχές του 2000 και μετά η κατάσταση άρχισε να σταθεροποιείται. Σε αυτό συνετέλεσαν τα μέτρα που προτάθηκαν, μέσα από τα προγράμματα νιτρορρύπανσης και τις διαχειριστικές μελέτες, τα βασικότερα των οποίων αναφέρονται στη συνέχεια:

- Η μετάβαση σε συστήματα στάγδην άρδευσης και μικροεκτοξευτήρες περιόρισε σημαντικά τις καταναλισκόμενες ποσότητες νερού για άρδευση.
- Η μετάβαση σε νέες πιο οικονομικές, από άποψη κατανάλωσης, καλλιέργειες και η υποχρέωση των δικαιούχων του προγράμματος νιτρορρύπανσης (Οδηγία 91/676 της ΕΟΚ για τη Θεσσαλία), για μείωση της κατανάλωσης του αρδευτικού νερού κατά 35% σε περιοχές με σημαντικά προβλήματα των υδροφόρων.
- Μείωση κατά 3%, ως ακαλλιέργητο περιθώριο, της αρδευόμενης έκτασης που εντάσσεται στο προαναφερόμενο πρόγραμμα.
- Απαγόρευση ανόρυξης νέων γεωτρήσεων.

Ειδικά για τα δυτικά περιθώρια της περιοχής έρευνας, λόγω της εγγύτητας με την πηγή τροφοδοσίας, η κατάσταση άλλαξε και η υπόγεια στάθμη άρχισε πλέον να επανακάμπτει. Το γεγονός αυτό πρέπει να αποδοθεί κυρίως στην βελτίωση των συστημάτων άρδευσης σε σημαντικό μέρος των εκτάσεων, ενδεχόμενα στον περιορισμό της έκτασης της αρδευόμενης γεωργίας λόγω αύξησης του κόστους παραγωγής και ενδεχομένως στην μερική αναδιάρθρωση καλλιεργειών με μετάβαση σε λιγότερο υδροβόρες καλλιέργειες.

Στο Διάγραμμα 7.2 παρουσιάζονται τέσσερα διαφορετικά υδρογραφήματα καρστικών γεωτρήσεων και πιεζομέτρων, η ακριβής θέση των οποίων φαίνεται στην Εικόνα 7.2 και τα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στη συνέχεια. Η γεώτρηση SR111, είναι μια ενεργή γεώτρηση που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια από εταιρία εξόρυξης μαρμάρου και βρίσκεται πάνω στα δυτικά κράσπεδα, προς το βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας. Η γεώτρηση SR119 βρίσκεται ακόμα βορειότερα από την SR111, επίσης στα δυτικά κράσπεδα, με τη διαφορά όμως ότι δεν είναι ενεργή γεώτρηση και χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως πιεζόμετρο. Το πιεζόμετρο ΡΖΤ3α, τοποθετείται χωρικά και αυτό στα δυτικά κράσπεδα της περιοχής έρευνας, κοντά στην είσοδο του ποταμού Τιταρήσιου στην υπολεκάνη Τυρνάβου. Τέλος, η γεώτρηση Π14Λ βρίσκεται δυτικά της περιοχής, εντός της περιθωριακής λεκάνης που σχηματίζεται μεταξύ των ποταμών Πηνειό και Τιταρήσιο, λίγο πριν την είσοδό του στην υπολεκάνη. Είναι μια μη ενεργή γεώτρηση και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται μόνο για τη μέτρηση της στάθμης.



Διάγραμμα 7.2. Υδρογραφήματα καρστικών γεωτρήσεων και πιεζομέτρων στην περιοχή έρευνας.

Αναφορικά με τη γεώτρηση SR111 φαίνεται απ' το υδρογράφημά της, ότι κατά τη δεκαετία του '80, όταν και χρησιμοποιούνταν ως αρδευτική γεώτρηση, παρουσίαζε μια μεγαλύτερη ετήσια κύμανση περίπου εννέα (9) μέτρων, με χαρακτηριστικές πτώσεις στάθμης κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου. Από το 1992 και μετά ωστόσο οι κυμάνσεις αυτές μετριάζονται και δεν παρατηρούνται οι απότομες πτώσεις στάθμης κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου. Δεν είναι ακριβώς γνωστό πότε παραχωρήθηκε η συγκεκριμένη γεώτρηση προς εξορυκτική χρήση, αλλά με βάση τις τελευταίες μετρήσεις της στάθμης που πραγματοποιήθηκαν για την παρούσα έρευνα, η ετήσια κύμανση περιορίζεται στα 2 έως 3m. Γενικότερα, στη διάρκεια αυτή των μετρήσεων από το 1985 έως το 2018 δεν υπάρχει πτωτική τάση της υπόγειας στάθμης, παραμένοντας στα ίδια επίπεδα. Αυτό που άλλαξε ήταν η ετήσια διακύμανση της, από 9m στη δεκαετία του '80, μειώθηκε στα 4m περίπου έως και το 2010 και με βάση τα τελευταία πρωτογενή δεδομένα, έχει περιοριστεί σε κάτω από 3m.

Συγκρίνοντας τα υδρογραφήματα του πιεζομέτρου ΡΖΤ3α και της ανενεργής γεώτρησης Π14Λ, φαίνεται ότι παρουσιάζουν ένα πανομοιότυπο μοτίβο μεταβολής καθ' όλη τη χρονοσειρά των δεδομένων από το 1980 έως και το 2018. Η διαφορά τους έγκειται στο εύρος της ετήσιας κύμανσής τους καθώς και στις απότομες πτώσεις στάθμης που παρατηρούνται μόνο στην Π14Λ, κυρίως στη δεκαετία του '80 και σε μικρότερο βαθμό έως και τις αρχές του 2000. Οι διαφορές αυτές μεταξύ τους, ως προς το εύρος κύμανσης, οφείλονται στο γεγονός ότι η Π14Λ βρίσκεται στο κέντρο περιοχής με καλλιεργούμενες εκτάσεις, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ενώ το πιεζόμετρο ΡΖΤ3α στα κρσπεδα των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, σε απόσταση από τις πρώτες καλλιέργειες. Στην περίπτωση αυτή, γενικότερα και τα δύο πιεζόμετρα παρουσιάζουν μια σχετική πτωτική τάση μέχρι και τις αρχές του 2000, ενώ από τότε και μετά ο ρυθμός πτώσης πρακτικά μηδενίζεται. Ωστόσο, συγκρίνοντας τα βάρη στάθμης στα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα με τα σημερινά (λαμβάνοντας υπόψη και τα αντίστοιχα βάρη της περιόδου όπου η στάθμη άρχισε να σταθεροποιείται (Πίνακας 7.2)), προκύπτει μια πτώση από 1 έως 2.7m για το πιεζόμετρο Π14Λ και μια αντίστοιχη πτώση από 0.5 έως 1.4m για το πιεζόμετρο ΡΖΤ3α. Πρακτικά αυτό υποδηλώνει ότι το υπόγειο υδατικό σύστημα, μετά την αρχική του πτωτική τάση και την μετέπειτα σταθεροποίησή του στις αρχές του 2000, βρίσκεται σε στάδιο ανάκαμψης.

Πίνακας 7.2. Βάθη στάθμης Π14Λ & ΡΖΤ3α πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη σταθεροποίηση της πτώσης στάθμης.

	Βάθος στάθμης Π14Λ (m)	Βάθος στάθμης ΡΖΤ3α (m)
Σεπτέμβριος 1980	30.90	27.23
Απρίλιος 1981	29.44	24.60
Σεπτέμβριος 1997	35.25	29.58
Απρίλιος 1998	32.25	26.92
Σεπτέμβριος 2017	33.62	28.64
Απρίλιος 2018	30.45	25.12

Αναφορικά με το υδρογράφημα του πιεζομέτρου SR119, στα βορειοδυτικά κράσπεδα της περιοχής, φαίνεται ότι παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη σταθερότητα από την αρχή των καταγραφών του 1986 έως και το 2018. Δεν παρουσιάζει απότομες πτώσεις στάθμης και η ετήσια αλλά και η συνολική κύμανσή της δεν ξεπερνά τα 7m. Το βάθος στάθμης, όπως προκύπτει από το υδρογράφημα του Διαγράμματος 7.2, δεν πέφτει κάτω από τα 58m, με εξαίρεση το Σεπτέμβριο του 2008 (60.52m). Με βάση τα ετήσια κατακρημνίσματα (Διάγραμμα 5.11), προκύπτει ότι το 2008 ήταν ένα από τα ξηρότερα έτη των τελευταίων δεκαετιών (κάτω από 300mm) και ως εκ τούτου η «έκτακτη» αυτή πτώση στάθμης οφείλεται και στο μειωμένο ύψος βροχόπτωσης. Η διαφορά αυτή έναντι των άλλων, νοτιότερων καρστικών πιεζομέτρων πιθανότατα οφείλεται στη διαφορετική συμπεριφορά του καρστικού όγκου, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, με το βόρειο τμήμα να παρουσιάζει μεγαλύτερη δυναμική. Συμπερασματικά, η εξελικτική πορεία των υπόγειων στάθμεων στο καρστικό σύστημα, καταδεικνύει τη σημαντικότητά του ως παράγοντα τροφοδοσίας του αλλουβιακού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου, όπως αναλύεται και στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

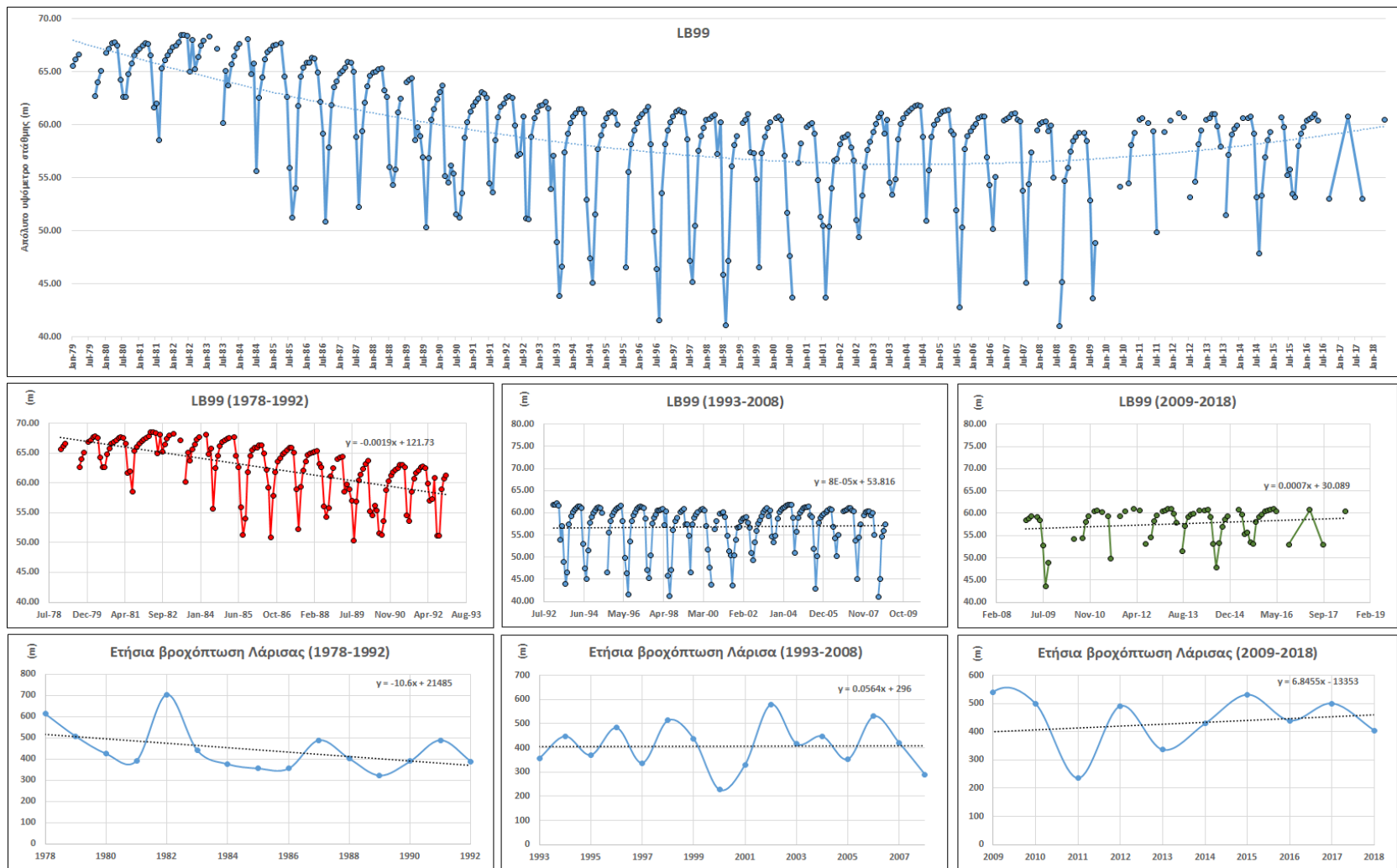
Στη συνέχεια εξετάζεται το υδρογράφημα της γεώτρησης LB99, η οποία είναι η μόνη με πλήρη δεδομένα, αντιπροσωπευτική του βαθύτερου υδροφόρου και η οποία βρίσκεται σε κεντρικό σημείο της υπολεκάνης (Περιοχή Γιάννουλης, Εικόνα 7.2). Στο Διάγραμμα 7.3 παρουσιάζεται (α) το συνολικό υδρογράφημα της LB99 από την αρχή των καταγραφών (1979) έως το 2018 και (β) το ίδιο υδρογράφημα διαχωρισμένο σε τρία χρονικά διαστήματα, με βάση το ρυθμό μεταβολής της υπόγειας στάθμης και (γ) τα ετήσια ύψη βροχόπτωσης του σταθμού Λάρισας για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα. Από τη συνολική εικόνα του υδρογραφήματος προκύπτει ότι η ετήσια κύμανση της υπόγειας στάθμης αυξάνεται προοδευτικά από την έναρξη των καταγραφών φτάνοντας στη μέγιστη τιμή της το 1998 (20m περίπου). Από το 1998 και μετά αρχίζει μια σταδιακή μείωση της ετήσιας κύμανσης με τα τελευταία χρόνια να μην ξεπερνάει τα 8m. Παρατηρώντας τη μορφή του συνολικού υδρογραφήματος και την καμπύλη τάσης, η οποία χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα παρουσιάζουν

διακυμάνσεις τάσης και στο συνολικό υδρογράφημα δείχνει την τάση μεταβολής της υπόγειας στάθμης, καθορίστηκαν τα ακόλουθα χρονικά διαστήματα με βάση το ρυθμό μεταβολής της υπόγειας στάθμης:

i) 1978-1992, όπου ο ρυθμός μεταβολής παρουσιάζει έντονη πτωτική τάση, όπως υποδεικνύεται από τη κλίση της γραμμής τάσης, και οι ετήσιες κυμάνσεις φθάνουν σε μεγάλες τιμές από το 1986 έως το 1989. Είναι η χρονική περίοδος της έναρξης της έντονης εκμετάλλευσης των υπόγειων υδατικών πόρων, που το ισορροπημένο έως τότε υδατικό σύστημα καλείται να ανταποκριθεί στις νέες, πρωτόγνωρες έως τότε, συνθήκες. Παράλληλα, κατά το ίδιο χρονικό διάστημα τα ετήσια κατακρημνίσματα της περιοχής παρουσιάζουν και αυτά πτωτική τάση συμβάλλοντας έτσι στην μειωμένη φυσική τροφοδοσία των υπόγειων υδατικών πόρων.

ii) 1993-2008, όπου η πτωτική τάση του ρυθμού μεταβολής είναι σε ύφεση (γραμμή τάσης οριζόντια), ωστόσο οι ετήσιες κυμάνσεις της υπόγειας στάθμης φθάνουν στις μέγιστες τιμές τους (20m). Κατά το ίδιο χρονικό διάστημα οι βροχοπτώσεις αυξάνονται και ο ρυθμός μεταβολής τους αρχίζει να παρουσιάζει θετικό πρόσημο. Η αύξηση αυτή των βροχοπτώσεων φαίνεται ότι είναι ικανή να εξισορροπήσει το ρυθμό πτώσης της στάθμης, ωστόσο η εντατική εκμετάλλευση συνεχίζεται και η ετήσια κύμανση της υπόγειας στάθμης παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές της.

iii) 2009-2018, όπου πλέον αρχίζει η επανάκαμψη της υπόγειας στάθμης του βαθύτερου υδροφόρου και ο ρυθμός μεταβολής είναι πλέον θετικός (αντιστροφή κλίσης της γραμμής τάσης). Η εφαρμογή των περιοριστικών μέτρων, τα προγράμματα νιτρορρύπανσης, η ενδεχόμενη μερική αναδιάρθρωση καλλιεργειών και συνολικά τα προτεινόμενα από τις διαχειριστικές μελέτες μέτρα άρχισαν να αποδίδουν, ως ένα βαθμό, αντιστρέφοντας την κατάσταση που επικρατούσε την προηγούμενη 25ετία. Ταυτόχρονα, την περίοδο 2009-2018 ο ρυθμός μεταβολής των βροχοπτώσεων συνεχίζει να αυξάνεται, συντελώντας έτσι στην επανάκαμψη του υδατικού ισοζυγίου. Στην κατεύθυνση αυτή εκτιμάται ότι έχει συμβάλει και η προοδευτική (μερική) μετάβαση σε αρδευτικά συστήματα υψηλότερης απόδοσης.



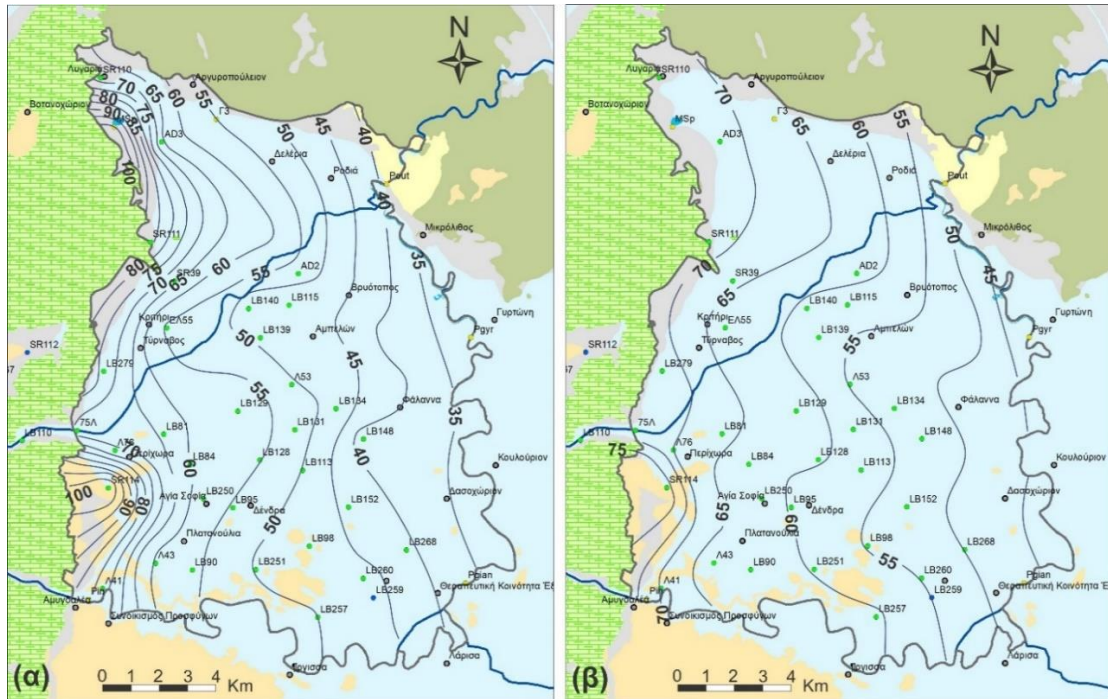
Διάγραμμα 7.3. Υδρογράφημα βαθύτερου υδροφόρου (γεώτρηση LB99) στο κέντρο της υπολεκάνης και ετήσια βροχόπτωση σταθμού Λάρισας.

7.3.2 ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ

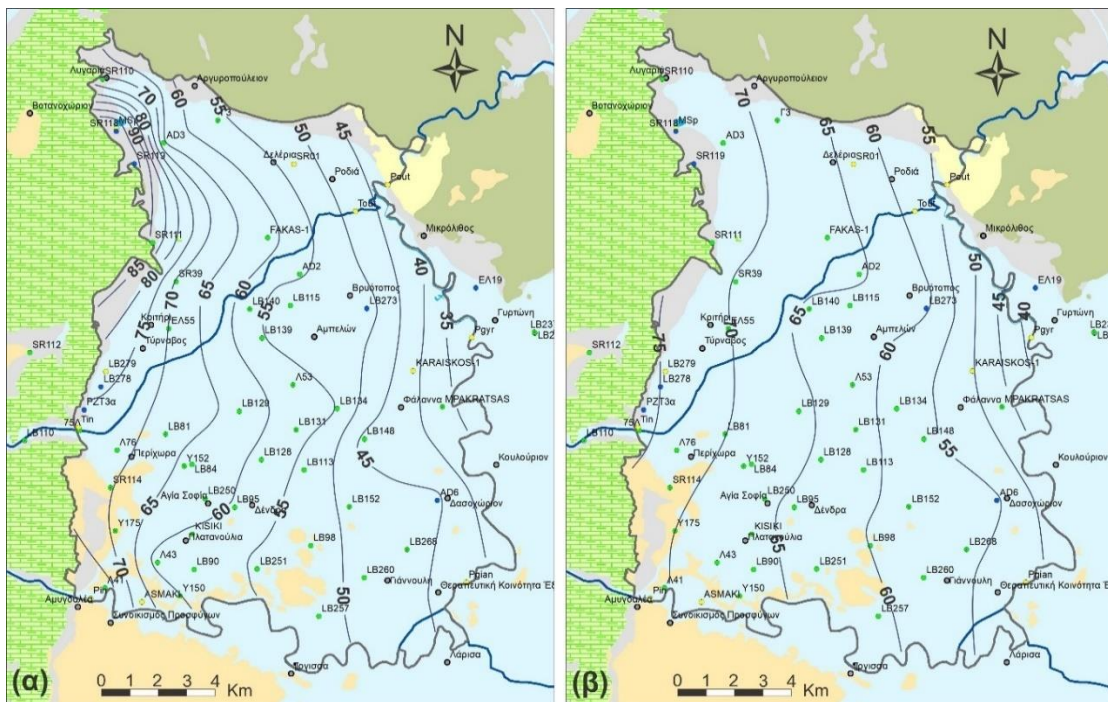
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σχετικά με το πρόγραμμα των μετρήσεων υπόγειας στάθμης, εκτός των τεσσάρων προκαθορισμένων περιόδων, προέκυψε και η ανάγκη για μία έκτακτη περίοδο μετρήσεων το Δεκέμβριο του 2017. Ο σκοπός της εμβόλιμης αυτής περιόδου μετρήσεων ήταν διττός. Βασικής σημασίας ήταν η καταγραφή, με ακρίβεια, των απόλυτων υψομέτρων των σημείων μέτρησης της υπόγειας στάθμης, λόγω των μεγάλων αποκλίσεων που παρουσίαζαν τα υψόμετρα αυτά ανάλογα με την πηγή προέλευσης των δεδομένων. Παράλληλα έλαβε χώρα και μέτρηση της υπόγειας στάθμης, όπου αυτό ήταν εφικτό (ανοικτοί οικίσκοι ή γεώτρηση εκτός οικίσκου).

Η καταγραφή και αποτύπωση των ακριβών υψομέτρων των θέσεων του δικτύου παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης, η οποία έλαβε χώρα για πρώτη φορά στην περιοχή μελέτης, πραγματοποιήθηκε με την χρήση του Real Time Kinematic (RTK) – GPS, Epoch 50 της εταιρίας Spectra Geospatial. Το συγκεκριμένο διαφορικό GPS έχει τη δυνατότητα της online διόρθωσης των σφαλμάτων, που προκύπτουν από τέτοιου είδους μετρήσεις, με αποτέλεσμα την αποτύπωση του υψομέτρου με υψηλή ακρίβεια. Η ακρίβεια αυτή, στη μέτρηση του υψομέτρου, είναι μεγάλης σημασίας, έτσι ώστε να γίνει η σωστή εξαγωγή των απόλυτων υψομέτρων της υπόγειας στάθμης και στη συνέχεια η δημιουργία των πιεζομετρικών χαρτών. Η απεικόνιση των πιεζομετρικών καμπυλών μπορεί να δώσει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα και διαφορετική ερμηνεία, όταν οι διαφορές στα υψόμετρα είναι σημαντικές. Στην παρούσα υπολεκάνη και για τις συγκεκριμένες θέσεις μέτρησης του υψομέτρου, η διαφορά που προέκυψε μεταξύ των διάφορων πηγών (προηγούμενες μελέτες, απλό GPS, Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου) και του RTK – GPS, έφθανε αρκετές φορές και τα 10m.

Μετά την αποτύπωση των υψομέτρων με τη βοήθεια του RTK – GPS, έγινε διόρθωση των απόλυτων υψομέτρων στάθμης των προηγούμενων μετρήσεων (προγενέστερες περιόδοι μέτρησης) και σχεδιάστηκαν εκ νέου οι πιεζομετρικοί χάρτες για τις 4 κύριες περιόδους (2 υγρές και 2 ξηρές). Η βασική διαφορά των χαρτών πριν και μετά τη διόρθωση αφορά στο εύρος κύμανσης στάθμης στην λεκάνη (κύρια στα δυτικά κράσπεδα), αλλά και στην υδραυλική κλίση. Όπως φαίνεται στους χάρτες που ακολουθούν (Εικόνες 7.4 έως 7.7), σε όλες τις περιόδους η υδραυλική κλίση, η οποία αποτυπώνεται στους χάρτες με την πυκνότητα των πιεζομετρικών καμπυλών, είναι πολύ μικρότερη μετά τη διόρθωση του υψομέτρου, κυρίως στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης. Επίσης, από τη σύγκριση των πιεζομετρικών καμπύλων προκύπτει ότι το απόλυτο υψόμετρο της υπόγειας στάθμης είναι υψηλότερο κατά 5 έως 10m, στην περίπτωση των πιεζομετρικών χαρτών όλων των περιόδων, μετά τη διόρθωση των υψομέτρων.



Εικόνα 7.4. Πιεζομετρικός χάρτης ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος 2016), (α) πριν τη διόρθωση του υψομέτρου και (β) μετά τη διόρθωση του υψομέτρου με το RTK-GPS.



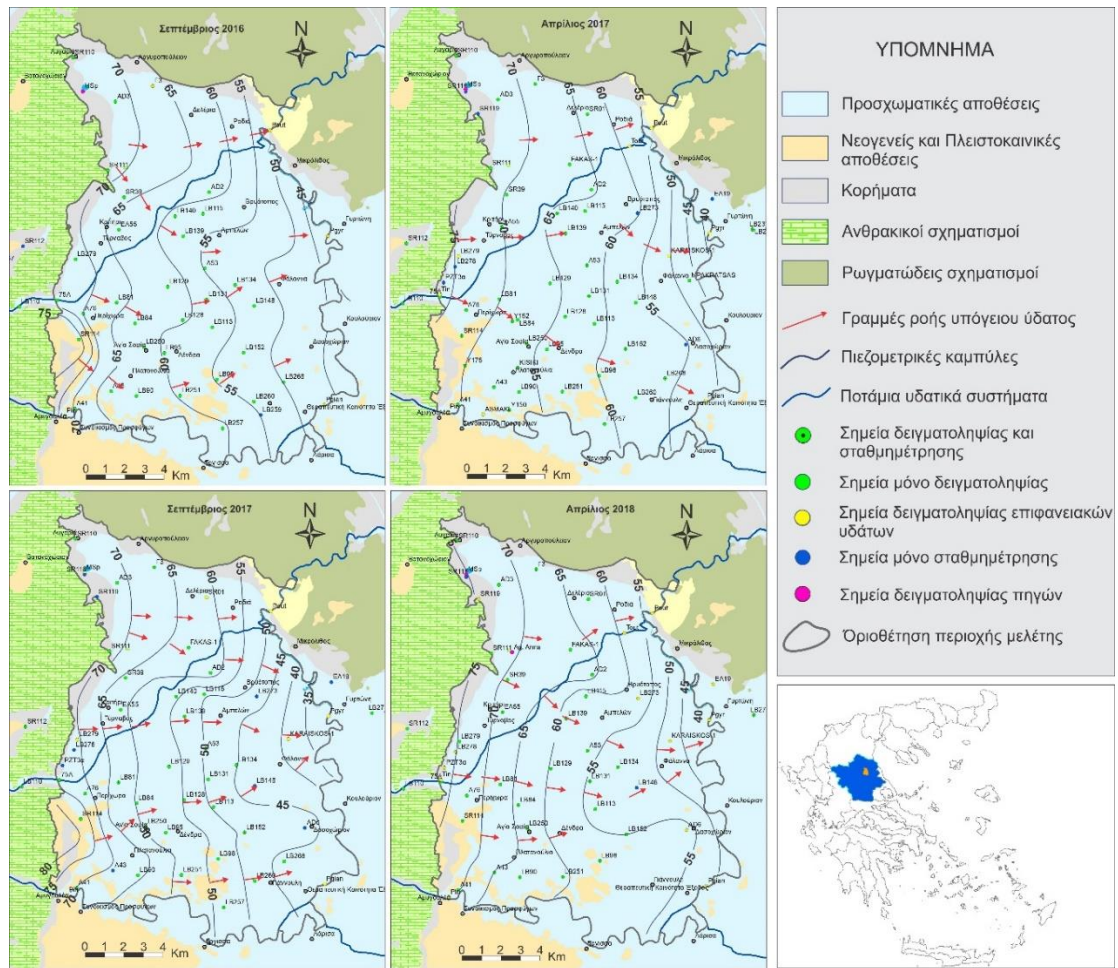
Εικόνα 7.5. Πιεζομετρικός χάρτης υγρής περιόδου (Απρίλιος-Μάιος 2017), (α) πριν τη διόρθωση του υψομέτρου και (β) μετά τη διόρθωση του υψομέτρου με το RTK-GPS.

Η μέτρηση της στάθμης, στις περισσότερες των περιπτώσεων, πραγματοποιήθηκε απευθείας από την κεφαλή των γεωτρήσεων, καθώς λίγες είναι οι γεωτρήσεις που διαθέτουν πιεζόμετρο και ακόμα λιγότερες αυτές στις οποίες το υπάρχον πιεζόμετρο είναι λειτουργικό. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα κάποιες φορές η στάθμη να μην είναι εφικτό να μετρηθεί σε μία περίοδο σε μια συγκεκριμένη γεώτρηση, ενώ να ήταν εφικτό σε κάποια άλλη περίοδο στην ίδια γεώτρηση (ανάλογα με τα εμπόδια που συναντούσε το σταθμήμετρο κατά την είσοδο του στην κεφαλή της γεώτρησης). Επίσης, κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου μετρήσεων κυρίως, κάποιες από τις γεωτρήσεις ήταν σε πλήρη λειτουργία, με αποτέλεσμα η μέτρηση της στάθμης να μην είναι εφικτή ή στις περιπτώσεις που ήταν εφικτή, η μέτρηση δεν αντιπροσώπευε τη στάθμη ηρεμίας. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι μετρήσεις της υπόγειας στάθμης παρουσιάζουν κάποια κενά ανά περίοδο μέτρησης. Το σύνολο των μετρήσεων, μετά την αναγωγή τους σε απόλυτα υψόμετρα υπόγειας στάθμης, για κάθε περίοδο μέτρησης επισυνάπτονται στον πίνακα (Π1.15) του Παραρτήματος 1.

Από τη μορφή των πιεζομετρικών καμπυλών εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τις συνθήκες κίνησης των υπόγειων υδάτων, της τροφοδοσίας – εκφόρτισης των υδροφόρων καθώς επίσης και την εκτίμηση της υδραυλικής κλίσης. Η κατανομή της στάθμης του υπόγειου νερού και κατ' επέκταση η ροή του, από τις περιοχές τροφοδοσίας προς τις περιοχές εκφόρτισης επηρεάζεται από την τοπογραφία και από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών.

Τα υπόγεια νερά κινούνται με την επίδραση της συνολικής ενέργειας που φέρουν και η οποία ανά μονάδα όγκου ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής τους ενέργειας. Πρακτικά η ενέργεια αυτή αποτελεί το υδραυλικό φορτίο (ή πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό) και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση. Η κίνηση επομένως του υπόγειου νερού μέσα σε ένα πορώδες μέσο, γίνεται από τις περιοχές υψηλότερης ενέργειας, άρα υψηλού υδραυλικού φορτίου (μεγαλύτερα απόλυτα υψόμετρα υπόγειας στάθμης) προς τις περιοχές χαμηλότερης ενέργειας, δηλαδή μικρότερου υδραυλικού φορτίου (μικρότερα απόλυτα υψόμετρα υπόγειας στάθμης), ως προς το επίπεδο αναφοράς.

Με βάση λοιπόν τους πιεζομετρικούς χάρτες των τεσσάρων περιόδων δειγματοληψίας και τις παραπάνω παρατηρήσεις, σχηματίστηκαν οι γραμμές ροής των υπόγειων υδάτων για την περιοχή μελέτης (Εικόνα 7.8).



Εικόνα 7.8. Πιεζομετρικές καμπύλες και γραμμές ροής υπόγειου νερού για τις τέσσερις κύριες περιόδους δειγματοληψίας.

Όπως προκύπτει από τους παραπάνω χάρτες, η κυρίαρχη κίνηση του υπόγειου νερού ακολουθεί τη διεύθυνση Α-Δ με φορά προς τα ανατολικά. Εισέρχεται δηλαδή από τα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης, διαμέσου του καρστικού συστήματος Δαμασίου-Τυρνάβου και στη συνέχεια κινείται προς τα ανατολικά παρουσιάζοντας γενικότερα μια σύγκλιση προς το κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης.

Αναφορικά με την υδραυλική κλίση, αυτή εκφράζει τη μεταβολή του του υδραυλικού φορτίου (απόλυτο υψόμετρο στάθμης) ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής και εξαρτάται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Δίνεται από τη σχέση:

$$i = \frac{dH}{dl} \quad (7.1)$$

όπου:

dH = η διαφορά φορτίου (στάθμης) μεταξύ δύο σημείων

dl = η απόσταση μεταξύ των δύο αυτών σημείων.

Από τη Σχέση 7.1 προκύπτει ότι όσο πυκνότερες είναι οι πιεζομετρικές καμπύλες τόσο μεγαλύτερη είναι η υδραυλική κλίση και αντιστρόφως. Σαν γενική εικόνα από τους πιεζομετρικούς χάρτες των τεσσάρων (4) κύριων περιόδων μετρήσεων, φαίνεται ότι η υδραυλική κλίση είναι λίγο μεγαλύτερη στις δύο (2) τελευταίες περιόδους μέτρησης (Σεπτέμβριος 2017 και Απρίλιος 2018), σε σχέση με τις δύο (2) πρώτες (Σεπτέμβριος 2016 και Απρίλιος 2017).

Παρατηρώντας την Εικόνα 7.2, στην οποία απεικονίζεται το δίκτυο παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης, φαίνεται ότι στο ανατολικό και το βορειανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης δεν υπάρχουν αρκετά σημεία μέτρησης. Επίσης, από τους πιεζομετρικούς χάρτες των τεσσάρων (4) περιόδων, στο Α-ΒΑ τμήμα της υπολεκάνης, η υδραυλική κλίση φαίνεται μεγαλύτερη, σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα της περιοχής, καθώς οι πιεζομετρικές καμπύλες παρουσιάζουν μια πιο έντονη πύκνωση. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στις διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες των σχηματισμών στο τμήμα αυτό ή/και στην παρατήρηση που αναφέρθηκε προηγουμένως με τα ελλiptή σημεία μέτρησης στις συγκεκριμένες περιοχές.

Επίσης, από την παρατήρηση των πιεζομετρικών χαρτών της ξηρής περιόδου, παρατηρείται μια διαφοροποίηση της υδραυλικής κλίσης εκατέρωθεν του ποταμού Τιταρήσιου, στην περιοχή εισόδου του στην περιοχή μελέτης. Έτσι, στο τμήμα νότια του Τιταρήσιου (ΝΔ τμήμα της υπολεκάνης) η υδραυλική κλίση παρουσιάζεται εμφανώς μεγαλύτερη κατά τις δύο (2) αυτές ξηρές περιόδους. Η διαφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί με βάση τη γεωλογία της εν λόγω περιοχής. Όπως φαίνεται και από τον γεωλογικό χάρτη στο ΝΔ τμήμα της υπολεκάνης Τυρνάβου, αναδύονται οι νεογενείς σχηματισμοί (μάργες) μεταξύ των καρστικών σχηματισμών και των αλλουβιακών αποθέσεων. Τα νεογενή αυτά ιζήματα εμποδίζουν μερικώς την άμεση τροφοδοσία, που προέρχεται από το καρστικό σύστημα, λόγω των χαμηλών τιμών

των υδραυλικών παραμέτρων τους και αυτό σε συνδυασμό με την υπάρχουσα τροφοδοσία δίνει την εικόνα της πιο έντονης υδραυλικής κλίσης. Αντιθέτως, στο τμήμα βόρεια της εισόδου του ποταμού Τιταρήσιου, το καρστ βρίσκεται σε άμεση επαφή με τα αλλουβιακά ιζήματα, χωρίς την παρεμβολή των νεογενών, δίνοντας έτσι μία πιο ήπια μορφή υδραυλικής κλίσης, η οποία ακολουθεί την τοπογραφική κλίση του κώνου του Τιταρήσιου. Σε αυτό συνεισφέρουν και οι χονδρόκοκκες αποθέσεις κατά μήκος της κοίτης του ποταμού Τιταρήσιου. Η διαφορά αυτή στην υδραυλική κλίση εκατέρωθεν του Τιταρήσιου αμέσως μετά την είσοδό του στην υπολεκάνη Τυρνάβου αλλά και η μικρή αλλά υπαρκτή, όπως θα αναφερθεί στο επόμενο κεφάλαιο, διαφορά στην υδροχημεία, αφήνουν ανοικτό το ενδεχόμενο για την υδραυτικά ενιαία ή μη συμπεριφορά του καρστικού συστήματος. Παλαιότερες μελέτες συνηγορούν στην εποχιακά διαφοροποιούμενη υδραυλική συμπεριφορά του καρστικού αυτού συστήματος (Μαρίνος & Περλέρος 1990). Οι Panagoroulos et al. 1995 μάλιστα αναφέρουν την ύπαρξη ενός υπόγειου υδροκρίτη, παράλληλου με τον άξονα της κοίτης του Τιταρήσιου, ο οποίος διαχωρίζει το καρστικό σύστημα σε δύο υποσυστήματα. Σύμφωνα με τους ερευνητές ο υδροκρίτης αυτός παρουσιάζει χρονική και χωρική μετατόπιση σαν συνάρτηση των υδροδυναμικών συνθηκών που επικρατούν (φυσική τροφοδοσία, πηγαίες εκφορτίσεις, απολήψεις από γεωτρήσεις).

Στη μεταβαλλόμενη αυτή συμπεριφορά του καρστικού συστήματος πιθανότατα οφείλεται και η διαφοροποίηση που παρουσιάζει το πιεζόμετρο SR119 στα βόρεια κράσπεδα της υπολεκάνης έναντι των αντίστοιχων πιεζόμετρων στα νότια κράσπεδα. Όπως παρατηρήθηκε από την ανάλυση των υδρογραφημάτων (Παράγραφος 7.2.1), το πιεζόμετρο SR119 παρουσίαζε μια σταθερή κύμανση της υπόγειας στάθμης καθ' όλη τη διάρκεια της χρονοσειράς των δεδομένων (1986-2018) χωρίς απότομες πτώσεις στάθμης, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί και στη διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ βόρειου και νότιου τμήματος της πηγής τροφοδοσίας (karst).

7.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΟΦΟΡΙΑΣ

Ως βασικό στοιχείο της εκτίμησης της ποσοτικής κατάστασης στην περιοχή μελέτης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της υδροδυναμικής λειτουργίας και εξέλιξης του υπόγειου υδατικού συστήματος. Η προσπάθεια αυτή βασίστηκε στη χρονοσειρά των δεδομένων της υπόγειας στάθμης, βάσει της οποίας προέκυψαν οι πιεζομετρικοί χάρτες και οι χάρτες ισοβαθών καμπυλών. Οι πρώτοι αποτυπώνουν το απόλυτο υψόμετρο της υπόγειας στάθμης από το επίπεδο αναφοράς (θάλασσα), ενώ οι δεύτεροι το βάθος της υπόγειας στάθμης από την επιφάνεια του εδάφους.

Από τη μελέτη των υδρογραφημάτων των γεωτρήσεων και με βάση όσα ειπώθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, γίνεται αντιληπτό, ότι αναφορικά με το κομμάτι της εξέλιξης της υδροδυναμικής κατάστασης του συστήματος, θα πρέπει να ορισθούν συγκεκριμένα διαστήματα αναφοράς, έτσι ώστε να αποδοθεί καλύτερα η εξέλιξη

αυτή. Τα διαστήματα, τα οποία επιλέχθηκαν βάσει των δεδομένων που συλλέχθηκαν και των μετρήσεων που διενεργήθηκαν, δεν είναι τυχαία αλλά σηματοδοτούν περιόδους ορόσημα για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας.

Η πρώτη χρονική περίοδος αναφοράς είναι η δεκαετία του '70, όπου πραγματοποιήθηκε το πρώτο ολοκληρωμένο έργο αξιοποίησης των υδροφόρων της Θεσσαλίας με τίτλο «Πρόγραμμα Ανάπτυξης Υπόγειων Υδάτων Θεσσαλίας (ΠΑΥΥΘ)». Την υδρογεωλογική μελέτη του έργου εκπόνησε ο Γαλλικός οίκος Sogreah, ο οποίος ήταν και ο τεχνικός σύμβουλος, ενώ την υλοποίηση του έργου ανέλαβε η τότε Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων του Υπουργείου Γεωργίας. Ξεκίνησε το 1972 και ολοκληρώθηκε το 1986 και κατά τη διάρκειά του πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο εργασιών πρωτόγνωρο για τα μέχρι τότε δεδομένα. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε:

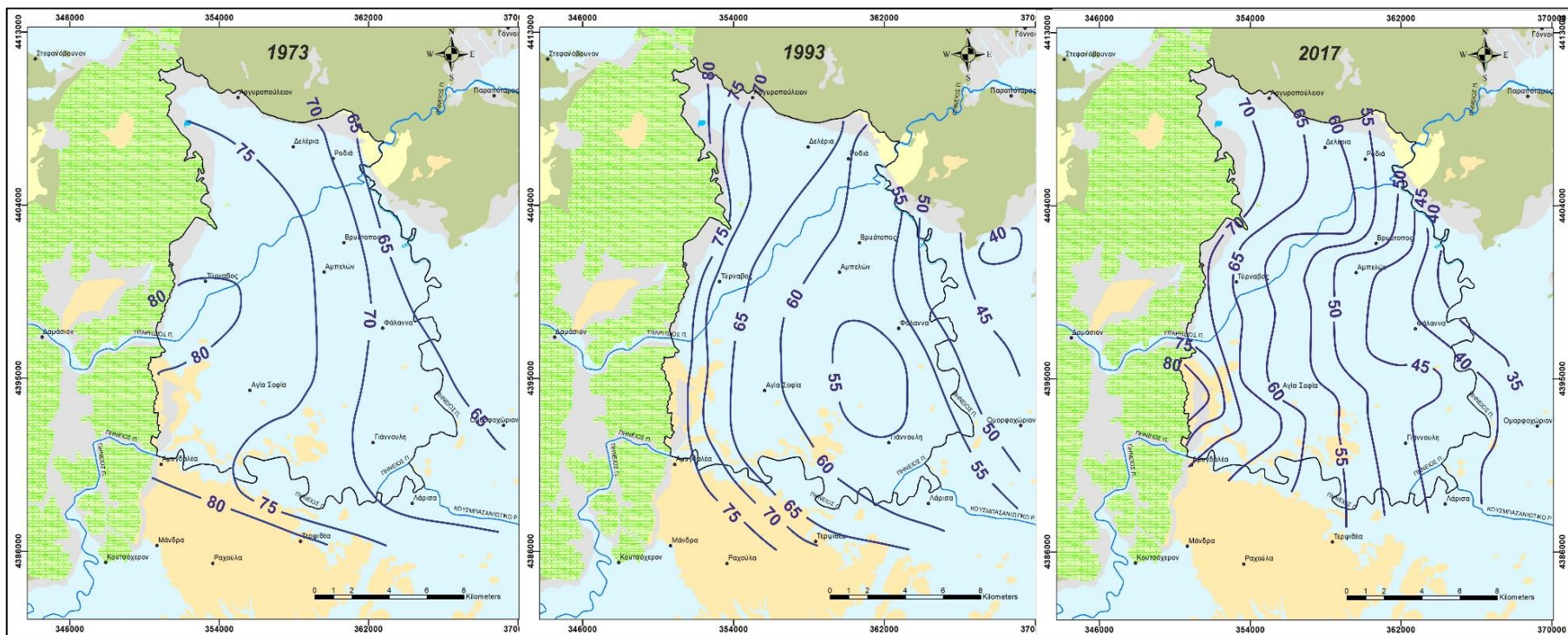
- Ανόρυξη 1,427 γεωτρήσεων (ερευνητικές, πιεζομετρικές και εκμετάλλευσης).
- Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός και ηλεκτροδότηση 1,130 γεωτρήσεων.
- Υπόγεια αρδευτικά δίκτυα σε 40,600 στρέμματα.
- Επιφανειακά δίκτυα τεχνητής βροχής, συνολικού μήκους 2,300 χιλιομέτρων.
- Στραγγιστικά - αποχετευτικά δίκτυα 1,060 χιλιομέτρων.
- Αγροτικό – οδικό δίκτυο 1,070 χιλιομέτρων.
- Αναδασμός σε 200,000 στρέμματα.

Τα έργα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα τη μετάβαση από μια περίοδο ήπιας εκμετάλλευσης των υπόγειων υδατικών πόρων σε μια περίοδο προσδευτικής εντατικοποίησής τους. Η εντατικοποίηση αυτή του υπόγειου υδατικού δυναμικού ωστόσο, έφτασε στο σημείο της υπερεκμετάλλευσης, ξεπερνώντας τα όρια αντοχής του συστήματος, με αποκορύφωμα τη δεκαετία του '90. Η δεκαετία λοιπόν αυτή αποτελεί τη δεύτερη χρονική περίοδο αναφοράς, μια περίοδο καταχρηστικής αξιοποίησης των εγκατεστημένων υδροληπτικών έργων χωρίς δεσμεύσεις και περιορισμούς.

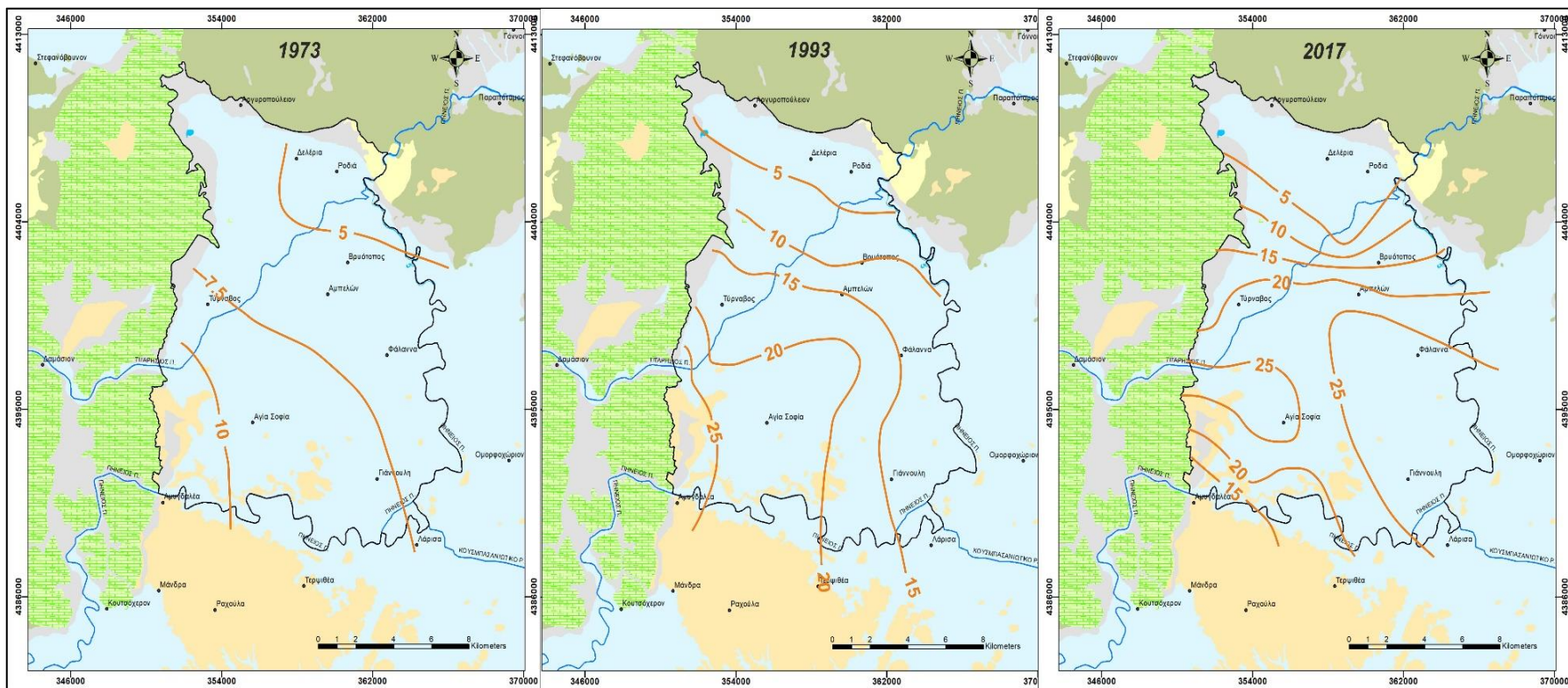
Η τρίτη και τελευταία περίοδος αναφοράς περιλαμβάνει την υπάρχουσα κατάσταση, η οποία άρχισε να διαμορφώνεται την τελευταία δεκαετία. Πρόκειται για την περίοδο μετά τις παρεμβάσεις για την εξομάλυνση της προϋπάρχουσας κατάστασης μέσω μιας σειράς προγραμμάτων και των Διαχειριστικών Μελετών, που μεταξύ άλλων υπαγορεύτηκαν από την οικονομική κατάσταση της χώρας και την διαφοροποίηση της κατανομής των καλλιεργειών, της έκτασης της αρδευόμενης γεωργίας και της μερικής μετάβασης σε αρδευτικά συστήματα υψηλότερης απόδοσης.

Μετά την οριοθέτηση των συγκεκριμένων περιόδων και της αναφοράς των ιδιαίτερων καταστάσεων τις οποίες αντιπροσωπεύουν, γίνεται προσπάθεια στη συνέχεια να αποδοθεί η εξελικτική πορεία της ποσοτικής κατάστασης του υπόγειου υδατικού συστήματος και να κατανοηθεί πώς αυτό επηρεάστηκε από τις εκάστοτε

επικρατούσες συνθήκες. Για κάθε μία από τις τρεις (3) προαναφερόμενες περιόδους αναφοράς, ορίστηκε ένα αντιπροσωπευτικό έτος, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και τις παλαιότερες μελέτες για την περιοχή. Έτσι για την πρώτη περίοδο αναφοράς (δεκαετία 1970) επιλέχθηκε το 1973, όπου για το φθινόπωρο του έτους αυτού, με βάση τα δεδομένα από τη μελέτη της Sogreah, κατασκευάστηκε ο πιεζομετρικός χάρτης και ο χάρτης των ισοβαθών (Εικόνες 7.9 & 7.10). Για τη δεύτερη περίοδο (δεκαετία 1990) επιλέχθηκε το έτος 1993, όπου για το φθινόπωρο του έτους αυτού, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και τη μελέτη από τον Panagoroulos (1995), εξήχθησαν οι αντίστοιχοι χάρτες (Εικόνες 7.9 & 7.10). Τέλος, για την τελευταία περίοδο αναφοράς (2010-2020), επιλέχθηκε ως έτος αναφοράς το 2017, ως ένα από τα έτη παραγωγής πρωτογενών δεδομένων, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Οι αντίστοιχοι χάρτες (πιεζομετρικός και ισοβαθών) κατασκευάστηκε για το φθινόπωρο του ίδιου έτους (Εικόνες 7.9 & 7.10).



Εικόνα 7.9. Πιεζομετρικές καμπύλες ξηρής περιόδου για τα τρία έτη αναφοράς: 1973 (Sogreah 1974), 1993 (Panagouros 1995) και 2017 (Vrouhakis et.al. 2017).



Εικόνα 7.10. Ισοβαθείς καμπύλες ξηρής περιόδου για τα τρία έτη αναφοράς: 1973 (Sogreah 1974), 1993 (Panagoroulos 1995) και 2017 (Vrouhakis et al. 2017).

Μια πρώτη προσέγγιση που μπορεί να γίνει, με βάση τους πιεζομετρικούς χάρτες της Εικόνας 7.9 είναι ότι:

(α) Η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται από τα δυτικά περιθώρια της περιοχής έρευνας προς το κεντρικό και ανατολικό τμήμα αυτής.

(β) Κατά τη δεκαετία του 1970, η τροφοδοσία προς την αλλουβιακή υπολεκάνη παρουσιάζεται ενιαία, προερχόμενη κατά κύριο λόγο από τον κώνο του ποταμού Τιταρήσιου. Το φαινόμενο αυτό εξασθενεί τη δεκαετία του 1990, υποδηλώνοντας έτσι ότι η τροφοδοσία από τη συγκεκριμένη περιοχή περιορίζεται.

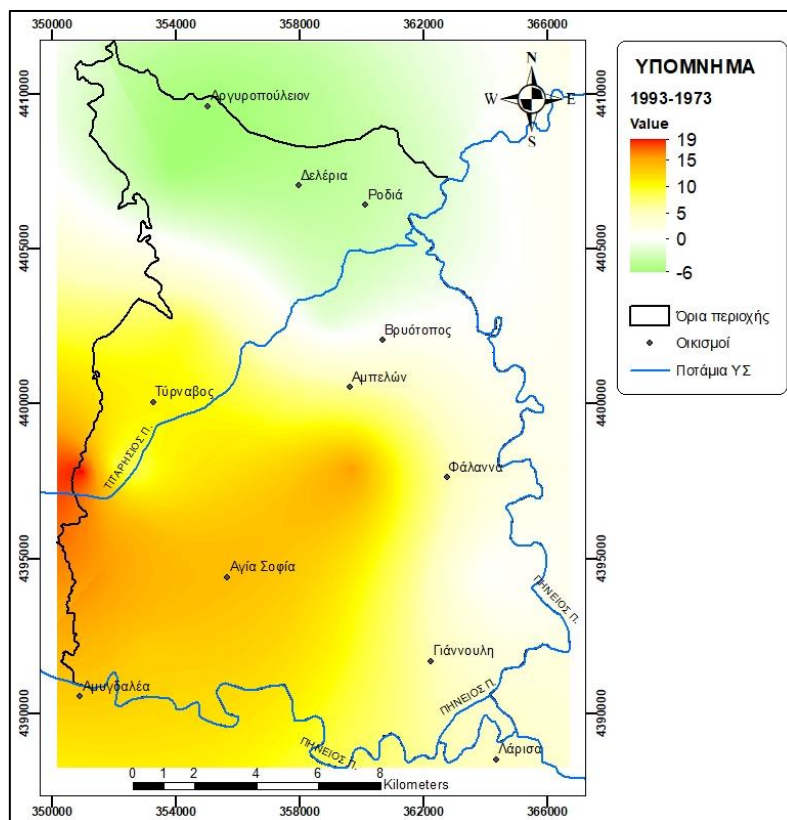
(γ) Οι υδραυλικές κλίσεις αυξήθηκαν σημαντικά από το 1970 έως και το 1990, ενώ από το 1990 έως το 2017 παρατηρείται μια αύξηση της κλίσης μικρότερης κλίμακας. Οι περιοχές που κυρίως εμφανίζουν αύξηση της υδραυλικής κλίσης είναι το ΝΔ τμήμα της περιοχής έρευνας, όπου αναδύονται οι μαργαϊκοί σχηματισμοί και το υλικό του υδροφόρου γίνεται πιο λεπτόκοκκο, καθώς και το ΒΑ τμήμα της περιοχής, όπου το πάχος του υδροφόρου μειώνεται, όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Εικόνα 6.2).

(δ) Η μη ενιαία τροφοδοσία από τα δυτικά (καρστικό σύστημα), όπως αυτή προκύπτει: (i) βιβλιογραφικά, όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση των χαρακτηριστικών του καρστικού συστήματος (Κεφάλαιο 6), (ii) από την ανάλυση των υδρογραφημάτων των πηγών (Κεφάλαιο 6) και (iii) από τα αποτελέσματα της υδροχημικής ανάλυσης που θα αναφερθούν στο επόμενο Κεφάλαιο, επιβεβαιώνεται και από τη σημερινή εικόνα της πιεζομετρίας (2017), όπου παρουσιάζεται διαφοροποιημένη εκατέρωθεν του ποταμού Τιταρήσιου και εκδηλώνεται με τη διαφορά της υδραυλικής κλίσης ανάντη και κατάντη του ποταμού.

Προκειμένου να εξαχθούν πιο οπτικά σαφή συμπεράσματα, στη συνέχεια, με βάση τους χάρτες των ισοβαθών καμπυλών των τριών περιόδων και με τη βοήθεια εργαλείων χωρικής ανάλυσης δεδομένων των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, πραγματοποιήθηκε σύνθεση χαρτών μεταβολής του βάθους στάθμης από περίοδο σε περίοδο (1993-1973, 2017-1993), αλλά και για το σύνολο του χρονικού διαστήματος 2017-1973. Στους χάρτες αυτούς αποτυπώθηκαν με διαφορετική απόχρωση (i) οι περιοχές όπου είχαν αρνητικό πρόσημο μεταβολής και άρα, εφόσον πρόκειται για βάθος στάθμης, άνοδος της υπόγειας στάθμης και επανάκαμψη του συστήματος, (ii) με λευκό χρώμα οι περιοχές με μηδενική μεταβολή από περίοδο σε περίοδο και (iii) οι περιοχές με θετικό πρόσημο μεταβολής και ως εκ τούτου αύξηση της πτώσης στάθμης, δείγμα της συνεχιζόμενης υποχώρησης του υδροφόρου.

Ο πρώτος χάρτης (Εικόνα 7.11) προήλθε από την αφαίρεση των τιμών του βάθους στάθμης του 1993 από τις αντίστοιχες τιμές του 1973. Ο χάρτης αυτός αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της στάθμης που προήλθε από τη μετάβαση από μια

περίοδο ήπιας χρήσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού σε μια περίοδο προοδευτικής εντατικοποίησης της εκμετάλλευσής του.



Εικόνα 7.11. Μεταβολή του βάθους της υπόγειας στάθμης το 1993 σε σχέση με το 1973. Θετικές τιμές αντιστοιχούν σε αύξηση του βάθους (πτώση στάθμης), ενώ αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε μείωση του βάθους (άνοδο της στάθμης).

Όπως προκύπτει από τις αποχρώσεις της χάρτη αυτού (Εικόνα 7.11), οι περιοχές που υπέστησαν τη μεγαλύτερη πτώση της υπόγειας στάθμης μεταξύ της εικοσαετίας 1973-1993, είναι η περιοχή της εισόδου του ποταμού Τιταρήσιου στην περιοχή έρευνας, καθώς και το τμήμα της υπολεκάνης από τα ΝΔ προς το κεντρικό τμήμα αυτής. Όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση των πιεζομετρικών χαρτών, η περιοχή της εισόδου του Τιταρήσιου ήταν το κύριο τμήμα τροφοδοσίας προς την αλλουβιακή υπολεκάνη κατά το φθινόπωρο του 1973, ενώ στο ΝΔ τμήμα η παρουσία των λεπτόκοκκων μαργαϊκών σχηματισμών φαίνεται να εμπόδιζε μερικώς την τροφοδοσία της υπολεκάνης, λόγω των χαμηλών τιμών των υδραυλικών παραμέτρων τους. Η πτώση στάθμης στα τμήματα αυτά κυμαίνεται από 13 έως 20m. Περιμετρικά των περιοχών αυτών με την έντονη πτώση στάθμης, η κατάσταση παρουσιάζεται ελαφρώς καλύτερη κατά τη διάρκεια αυτής της εικοσαετίας. Πρόκειται για το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης, κατά μήκος του άξονα Τυρνάβου-Αμπελώνα και Αμπελώνα-Γιάννουλης, με τις τιμές της πτώσης στάθμης να κυμαίνονται από 4 έως 12m. Βορειότερα και ανατολικά της ζώνης αυτής παρουσιάζεται η περιοχή, η οποία φαίνεται ανεπηρέαστη από την εντατικοποίηση των αρδεύσεων, ενώ το βορειότερο

τμήμα της περιοχής έρευνας παρουσιάζει αύξηση της στάθμης έως και 6m. Η αύξηση αυτή της στάθμης στο βόρειο τμήμα, ενισχύει την άποψη για τη διαφοροποιημένη υδραυλική συμπεριφορά του καρστικού συστήματος και την ύπαρξη υπόγειου υδροκρίτη, παράλληλου με τον άξονα της κοίτης του Τιταρήσιου, όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση της πιεζομετρίας. Ο υδροκρίτης αυτός διαχωρίζει το καρστικό σύστημα σε δύο υπό-συστήματα, με το βορειότερο να παρουσιάζει μεγαλύτερη δυναμική, κάτι που αποτυπώνεται και με την αύξηση της υπόγειας στάθμης. Ωστόσο, η άνοδος στάθμης που αποτυπώνεται θα πρέπει να συσχετιστεί και με δύο ακόμα ενδεχόμενα: (1) την πιθανή εισαγωγή σφάλματος στην ανάλυση των δεδομένων λόγω μικρού αριθμού θέσεων μέτρησης, (2) την περιορισμένη κατανάλωση υδατικών πόρων στην ζώνη αυτή λόγω των επικρατουσών καλλιεργειών μικρότερων αναγκών σε άρδευση (συμπεριλαμβανομένων των εαρινών σιτηρών).

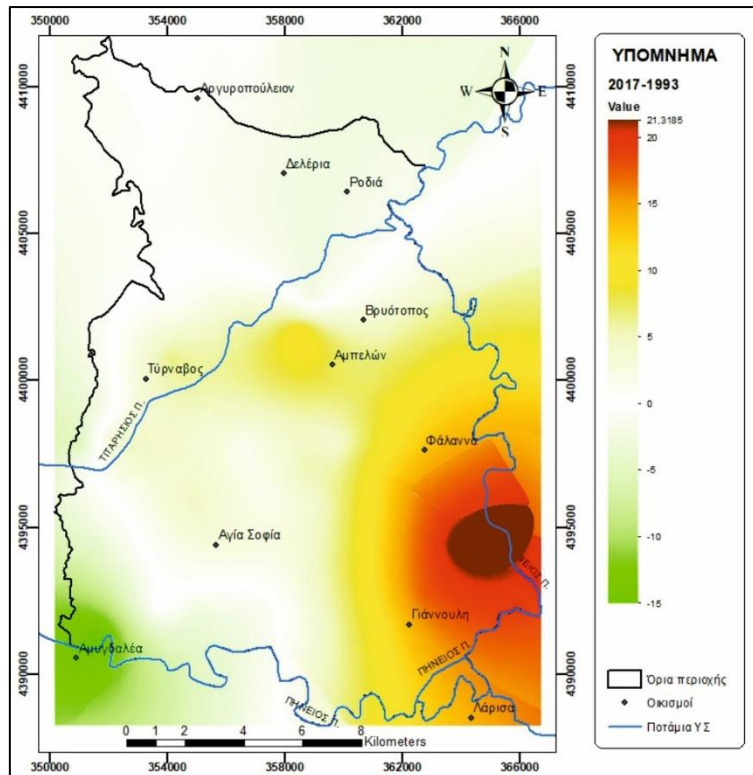
Σημειώνεται, ότι η ερμηνεία που δόθηκε παραπάνω, βασίζεται στα αποτελέσματα της μελέτης και επεξεργασίας των μεταβολών της υπόγειας στάθμης. Ωστόσο, λόγω των λίγων δεδομένων για την περίοδο του 1973, η μορφή του χάρτη της Εικόνας 7.11 προσομοιάζει με τον χάρτη των ισοβαθών της περιόδου του 1993. Ως εκ τούτου, αποκλίσεις, αναφορικά με το ύψος της μεταβολής της στάθμης, μπορεί να υπάρχουν, όμως το γενικότερο πλαίσιο είναι αυτό που παρουσιάστηκε. Οι χάρτες του 1973 μπορεί να εξήχθησαν από λίγα σημεία μέτρησης της υπόγειας στάθμης, ωστόσο προέρχονται από μια στοιχειοθετημένη υδρογεωλογική έρευνα (Sogreah 1974), τα αποτελέσματα της οποίας θεωρούνται υψηλής αξιοπιστίας.

Στην Εικόνα 7.12 παρουσιάζεται ο χάρτης που προήλθε από την αφαίρεση των τιμών των πρωτογενών δεδομένων του βάθους στάθμης της ξηρής περιόδου του 2017 από τις αντίστοιχες τιμές της ξηρής περιόδου του 1993. Ο χάρτης αυτός αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της στάθμης που προήλθε από τη μετάβαση από μια περίοδο υπεραντλήσεων και ανεξέλεγκτης άρδευσης σε μια περίοδο, όπου τα προτεινόμενα μέτρα, σε συνδυασμό με τις μειώσεις χρήσης νερού για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, περιόρισαν ως ένα βαθμό το προϋπάρχον καθεστώς σχετικά με τις αρδευτικές πρακτικές.

Από τη μελέτη του χάρτη αυτού (Εικόνας 7.12) προκύπτει, ότι το φαινόμενο της έντονης πτώσης στάθμης (14-22m), μετατοπίστηκε προς το A-NA τμήμα της υπολεκάνης. Κατ' αντιστοιχία και οι περιοχές της μέσης πτώσης στάθμης (4-12m), μετατοπίστηκαν ανατολικότερα, περιμετρικά του προηγούμενου τμήματος της έντονης πτώσης. Το βόρειο και δυτικό τμήμα της υπολεκάνης παρουσιάζει μια σταθερότητα σε σχέση με το 1993, χωρίς περαιτέρω πτώση της στάθμης. Το κεντρικό προς νότιο τμήμα παρουσιάζει μια μικρή πτώση (<4m), ενώ ένα μικρό τμήμα στο NA άκρο παρουσιάζει αύξηση της στάθμης έως και 15m.

Η μορφή του χάρτη αυτού υποδηλώνει μια γενικότερη βελτίωση της ποσοτικής κατάστασης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος. Η προτροπή για σταδιακή μετάβαση σε λιγότερο υδροβόρες καλλιεργείες, για βελτίωση των αρδευτικών

δικτύων και συστημάτων άρδευσης και για μετάβαση σε στάγδην άρδευση ίσως συνετέλεσαν στην βελτίωση αυτή, ωστόσο σημαντικό ρόλο έπαιξε και η απαγόρευση ανόρυξης νέων γεωτρήσεων. Η βελτίωση αυτή της κατάστασης εκδηλώνεται τόσο στο βόρειο όσο και στο δυτικό τμήμα της υπολεκάνης, καθώς οι περιοχές αυτές βρίσκονται σε άμεση επαφή με το καρστικό σύστημα, το οποίο αποτελεί την κύρια πηγή τροφοδοσίας. Και το ΝΔ τμήμα της υπολεκάνης φαίνεται να επανακάμπτει, καθώς ύστερα από την έντονη πτώση που υπέστη μεταξύ 1973-1993, η υπόγεια στάθμη, έχοντας μεγάλα περιθώρια ανάκαμψης, σημείωσε άνοδο μέχρι και 15m έναντι του 1993. Η επανάκαμψη αυτή, σε μικρότερο βαθμό, εμφανίζεται και στα κεντρικά τμήματα της περιοχής, ωστόσο το πρόβλημα μετατοπίζεται στα ΝΑ, προς τη συνέχεια της ανατολικής θεσσαλικής πεδιάδας. Από το σημείο αυτό και προς τα νότια είναι η περιοχή που σήμερα αντιμετωπίζει τα μεγαλύτερα προβλήματα ποσοτικής υποβάθμισης του υπό-πίεση υδροφόρου. Η μεγάλη απόσταση από την βασική ζώνη τροφοδοσίας (καρστικό σύστημα) έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία άμεσης τροφοδοσίας. Με την πτώση της στάθμης αυξάνονταν σταδιακά και τα βάθη άντλησης των υδροληπτικών έργων και σε συνδυασμό με την περιορισμένη τροφοδοσία, το φαινόμενο της πτώσης στάθμης γινόταν ολοένα και πιο έντονο. Διαχειριστικά, η προτροπή για αντιστροφή της κατάστασης (όπως αυτή είχε διαμορφωθεί πριν το 1993), λειτούργησε ευεργετικά (ως ένα σημείο) για το βόρειο και δυτικό τμήμα της υπολεκάνης, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό ώστε να επανακάμψει το σύστημα στη ΝΑ επέκταση της υπολεκάνης, προς τα κεντρικά τμήματα της ανατολικής θεσσαλικής πεδιάδας.



Εικόνα 7.12. Μεταβολή του βάθους της υπόγειας στάθμης το 2017 σε σχέση με το 1993. Θετικές τιμές αντιστοιχούν σε αύξηση του βάθους (πτώση στάθμης), ενώ αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε μείωση του βάθους (άνοδο της στάθμης).

Παρά την ανάκαμψη του συστήματος, σε μεγάλο τμήμα της περιοχής έρευνας το 2017 έναντι του 1993, όπως αυτή αποτυπώθηκε στον προηγούμενο χάρτη, δημιουργείται το ζήτημα της συνολικής μεταβολής μεταξύ της αρχικής (1973) και τελικής κατάστασης (2017) του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Η απάντηση στο ζήτημα αυτό δίνεται από τον χάρτη της Εικόνας 7.13, ο οποίος αντιπροσωπεύει τη συνολική μεταβολή του βάθους της υπόγειας στάθμης από την ξηρή περίοδο του 1973, πριν την εντατικοποίηση των αρδεύσεων, έως και την ξηρή περίοδο του 2017, μετά την έναρξη της ανάκαμψης του υδροφόρου συστήματος.

Όπως προκύπτει λοιπόν, από την κατανομή των μεταβολών στάθμης εντός της περιοχής έρευνας:

εντοπίζεται μια ζώνη προς το βόρειο τμήμα της υπολεκάνης, όπου το βάθος της υπόγειας στάθμης έχει παραμείνει ανεπηρέαστο κατά τη διάρκεια των 44 αυτών ετών (1973-2017). Η περιοχή αυτή, η οποία απεικονίζεται με λευκό χρώμα στο χάρτη, διαχωρίζει δυο επιμέρους τμήματα της υπολεκάνης με εντελώς αντίθετες εξελικτικές πορείες ως προς τη συνολική μεταβολή του βάθους στάθμης. Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει το βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας και σε αυτό παρατηρείται αύξηση της πιεζομετρικής επιφάνειας από 1 έως 7m, σε σχέση με τις αρχικές τιμές του 1973. Το δεύτερο επιμέρους τμήμα ουσιαστικά περιλαμβάνει όλη την υπόλοιπη υπολεκάνη πλην του βόρειου τμήματος. Στην περίμετρο του τμήματος αυτού

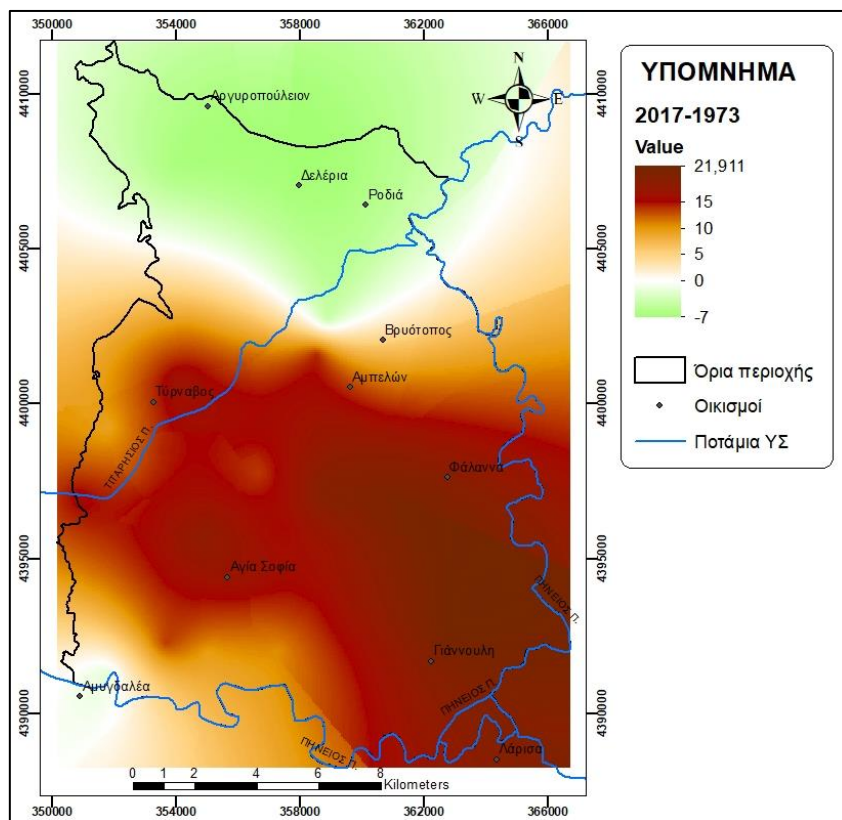
εμφανίζεται μια περιοχική ζώνη, όπου το βάθος στάθμης παρουσιάζει πτώση 11-12m, ενώ κινούμενοι προς το κέντρο και τα ΝΑ της υπολεκάνης η συνολική πτώση κυμαίνεται από 13 έως και 22m.

Λαμβάνοντας υπόψη την συνολική εικόνα της μεταβολής του βάθους της υπόγειας στάθμης (Εικόνα 7.13), γίνεται άμεσα αντιληπτό το φαινόμενο, που ήδη αναφέρθηκε προηγουμένως, της διαφορετικής υδραυλικής συμπεριφοράς του καρστικού συστήματος (Μαρίνος & Περλέρος 1990). Η διαφοροποίηση παρουσιάζεται εκατέρωθεν ενός υπόγειου υδροκρίτη, ο οποίος παρουσιάζει χρονική και χωρική μεταβολή (Ραπαγοπουλος et al. 1995), ανάλογα με τις επικρατούσες υδροδυναμικές συνθήκες, όπως φυσική τροφοδοσία, πηγαίες εκφορτίσεις και απολήψεις από γεωτρήσεις. Η ύπαρξη του υδροκρίτη αυτού διαχωρίζει το καρστικό σύστημα τροφοδοσίας σε δύο επιμέρους συστήματα. Από τη μέχρι τώρα μελέτη της χρονοσειράς, αλλά και την επεξεργασία των πρόσφατων πρωτογενών ποσοτικών δεδομένων, προκύπτει, ότι το βόρειο καρστικό υποσύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερη δυναμική. Η παρουσία των πιο χονδρόκοκκων υλικών απόθεσης του Τιταρήσιου προς τα βόρεια έναντι των μαργαϊκών λεπτόκοκκων σχηματισμών προς τα Ν-ΝΔ ενισχύει τη διαφοροποίηση της τροφοδοσίας αυτής.

Στο βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας, το υδροφόρο σύστημα, λόγω της φύσης των καλλιεργειών αλλά και του σχετικά περιορισμένου αριθμού γεωτρήσεων, δέχεται λιγότερες πιέσεις έναντι του υπόλοιπου τμήματος της υπολεκάνης. Ο μικρός αριθμός υφιστάμενων γεωτρήσεων στο τμήμα αυτό, συνεπάγεται και πιο αραιό δίκτυο σε σχέση την υπόλοιπη περιοχή (Εικόνα 7.2), γεγονός που ίσως επηρεάζει την τελική εικόνα. Τα δεδομένα αυτά, σε συνδυασμό όμως και με τη δυναμική τροφοδοσία από τα ΒΔ κράσπεδα, δίνουν τη διαφορετική εικόνα που παρουσιάζει η συνολική πτώση στάθμης της περιοχής έρευνας, στο βόρειο και στο υπόλοιπο τμήμα της. Η περιοχή του κώνου του ποταμού Τιταρήσιου, παρά την ισχυρή δυναμική τροφοδοσίας που παρουσιάζει, δεν μπορεί να εξισορροπήσει τις εφαρμοζόμενες πιέσεις, λόγω των υδροβόρων καλλιεργειών, του υπερβολικά μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων και των μεγάλων βαθών άντλησης, στο τμήμα αυτό. Οι συνθήκες αυτές, που επικρατούν και στο κεντρικό και ΝΑ/κο τμήμα της υπολεκάνης, συνετέλεσαν στην επικράτηση φαινομένων έντονης πτώσης στάθμης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.13, με τα φαινόμενα να γίνονται εντονότερα στις περισσότερο απομακρυσμένες, από τις πηγές τροφοδοσίας, περιοχές.

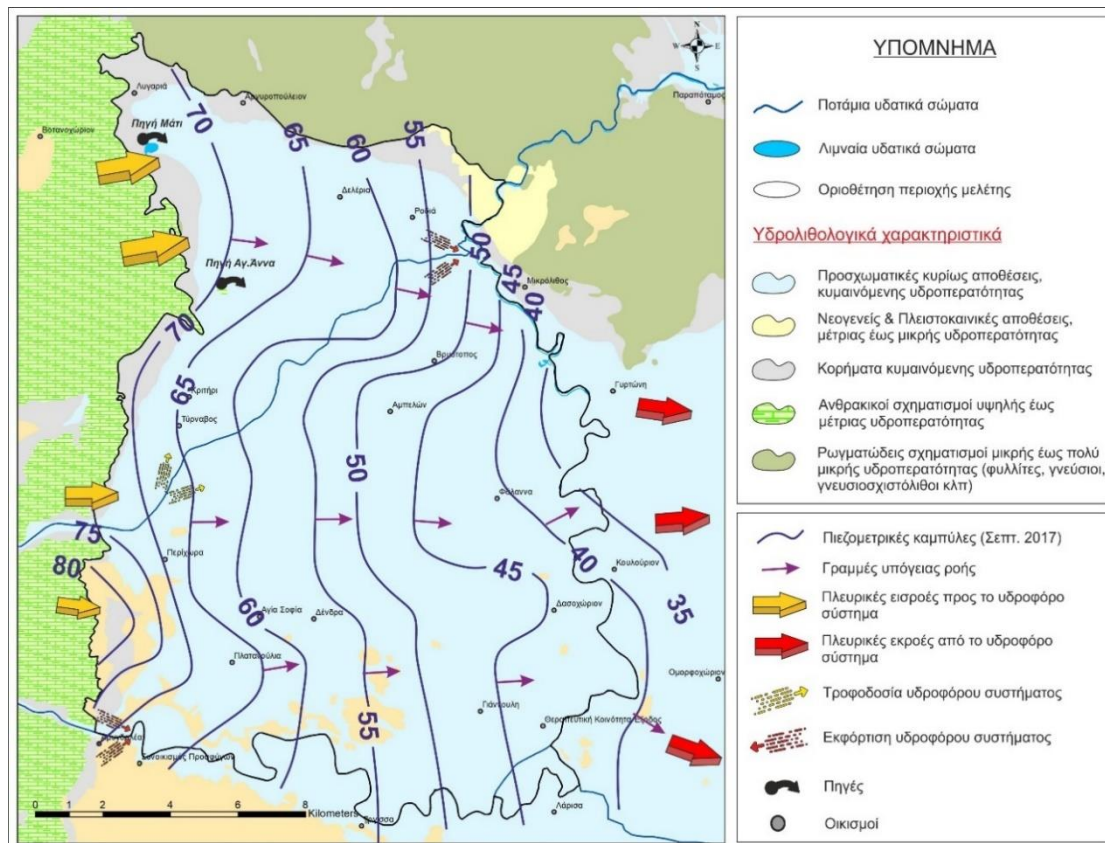
Εν κατακλείδι, με βάση τη συνολική εικόνα μεταβολής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.13, αποδεικνύεται ότι οι όποιες προσπάθειες για αντιστροφή της επικρατούσας κατάστασης (σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω), δεν φαίνεται να επαρκούν έτσι ώστε το σύστημα να επανακάμψει και τα φαινόμενα πτώσης στάθμης να μετριαστούν. Το πρόβλημα φαίνεται να μετατοπίζεται σταδιακά, από τα νότια της υπολεκάνης προς την ΝΑ/κη επέκτασή της (κεντρικό τμήμα της

ανατολικής Θεσσαλικής πεδιάδας) και να εντείνεται με την αύξηση της απόστασης από τις πηγές τροφοδοσίας.



Εικόνα 7.13. Συνολική μεταβολή του βάθους της υπόγειας στάθμης το 2017 σε σχέση με το 1973. Θετικές τιμές αντιστοιχούν σε αύξηση του βάθους (πτώση στάθμης), ενώ αρνητικές τιμές αντιστοιχούν μείωση του βάθους (άνοδο της στάθμης).

Συνοψίζοντας, στην Εικόνα 7.14 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος, οι οποίοι προκύπτουν αποκλειστικά και μόνο από τη μελέτη και επεξεργασία των πιεζομετρικών δεδομένων, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν προηγουμένως.



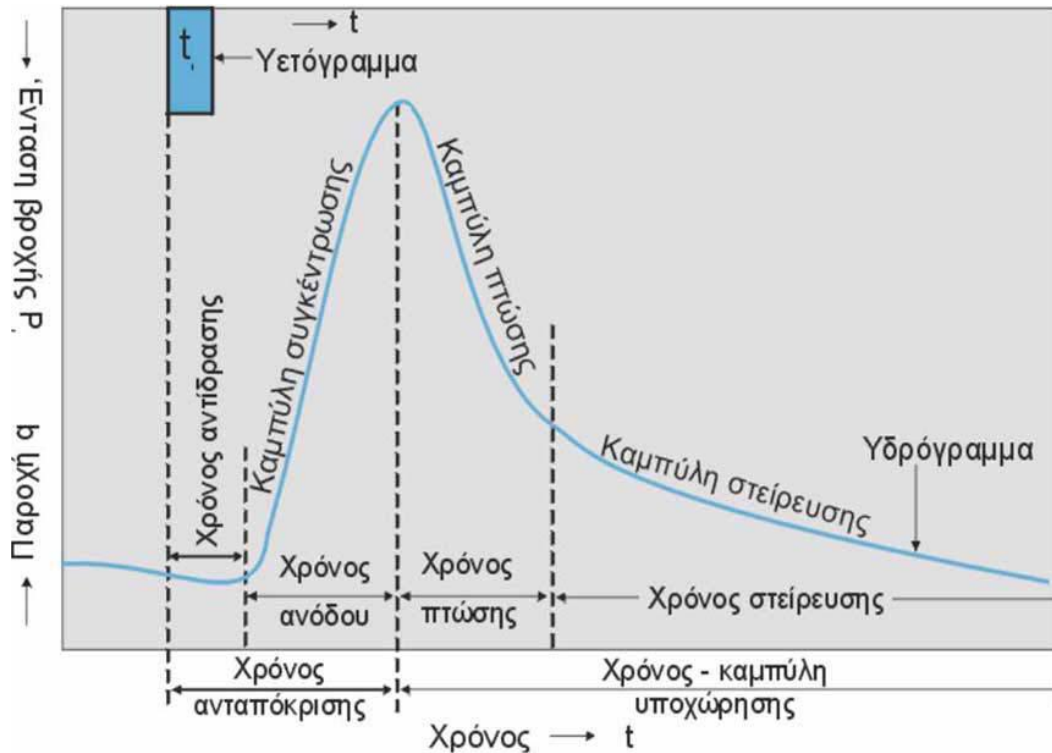
Εικόνα 7.14. Μηχανισμοί λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος, όπως αυτά προκύπτουν από τα πιεζομετρικά δεδομένα.

7.5 ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΗΓΩΝ

7.5.1 ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΗΓΩΝ

Υδρογράφημα μιας πηγής είναι, η γραφική απεικόνιση της μεταβολής της παροχής της, σε συνάρτηση με το χρόνο. Είναι το διάγραμμα που αναπαριστά τη συνάρτηση $Q(t)$ και ουσιαστικά πρόκειται για την καμπύλη, η οποία δείχνει την διακύμανση της παροχής μίας πηγής.

Αν υποθεθεί ότι, σε ολόκληρη την περιοχή τροφοδοσίας μιας πηγής, οι βροχοπτώσεις είναι ενιαίες και ομοιόμορφες, με σταθερή μοναδιαία ένταση P_i και για μοναδιαίο και ενιαίο χρόνο t_i , τότε το υδρογράφημα, που θα προκύψει από την απεικόνιση αυτή, ονομάζεται μοναδιαίο υδρογράφημα (Εικόνα 7.15, Σούλιος 1985, Βλαχόπουλος 2016).



Εικόνα 7.15. Μοναδιαίο υδρογράφημα και επιμέρους στοιχεία του (Σούλιος 1985).

Σε αυτό διακρίνονται τρία βασικά τμήματα:

- Η καμπύλη αύξησης ή συγκέντρωσης, η οποία αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα του υδρολογικού έτους, στο οποίο οι παροχές γενικά αυξάνονται, ανεξάρτητα από τυχόν επί μέρους προσωρινές μειώσεις.
- Η καμπύλη πτώσης, η οποία αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο διάστημα μείωσης των παροχών, ανεξάρτητα από τυχόν επί μέρους προσωρινές αυξήσεις.
- Η καμπύλη στείρευσης ή εξάντλησης, η οποία αρχίζει από το τέλος της προηγούμενης και τελειώνει στην αρχή της επόμενης καμπύλης αύξησης. Ανταποκρίνεται δηλαδή στο τμήμα εκείνο του υδρογραφήματος κατά το οποίο η παροχή μειώνεται με βραδύ ρυθμό, συνεχώς επιβραδυνόμενο. Γίνεται δεκτό, ότι στο διάστημα αυτό η παροχή της πηγής δεν επηρεάζεται από νέες αφίξεις νερού. Το νερό που έχει κατεισδύσει, έχει ενσωματωθεί στον υδροφόρο, ο οποίος αφού έχει πληρωθεί, εκφορτίζεται από την πηγή με αντίστοιχη μείωση του υδραυλικού του φορτίου. Η έναρξη της στείρευσης, για κάθε πηγή, μεταβάλλεται κάθε υδρολογικό έτος, ανάλογα με το ύψος των κατακρημνισμάτων που έχουν προηγηθεί. Το ίδιο συμβαίνει και με τη λήξη της, η οποία σημαδεύεται από την άφιξη νέων ποσοτήτων νερού στον υδροφόρο, με την έναρξη των κατακρημνισμάτων του νέου υδρολογικού έτους.

Η καμπύλη πτώσης μαζί με την καμπύλη στείρευσης αποτελούν την καμπύλη υποχώρησης του υδρογραφήματος.

Στο υδρογράφημα, ακόμα, διακρίνονται και οι εξής χαρακτηριστικοί χρόνοι (Σούλιος 1985):

- *Ο χρόνος ανταπόκρισης*, που είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από το "μέσο" ή "κέντρο βάρους" της βροχοπτώσης μέχρι τη στιγμή της εμφάνισης της μέγιστης παροχής εκφόρτισης.
- *Ο χρόνος ανόδου*, που αντιπροσωπεύει τη χρονική διάρκεια της καμπύλης αύξησης.
- *Ο χρόνος καθόδου*, που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα της καμπύλης μείωσης.
- *Ο χρόνος βάσης*, που είναι το άθροισμα των δύο προηγούμενων χρόνων.

Τα χαρακτηριστικά αυτά του υδρογραφήματος μιας πηγής είναι αποτέλεσμα της γεωλογίας, γεωμετρίας, υδρογεωλογίας και υδραυλικών συνθηκών και παραμέτρων μέσα στο υδατικό σύστημα. Επειδή οι βροχοπτώσεις δεν έχουν σταθερή, αλλά μεταβαλλόμενη ένταση, ούτε και κατανέμονται με ομοιόμορφο τρόπο στην υπολεκάνη τροφοδοσίας της πηγής, το υδρογράφημα που προκύπτει, συνήθως, είναι ένα σύνθετο υδρογράφημα, από τις μεταβολές που υφίσταται το θεωρητικό μοναδιαίο υδρογράφημα.

Από την αρχή του αιώνα αρκετοί ερευνητές έχουν αναπτύξει διάφορες εξισώσεις για να περιγράψουν τα τμήματα του υδρογραφήματος των πηγών, εστιάζοντας κυρίως στο τμήμα της καμπύλης υποχώρησης. Ο κύριος λόγος μελέτης του τμήματος αυτού είναι ότι, η εκφόρτιση ενός καρστικού συστήματος απαιτεί περισσότερο χρόνο από την επανατροφοδότησή του, και έτσι το αντίστοιχο τμήμα του υδρογραφήματος είναι αρκετό για να μελετηθεί, σε αντίθεση με την επανατροφοδοσία του συστήματος, που είναι συνήθως ένα πιο άμεσο γεγονός (Εικόνα 7.15). Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της περιόδου υποχώρησης, η τροφοδοσία θεωρητικά σταματάει και ως εκ τούτου το υδρογράφημα της πηγής αντανακλά την απόκριση του ίδιου του καρστικού συστήματος (Panagoroulos 1995).

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις/μοντέλα για την ανάλυση των υδρογραφημάτων: (α) *το εκθετικό*, που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Maillet (1905) και (β) *το υπερβολικό*, που εισήγαγε ο Tison (1960). Ένας σημαντικός επίσης αριθμός ερευνητών, έχουν εξάγει εξισώσεις, που περιγράφουν με έναν πιο ακριβή τρόπο το τμήμα της στείρευσης της καμπύλης υποχώρησης ενός υδρογραφήματος, βασιζόμενοι κυρίως στην υπερβολική προσέγγιση, ενώ κάποιοι άλλοι έχουν παραγάγει εξισώσεις που περιγράφουν και τα δύο τμήματα της καμπύλης υποχώρησης ή ακόμα και ολόκληρο το υδρογράφημα.

Ο Milanovic (1981) και ο Σούλιος (1985), περιγράφουν την πιο σημαντική από τις υπάρχουσες μεθόδους. Από όλες τις εξισώσεις που προτάθηκαν, ο εκθετικός τύπος του Maillet (1905) είναι ο πιο ευρέως εφαρμόσιμος, έχοντας δοκιμαστεί στα άκρα

υποχώρησης υδρογραφημάτων από πηγές σε όλο τον κόσμο. Λόγω της ευρείας εφαρμογής αλλά και της σχετικά εύκολης χρήσης του, ο τύπος αυτός υιοθετήθηκε και στη παρούσα μελέτη (Σχέση 7.1).

$$Q_t = Q_0 * e^{-\alpha t} \quad (7.1)$$

όπου $\alpha = \frac{1}{T}$ και

Q_t = η παροχή της πηγής σε χρόνο t μετά την έναρξη της στείρευσης (m^3/sec)

Q_0 = η παροχή της πηγής τη χρονική στιγμή έναρξης της στείρευσης (m^3/sec)

α = συντελεστής στείρευσης ($days^{-1}$)

T = ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η παροχή της πηγής από 1 σε $1/e$ της αρχικής παροχής Q_0 (days)

e = η βάση του φυσικού λογαρίθμου (≈ 2.718)

Η αποτύπωση σε ημι-λογαριθμική κλίμακα της παροχής (εκφόρτισης) μιας πηγής, κατά τη διάρκεια της καμπύλης στείρευσης, σε συνάρτηση με το χρόνο, αποδίδεται θεωρητικά από μία ευθεία γραμμή, της οποίας η κλίση είναι ο συντελεστής στείρευσης (α), ο οποίος αποτελεί μια χαρακτηριστική παράμετρο του καρστικού συστήματος. Σε μία υδρογεωλογική λεκάνη, καλά διακεκριμένη, όπου τα υδροφόρα στρώματα τροφοδοτούνται από τα κατακρημνίσματα, χωρίς απώλειες προς γειτονικές λεκάνες και χωρίς πρόσθετες εξωτερικές τροφοδοσίες, ο συντελεστής στείρευσης είναι συνάρτηση των εξής παραγόντων (Βλαχόπουλος 2016):

○ *Του ποσοστού της ενεργού κατείδυσης.* Αν (I), είναι η ενεργός κατείδυση στη μοναδιαία επιφάνεια και στο μοναδιαίο χρόνο ($m^3/m^2/s$) και (H), το ενεργό πάχος του υδροφόρου στρώματος (m), τότε ισχύει: $\alpha = I/H$. Συνεπώς, ο συντελεστής στείρευσης είναι άμεση συνάρτηση της ενεργού κατείδυσης.

○ *Των διαστάσεων του υδροφόρου στρώματος.* Ο συντελεστής στείρευσης, με σταθερή την ενεργό κατείδυση (I), κυμαίνεται αντιστρόφως ανάλογα προς το ενεργό πάχος του υδροφόρου (H) και του μήκους του, επομένως του όγκου των αποθεμάτων υπόγειου νερού. Η τιμή του συντελεστή είναι τόσο πιο μικρή, όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του αποθηκευμένου υπόγειου νερού μέσα στον υδροφόρο και όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις του τελευταίου. Για δύο υδροφόρα στρώματα, που εμφανίζουν την ίδια τιμή της Q_0 , η πιο μικρή τιμή του συντελεστή στείρευσης (α) αντιστοιχεί σε πιο μεγάλο υδατικό απόθεμα, σε σχέση με τη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή αυτού.

○ *Του ενεργού πορώδους ή του συντελεστή εναποθήκευσης (S) του υδροφόρου.* Η τιμή του συντελεστή στείρευσης (α) είναι αντιστρόφως ανάλογη των υδραυλικών αυτών παραμέτρων.

ο Της υδραυλικής αγωγιμότητας (K). Η τιμή του συντελεστή στείρευσης (α) είναι άμεση συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφόρου στρώματος.

Με βάση τα παραπάνω, ο συντελεστής στείρευσης (α), είναι τόσο πιο μεγάλος (επομένως και η εκκένωση του υδροφόρου πιο γρήγορη), όσο ο όγκος του υδροφόρου είναι μικρότερος, η ενεργός κατείσδυσή του μικρότερη και η υδραυλική αγωγιμότητά του μεγαλύτερη. Είναι τόσο πιο μικρός (επομένως και η εκκένωση του υδροφόρου πιο αργή), όσο ο όγκος του υδροφόρου είναι μεγαλύτερος, η ενεργός κατείσδυσή του μεγαλύτερη και η υδραυλική αγωγιμότητά του μικρότερη.

Ο συντελεστής στείρευσης έχει μεγάλη περιβαλλοντική σημασία, όχι μόνο γιατί ρυθμίζει τη λειτουργία μιας πηγής, αλλά και γιατί στην έννοιά του συμπεριλαμβάνονται βασικές παράμετροι του γεωλογικού και υδατικού περιβάλλοντος, όπως η ενεργός κατείσδυση, οι διαστάσεις του υδροφόρου, το ενεργό πορώδες και οι υδραυλικές παράμετροί του.

Σε πολλές περιπτώσεις η καμπύλη στείρευσης, ενός υδρογράμματος μιας πηγής, δεν μπορεί να περιγραφεί από μια ενιαία εξίσωση στείρευσης της μορφής που περιγράφηκε προηγουμένως (Σχέση 7.1). Ωστόσο, εάν η περίοδος στείρευσης μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερα τμήματα, τότε δύναται να επιλυθούν μεμονωμένες εξισώσεις για καθένα από τα τμήματα αυτά, δίνοντας έτσι ένα βελτιωμένο αποτέλεσμα. Αυτό τεκμηριώθηκε για πρώτη φορά από τον Schoeller (1948, 1962, 1967), ο οποίος πρότεινε ότι οι σύνθετες καμπύλες στείρευσης μπορούν να περιγραφούν καλύτερα από την ακόλουθη Εξίσωση 7.2, ως ένα σύνολο ατομικών μικρότερων καμπύλων στείρευσης μεταβλητής διάρκειας:

$$Q_t = \sum_{i=1}^j Q_{tj} = \sum_{i=1}^j Q_{0j} * e^{-\alpha_j t_j} \quad (7.2)$$

όπου j , κάθε μία από τις μικρότερες καμπύλες ύφεσης και επί της αρχής:

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_j \text{ και } Q_1 > Q_2 > \dots > Q_j$$

Με αυτό τον τρόπο, κάθε τμήμα της καμπύλης στείρευσης περιγράφεται από έναν διαφορετικό συντελεστή, ο οποίος αντανακλά συγκεκριμένους μηχανισμούς εκφόρτισης του καρστικού συστήματος. Τα πρώιμα τμήματα της στείρευσης φανερώνουν την εκφόρτιση μεγάλων καναλιών και αγωγών, ενώ τα τελευταία τμήματα αντιπροσωπεύουν τη ροή μέσω του μεγαλύτερου μέρους του καρστ, μέσα από μικρότερους αγωγούς και διακλάσεις. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι, ο συντελεστής στείρευσης δεν είναι απαραίτητα σταθερός για ολόκληρη την καμπύλη στείρευσης, πολύ περισσότερο δε για επακόλουθες στείρευσεις, κατά τη διάρκεια του ίδιου ή επόμενων ετών.

Τα διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων παροχής για τις δύο πηγές αναφοράς της περιοχής έρευνας, καλύπτουν το χρονικό διάστημα από 1972-2018. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν από το προσωπικό της Διεύθυνσης Υδάτων Θεσσαλίας και παλαιότερα της Διεύθυνσης Εγγείων Βελτιώσεων Λάρισας, σε ειδικά διαμορφωμένες θέσεις, σε

τυχαίες ημερομηνίες μία φορά το μήνα. Λόγω της φύσης των διαθέσιμων δεδομένων, δεν είναι δυνατό να εξαχθούν οι μέσες τιμές παροχών και κατά συνέπεια, υπάρχει η πιθανότητα ορισμένες από τις μετρήσεις να οδηγούν σε λανθασμένα συμπεράσματα, εφόσον αυτές ενδέχεται να πραγματοποιήθηκαν πριν ή αμέσως μετά από ένα έντονο γεγονός βροχόπτωσης. Αν και το χρονικό διάστημα των δεδομένων αυτών είναι αρκετά μεγάλο, ωστόσο υπάρχουν σοβαρές ελλείψεις στις μετρήσεις, ειδικά κατά τη διάρκεια των περιόδων στέρησης. Θεωρήθηκε ότι η συμπλήρωση των δεδομένων αυτών, ακολουθώντας μια μέθοδο παρόμοια με αυτή που ακολουθείται στα δεδομένα των βροχοπτώσεων, δεν θα παρήγαγε αξιόπιστα αποτελέσματα για τους ακόλουθους λόγους:

1) σε ορισμένες χρονικές περιόδους, οι μετρήσεις της παροχής λείπουν και από τις δύο πηγές, Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας.

2) ο μέσος συντελεστής συσχέτισης, μεταξύ των δεδομένων της παροχής, δεν είναι εξαιρετικά υψηλός και επίσης υπάρχουν ενδείξεις, ότι οι ζώνες τροφοδοσίας και απορροής δεν είναι κοινές για τις δύο πηγές, τουλάχιστον όχι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Για το λόγο αυτό, οποιαδήποτε παρεμβολή μέσω ενός αλγορίθμου μετασχηματισμού θα ήταν εντελώς παρακινδυνευμένη.

3) όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μετρήσεις δεν αντιπροσωπεύουν τις μέσες μηνιαίες παροχές, αλλά είναι τυχαίες τιμές που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε λανθασμένες εκτιμήσεις. Οποιαδήποτε προσπάθεια συμπλήρωσης δεδομένων θα εμπειρείχε τον κίνδυνο συνεπώς, να εισαγάγει το ίδιο σφάλμα και στην άλλη καταγραφή.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα προκύπτει, ότι η ανάλυση των υδρογραφημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για ετήσιες περιόδους στέρησης ορισμένων μόνο ετών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης υδρογραφημάτων στέρησης, που διενεργήθηκαν έως και το 1992, στηρίχθηκαν στον Panagoroulos (1995) ενώ από το 1993 έως το 2018 προέκυψαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας (ουσιαστικά μόνο για τις πηγές Μάτι Τυρνάβου) και απεικονίζονται στον Πίνακα 7.3. Σημειώνεται ότι, για τις πηγές της Αγίας Άννας, οι ούτως ή άλλως χαμηλές τιμές παροχής τους, μετά το 1992 και ειδικά στις περιόδους στέρησης πρακτικά μηδενίζονται. Ως εκ τούτου δεν κατέστη εφικτή η ανάλυση των υδρογραφημάτων των πηγών αυτών μετά το 1992. Σημειώνεται ότι η στέρηση που εμφανίζουν οι πηγές Αγίας Άννας, οφείλεται μερικώς στην υδρομάστευσή τους μέσω γεωτρήσεων για την επικουρική κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της πόλης του Τυρνάβου.

Πίνακας 7.3. Αποτελέσματα από την ανάλυση των υδρογραμμάτων των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγία Άννας (με γκρι φόντο δεδομένα από Ραπαγορούλιος 1995).

Έτος	Πηγή	Περίοδος Στείρευσης	Διάρκεια t (days)	ln (Q _t /Q ₀)	α (days ⁻¹)
1973	Μάτι Τυρνάβου	Μάιος-Σεπτέμβριος	150	-1.800	0.0120
1974	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Οκτώβριος	210	-1.575	0.0075
1975	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Σεπτέμβριος	180	-0.846	0.0047
1977	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Σεπτέμβριος	180	-1.116	0.0062
1986	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Οκτώβριος	210	-1.932	0.0092
1987	Μάτι Τυρνάβου	Ιούνιος-Αύγουστος	90	-1.800	0.0200
1988	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Σεπτέμβριος	180	-3.402	0.0189
1989	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Σεπτέμβριος	180	-7.542	0.0419
1990	Μάτι Τυρνάβου	Μάρτιος-Αύγουστος	180	-6.624	0.0368
1991	Μάτι Τυρνάβου	Ιούνιος-Οκτώβριος	150	-1.455	0.0097
1992	Μάτι Τυρνάβου	Μάιος-Αύγουστος	120	-1.584	0.0132
1993	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Αύγουστος	127	-7.696	0.0606
1995	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Αύγουστος	149	-4.431	0.0297
1996	Μάτι Τυρνάβου	Μάρτιος-Σεπτέμβριος	182	-2.844	0.0156
1997	Μάτι Τυρνάβου	Μάιος-Αύγουστος	92	-4.718	0.0513
1999	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Ιούλιος	86	-0.889	0.0103
2002	Μάτι Τυρνάβου	Μάιος-Ιούλιος	52	-2.681	0.0516
2003	Μάτι Τυρνάβου	Φεβρουάριος-Αύγουστος	182	-4.822	0.0265
2004	Μάτι Τυρνάβου	Μάρτιος-Σεπτέμβριος	179	-6.607	0.0369
2005	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Αύγουστος	121	-7.378	0.0610
2006	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Σεπτέμβριος	158	-4.470	0.0283
2007	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Αύγουστος	125	-7.021	0.0562
2008	Μάτι Τυρνάβου	Μάρτιος-Αύγουστος	160	-7.170	0.0448
2009	Μάτι Τυρνάβου	Μάιος-Ιούλιος	73	-4.092	0.0560
2012	Μάτι Τυρνάβου	Μάρτιος-Ιούλιος	176	-7.728	0.0439
2015	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Αύγουστος	139	-7.762	0.0558
2017	Μάτι Τυρνάβου	Απρίλιος-Σεπτέμβριος	154	-7.923	0.0514
2018	Μάτι Τυρνάβου	Μάρτιος-Σεπτέμβριος	176	-2.353	0.0134
Έτος	Πηγή	Περίοδος Στείρευσης	Διάρκεια t (days)	ln (Q _t /Q ₀)	α (days ⁻¹)
1973	Αγία Άννα	Μάιος-Σεπτέμβριος	180	-2.113	0.0117
1974	Αγία Άννα	Μάιος-Σεπτέμβριος	180	-2.651	0.0147
1975	Αγία Άννα	Μάιος-Σεπτέμβριος	180	-3.274	0.0182
1976	Αγία Άννα	Μάιος-Σεπτέμβριος	180	-0.828	0.0046
1978	Αγία Άννα	Απρίλιος-Αύγουστος	120	-5.747	0.0479
1985	Αγία Άννα	Μάιος-Σεπτέμβριος	180	-5.098	0.0283
1987	Αγία Άννα	Μάιος-Αύγουστος	150	-9.774	0.0652
1991	Αγία Άννα	Μάιος-Αύγουστος	150	-7.046	0.0470

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.3, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των υδρογραφημάτων στείρευσης για 17 επιπλέον έτη για τις πηγές Μάτι Τυρνάβου,

σύμφωνα με τη Σχέση 7.1. Η επιλογή των ετών, για τα οποία έγινε ανάλυση, βασίστηκε στην ύπαρξη καταγραφών από τη Διεύθυνση Υδάτων Θεσσαλίας.

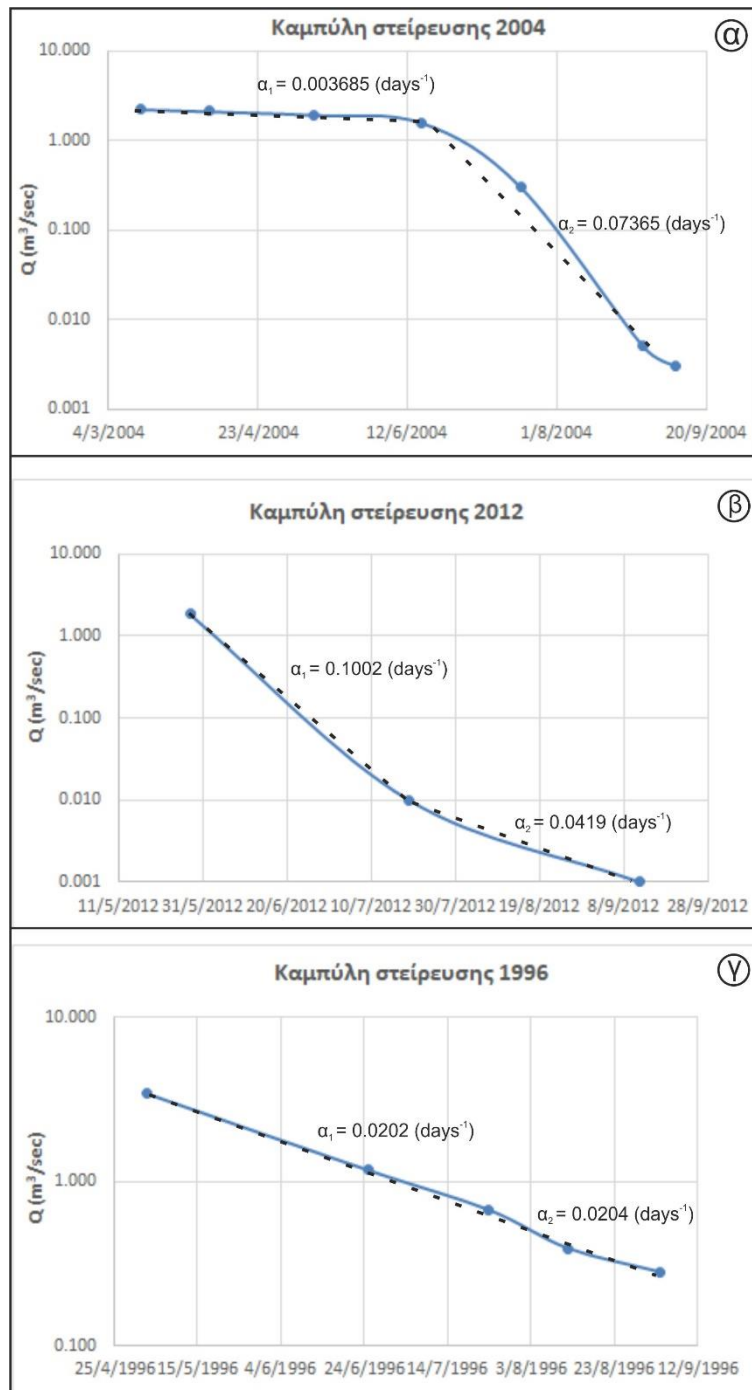
Τα σημεία (μήνες αναφοράς) που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να περιγράφονται ικανοποιητικά από το εκθετικό μοντέλο του Mailliet (1905), για κάθε έτος που αναλύθηκε, κυμαίνονταν από τρία έως επτά. Γίνεται αντιληπτό ότι, σε όσο περισσότερα σημεία βασίζεται η ανάλυση της εκθετικής καμπύλης, τόσο τα εξαγόμενα αποτελέσματα θα έχουν μεγαλύτερη στατιστική σημασία, καθώς έλαβε χώρα πιο στενή παρακολούθηση της εκφόρτισης της πηγής. Σημειώνεται επίσης, ότι πριν αναλυθεί κάθε περίοδος στέρησης, τα επιλεγμένα σημεία αντιμετωπίστηκαν ως μέρος του συνολικού υδρογραφήματος, έτσι ώστε να αποκλειστεί το ενδεχόμενο ακραίων τιμών, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Τέτοιες ακραίες τιμές θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύουν την απόκριση του συστήματος σε ένα μεμονωμένο γεγονός (π.χ. καταιγίδα, τεχνητή εκφόρτιση από τις πηγές) και όχι μια μέση απόκριση, την οποία πρέπει να αντιπροσωπεύουν τέτοιες μετρήσεις. Έτσι, οι ασυνήθιστα υψηλές ή χαμηλές τιμές παροχής στις χρονολογικές σειρές δεν ελήφθησαν υπόψη.

Η μεταβλητότητα που παρουσιάζεται στην περίοδο στέρησης των πηγών (3-7 μήνες) αποδίδεται στο πρότυπο βροχόπτωσης κάθε έτους σε συνδυασμό με την τεχνητή εκφόρτιση από την περιοχή των πηγών. Ένα σχετικά ξηρό έτος, με παρατεταμένη καλοκαιρινή ξηρασία, έχει ως αποτέλεσμα μια πιο εκτεταμένη περίοδο στέρησης, σε σχέση με ένα πιο υγρό έτος.

Κατά τη διάρκεια της μελέτης των υδρογραφημάτων παρατηρήθηκε ότι, σε πολλές περιπτώσεις, η εξίσωση του Mailliet (1905) δεν ταιριάζει απόλυτα με τις καταγεγραμμένες τιμές παροχής. Επειδή το θεωρητικό μοντέλο, στο οποίο βασίζεται η εξίσωση του Mailliet (1905), δεν είναι πλήρως εφαρμόσιμο στα φυσικά συστήματα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τέτοιες αποκλίσεις είναι αναμενόμενες. Για το λόγο αυτό έγινε προσπάθεια μιας καλύτερης προσαρμογής των δεδομένων, διαιρώντας το άκρο της καμπύλης στέρησης σε δύο διαδοχικές περιόδους στέρησης μικρότερης διάρκειας, ακολουθώντας την προσέγγιση του Schoeller (1948, 1962, 1967) (Σχέση 7.2). Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, διαπιστώθηκε ότι το πρώτο από τα δύο τμήματα χαρακτηρίστηκε από χαμηλότερο συντελεστή στέρησης από ότι το δεύτερο, κάτι το οποίο αντιτίθεται στο θεωρητικά αναμενόμενο αποτέλεσμα σύμφωνα με το πρότυπο του Schoeller (1948, 1962, 1967). Οι διαφορές στους υπολογιζόμενους συντελεστές στέρησης ήταν έως και μία τάξη μεγέθους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης παρατηρήθηκε στην περίοδο στέρησης του 2004 για την πηγή Μάτι Τυρνάβου, όπου ο υπολογιζόμενος συντελεστής για το πρώτο τμήμα είναι $\alpha_1 = 0.003685 \text{ days}^{-1}$, ενώ για το δεύτερο $\alpha_2 = 0.07365 \text{ days}^{-1}$ (Εικόνα 7.16α). Αυτό το μοτίβο, αν και αντιβαίνει στις βασικές αρχές δομής και λειτουργίας ενός καρστικού συστήματος, θα μπορούσε να αποδοθεί στους μηχανισμούς ροής του καρστικού συστήματος: Κατά την έναρξη της περιόδου

στείρευσης, το καρστικό σύστημα που είναι πληρωμένο με νερό, εκφορτίζεται από τις πηγές με έναν πιο ρυθμιζόμενο τρόπο (χαμηλή τιμή του α). Στη συνέχεια, καθώς η στείρευση συνεχίζεται, το υδραυλικό φορτίο στο σύστημα μειώνεται, καθώς η αποθηκευτικότητα μειώνεται, και το σύστημα δεν μπορεί πλέον να διατηρήσει την αρχική ροή. Αυτή η κατάσταση αντικατοπτρίζεται από το δεύτερο τμήμα της καμπύλης στείρευσης (υψηλότερη τιμή του α). Ωστόσο, γνωρίζοντας τις πιέσεις που δέχεται το καρστικό σύστημα, η εικόνα αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί, μάλιστα με μεγαλύτερη ασφάλεια, στην βεβιασμένη (μη φυσική) εκφόρτιση του συστήματος μέσω των πολυάριθμων υδροληπτικών έργων που το υδρομαστεύουν, τόσο εγγύς των θέσεων εκδήλωσης των πηγών, όσο και περιμετρικά στα όρια επιφανειακής ανάπτυξής του. Η (υπερ)εκμετάλλευση των υδατικών του αποθεμάτων εκκινεί χρονικά κατά την περίοδο των αρδεύσεων, που ταυτίζεται με το δεύτερο τμήμα της καμπύλης στείρευσης, είναι δε εντονότερη κατά τα έτη υψηλής ξηρασίας και θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια των οποίων οι αρδευτικές ανάγκες αυξάνονται. Έτσι, η αφαίρεση σημαντικών όγκων νερού από το καρστικό σύστημα με τεχνητό τρόπο (αντλήσεις), αποδίδεται στο υδρογράφημα της πηγής ως απόκριση άμεσης εκφόρτισης μέσω δικτύου μεγάλων αγωγών, που αποτελεί παράδοξο για τη φυσική λειτουργία τέτοιων υδροφόρων.

Σε κάποιες λίγες περιπτώσεις το μοντέλο, που προέκυψε από την ανάλυση της περιόδου στείρευσης σε δύο τμήματα, ήρθε σε συμφωνία με το θεωρητικό μοντέλο του Schoeller (1948, 1962, 1967) (Σχέση 7.2). Μια τυπική περίπτωση συμφωνίας, απεικονίζεται στην Εικόνα 7.16β για τις πηγές Μάτι Τυρνάβου το έτος 2012, όπου ο αρχικός συντελεστής στείρευσης είναι $\alpha_1 = 0.1002 \text{ days}^{-1}$, ενώ ο δεύτερος είναι $\alpha_2 = 0.0419 \text{ days}^{-1}$. Τέλος, σε πιο σπάνιες περιπτώσεις, διαπιστώθηκε ότι οι δύο συντελεστές στείρευσης, μετά την ανάλυση της καμπύλης σε δύο τμήματα, έχουν σχεδόν απόλυτη ταύτιση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.16γ, για τις ίδιες πηγές και για το έτος 1996.

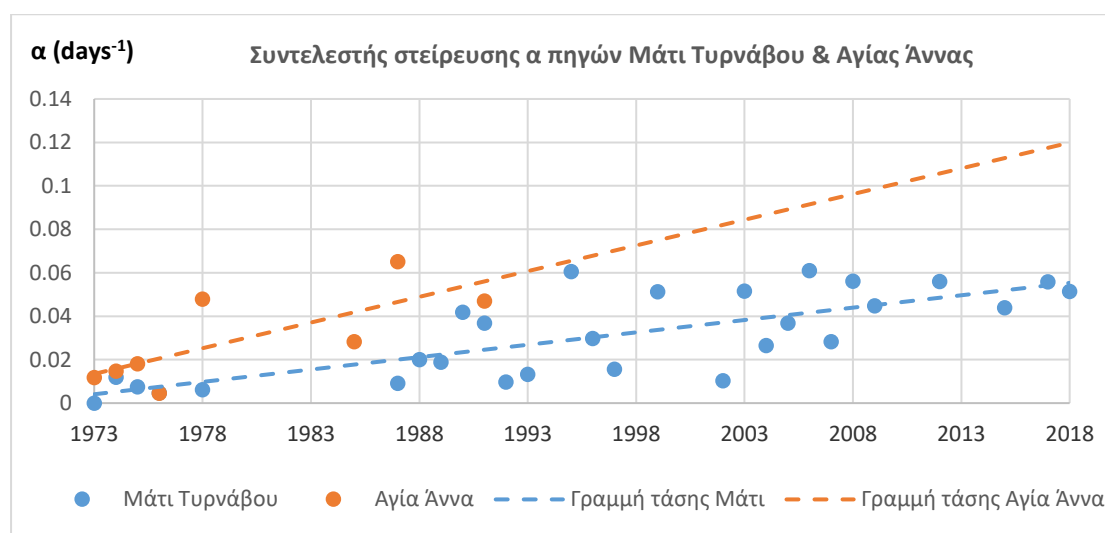


Εικόνα 7.16. Τυπικά παραδείγματα από την ανάλυση της καμπύλης στείρευσης, των πηγών Μάτι Τυρνάβου, σε δύο τμήματα.

Παρότι, η προσαρμογή που επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση της καμπύλης στείρευσης ως ενιαία καμπύλη, είναι χαμηλή, υπολογίστηκε ωστόσο ένας μέσος συντελεστής στείρευσης για κάθε έτος, όπως φαίνεται στο Πίνακα 7.3. Αυτό θεωρήθηκε απαραίτητο, έτσι ώστε να μελετηθεί η εξέλιξη των συντελεστών στείρευσης των δύο πηγών καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, εξάγοντας έτσι συμπεράσματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά του καρστικού συστήματος. Οι υπολογιζόμενες τιμές αντικατοπτρίζουν ένα καλά αναπτυγμένο καρστ, στο οποίο δεν

έχουν δημιουργηθεί μεγάλοι μεγέθους καρστικές μορφές, γεγονός που αποδεικνύεται και από τη μελέτη των διαθέσιμων λιθολογικών τομών των γεωτρήσεων της περιοχής. Παράλληλα, η συχνή εμφάνιση του μοντέλου στείρευσης που περιγράφηκε προηγουμένως, στο οποίο ο αρχικός συντελεστής στείρευσης είναι μικρότερος (το αρχικό τμήμα της καμπύλης είναι πιο επίπεδο) από τον επόμενο, υποδηλώνει μια όχι και τόσο μεγάλη λεκάνη απορροής των πηγών.

Αν και ο συντελεστής στείρευσης, όπως ήδη ειπώθηκε, αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο του καρστικού συστήματος, η τιμή του διαχρονικά δεν παραμένει σταθερή, αντικατοπτρίζοντας τελικά και την απόκριση του συστήματος στις συνθήκες τροφοδοσίας και εκμετάλλευσής του. Στο Διάγραμμα 7.4 παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή των συντελεστών στείρευσης (α) για τις πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας, από την οποία προκύπτει μια γενική αυξητική τάση των συντελεστών αυτών από το 1973 έως και το 2018 (έως το 1992 για τις πηγές Αγίας Άννας).



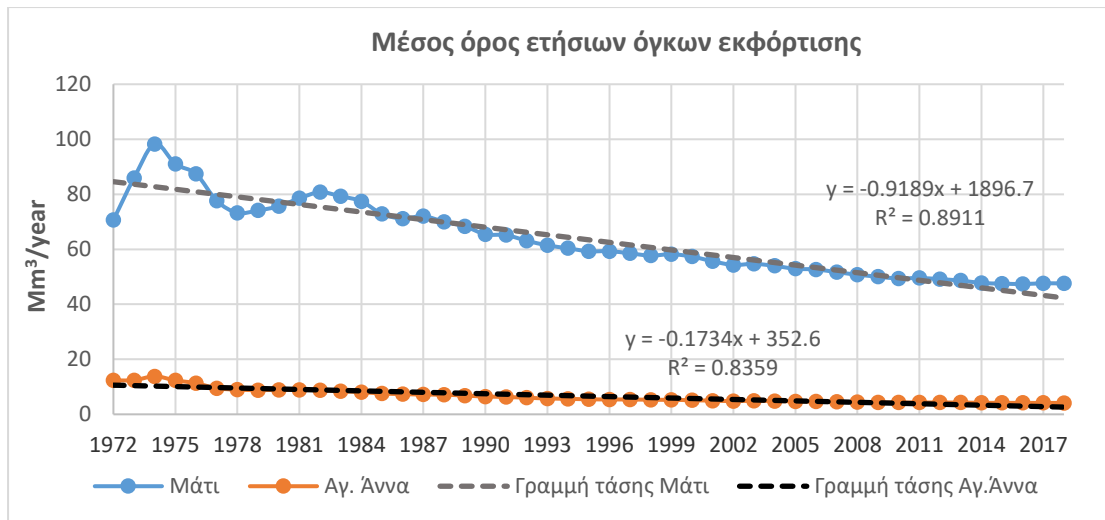
Διάγραμμα 7.4. Διαχρονική μεταβολή των συντελεστών στείρευσης των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας.

Αυτή η καταγεγραμμένη αυξητική τάση των τιμών των συντελεστών στείρευσης και για τις δύο πηγές, αντικατοπτρίζει τη συστηματική εκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής, η οποία ξεκίνησε το 1974 και εντατικοποιήθηκε μετά το 1986, καθώς τότε καταγράφεται η έναρξη των συστηματικών και έντονων πτώσεων στάθμης των υδρογεωτρήσεων, όπως ειπώθηκε στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του Κεφαλαίου. Σημαντικές αντλήσεις λαμβάνουν χώρα τόσο στην αλλουβιακή υπολεκάνη του Τυρνάβου, όπως επίσης και στη μικρότερη περιθωριακή αλλουβιακή υπολεκάνη του Δαμασίου στα νοτιοδυτικά της κύριας μάζας του καρστικού όγκου (Εικόνα 6.3), η οποία βρίσκεται και αυτή σε υδραυλική αλληλεπίδραση με το καρστικό σύστημα (Μαρίνος κ.α. 1991, Panagoroulos 1995). Αντλήσεις νερού πραγματοποιούνται επίσης και από

γεωτρήσεις, που έχουν ανορυχθεί κοντά στις πηγές καθώς και από τη μικρή λίμνη Αργυροπουλίου, που έχει δημιουργηθεί μπροστά από το σημείο εκδήλωσης των πηγών Μάτι Τυρνάβου. Μετά το 1990 συστηματικές αντλήσεις νερού ξεκίνησαν να υφίστανται και στην περιθωριακή αλλουβιακή λεκάνη της Τσαριτσάνης, στο βορειοδυτικό περιθώριο του κύριου καρστικού όγκου, η οποία και αυτή είναι σε υδραυλική επικοινωνία με το καρστ (Βασιλείου 2011). Όλες αυτές οι επιβαλλόμενες στο καρστικό σύστημα αντλήσεις, οδήγησαν σε μια προοδευτικά μειωμένη επανατροφοδότησή του, η οποία αντανακλάται από μια αντίστοιχη προοδευτική αύξηση των συντελεστών στέρησης των πηγών, που το εκφορτίζουν, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7.4.

Από τις δύο πηγές αναφοράς, οι πηγές Μάτι Τυρνάβου είναι αυτές που εκφορτίζουν το μεγαλύτερο ποσοστό του καρστικού συστήματος, έναντι των πηγών της Αγίας Άννας. Η μέγιστη καταγεγραμμένη παροχή, με βάση τα στοιχεία της Διεύθυνσης Υδάτων Θεσσαλίας (1972-2018), είναι $7,303 \text{ m}^3/\text{sec}$ τον Απρίλιο του 1981 και ο μέσος ετήσιος όγκος εκφόρτισης είναι $47.57 \text{ Mm}^3/\text{year}$, έναντι $64.35 \text{ Mm}^3/\text{year}$ που ήταν έως και το 1992 (Panagoroulos 1995). Παρατηρείται δηλαδή μια πτώση περίπου 26% περίπου στο μέσο όγκο εκφόρτισης των πηγών αυτών μέσα σε ένα χρονικό διάστημα 26 ετών (1993-2018), δηλαδή 1% ανά έτος μετά το 1992. Αντίστοιχα για τις πηγές Αγίας Άννας, η μέγιστη καταγεγραμμένη παροχή είναι $0.896 \text{ m}^3/\text{sec}$ τον Μάρτιο του 1975 και ο μέσος όγκος εκφόρτισης είναι $4.13 \text{ Mm}^3/\text{year}$, έναντι $6.39 \text{ Mm}^3/\text{year}$ που ήταν έως και το 1992 (Panagoroulos 1995). Η πτώση του μέσου όγκου εκφόρτισης, στην περίπτωση αυτή, είναι περίπου 35% περίπου στο χρονικό διάστημα των 26 ετών (1.35% ανά έτος).

Στο Διάγραμμα 7.5 αποτυπώνεται η μεταβολή του μέσου όρου των ετήσιων όγκων εκφόρτισης για τις πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας, αρχής γενομένης από το έτος 1972. Από το διάγραμμα αυτό, για τις πηγές Μάτι, προκύπτει ότι, από το 1972 έως και το 1986, ο μέσος όρος παρουσιάζει περιοδικές αυξομειώσεις με μια γενική πτωτική τάση, από το 1987 έως και το 2013 φθίνει συνεχώς, ενώ από το 2014 έως και το 2018 αποκτά μια σταθερή τιμή. Τα χρονικά αυτά διαστήματα έρχονται σε συμφωνία, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, με την έναρξη της συστηματικής εκμετάλλευσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής (1974), και με την εντατικοποίησή της από το 1986 και έπειτα. Επίσης, όπως θα ειπωθεί σε επόμενο Κεφάλαιο, η πτωτική αυτή τάση φαίνεται να εξισορροπείται τα τελευταία χρόνια, στα τμήματα της περιοχής έρευνας πλησίον των πηγών. Αναφορικά με τις πηγές Αγίας Άννας, τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα δεν διαχωρίζονται εμφανώς λόγω των χαμηλών τιμών των παροχών τους, οι οποίες σε γενικές γραμμές ακολουθούν μια σχετικά χαμηλή πτωτική τάση. Τέλος, στο Διάγραμμα 7.6 παρουσιάζονται οι ετήσιοι όγκοι εκφόρτισης, για τις 2 πηγές, για το χρονικό διάστημα από το 1972 έως και το 2018, όπου αποτυπώνεται και η συνεχόμενη μείωση των όγκων αυτών, λόγω της αυξανόμενης εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων.



Διάγραμμα 7.5. Μεταβολή του μέσου όρου των ετήσιων όγκων εκφόρτισης για τις πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας.



Διάγραμμα 7.6. Ετήσιοι όγκοι νερού που εκφορτίζονται από τις πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας.

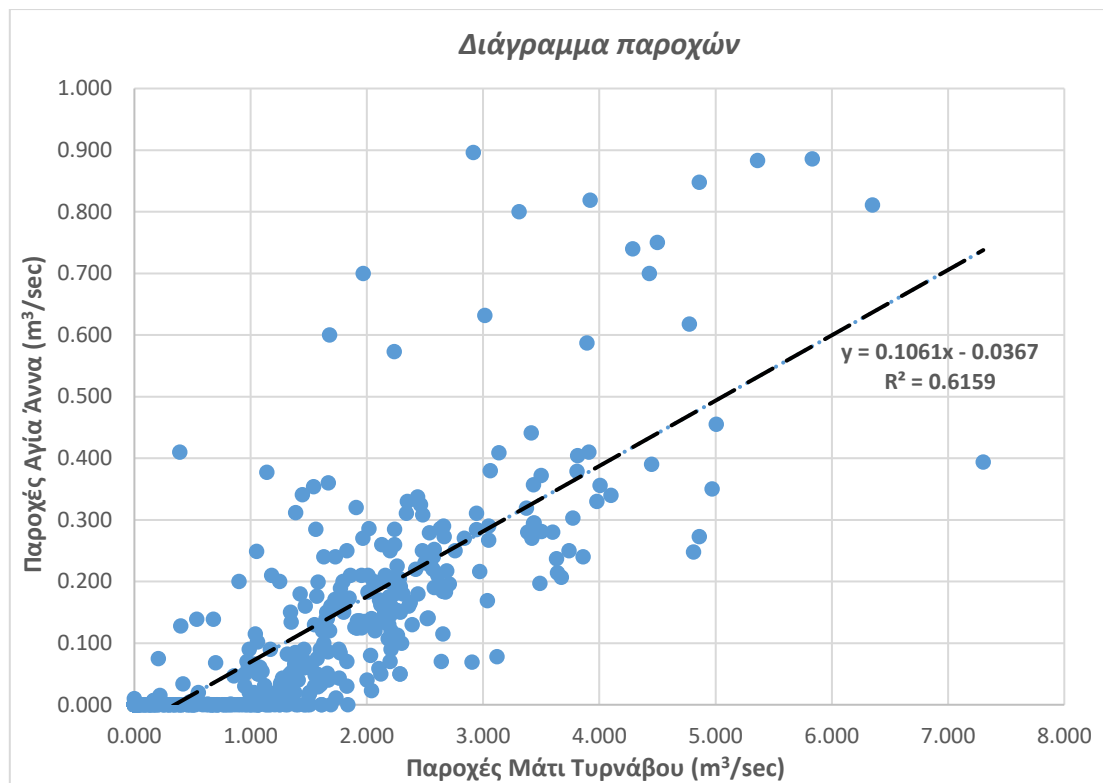
7.5.2 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΠΗΓΩΝ

Η αρχική θεώρηση, σχετικά με την τροφοδοσία των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας, ήταν ότι το καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου, ως ενιαίος όγκος, αποτελούσε την κοινή περιοχή τροφοδοσίας και για τις δύο πηγές. Σύμφωνα με αυτή την περίπτωση θα έπρεπε, οι δύο πηγές, να έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια αναλύονται τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών πηγών, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί ή όχι η παραπάνω θεώρηση.

Οι τιμές του συντελεστή στέρσεως των πηγών Μάτι Τυρνάβου είναι σε γενικές γραμμές μικρότερες, από αυτές που υπολογίστηκαν για τις πηγές της Αγίας Άννας,

χωρίς αυτές οι διαφορές, ωστόσο, να θεωρούνται σημαντικές. Επίσης, αποδεικνύεται ότι ο ρυθμός αύξησης των τιμών αυτών είναι υψηλότερος για τις πηγές Αγίας Άννας από ότι για τις πηγές Μάτι Τυρνάβου (Διάγραμμα 7.4), με βάση τα συγκρίσιμα δεδομένα έως και το 1992, όπου δύναται να εξαχθούν τιμές του συντελεστή (α) για τις πηγές Αγίας Άννας (Panagoroulos 1995). Οι διαφορές αυτές μπορούν να δικαιολογηθούν εν μέρει με βάση τη γεωμετρία των δύο πηγών. Όπως ειπώθηκε στο Κεφάλαιο 6 (Εικόνα 6.7), οι πηγές Μάτι Τυρνάβου σχηματίζονται στην επαφή των πλευρικών κορημάτων των με τα αλλουβιακά ιζήματα της υπολεκάνης του Τυρνάβου. Τα πλευρικά αυτά κορήματα αποτελούν ουσιαστικά ρυθμιστικό παράγοντα της εκφόρτισης των συγκεκριμένων πηγών, και έτσι εξασφαλίζεται μια παρατεταμένη και ομαλή εκφόρτιση, η οποία θα μπορούσε να είναι ο λόγος του χαμηλότερου συντελεστή στείρευσης που εξάγεται για τις πηγές αυτές. Από την άλλη πλευρά, οι πηγές της Αγίας Άννας αναδύονται στην επαφή μεταξύ ενός μικρού καρστικού θόλου με τα αλλουβιακά ιζήματα, χωρίς την παρεμβολή των πλευρικών κορημάτων, που παίζουν το ρόλο ρυθμιστή στην προηγούμενη περίπτωση. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση των πηγών Μάτι Τυρνάβου, η επαφή καρστικού σώματος-μεταλλικών ιζημάτων βρίσκεται σε χαμηλότερη τοπογραφικά θέση, γεγονός το οποίο εξασφαλίζει ότι δέχονται μεγαλύτερο όγκο υδάτων από ότι οι πηγές της Αγίας Άννας.

Ο μέσος συντελεστής συσχέτισης, με βάση τις 424 κοινές καταγραφές των παροχών των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας (1972-2018), υπολογίστηκε με βάση τη Σχέση 5.11, ότι είναι $r = 0.78$. Για τις παροχές πηγών, η τιμή αυτή του συντελεστή, σύμφωνα με τον Σούλιο (1985), είναι ενδεικτική μιας υψηλής αλλά όχι απόλυτης συσχέτισης. Επιπρόσθετα, οι κοινές καταγραφές των παροχών των δύο πηγών, πραγματοποιήθηκε γραμμική παλινδρόμηση, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7.7. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2), όπως προκύπτει από το διάγραμμα αυτό είναι $R^2 = 0.6159$, μια τιμή σχετικά χαμηλή, η οποία δηλώνει μεγάλη διασπορά του σφάλματος παλινδρόμησης και κατά συνέπεια μία όχι καλή πρόβλεψη που βασίζεται στην ευθεία παλινδρόμησης. Στην περίπτωση που οι δύο πηγές είχαν κοινή περιοχή τροφοδοσίας, τα προβαλλόμενα σημεία της γραφικής παράστασης, θα έπρεπε να ήταν περισσότερο συγκεντρωμένα και η γραμμή τάσης της γραμμικής παλινδρόμησης θα έπρεπε να έχει μια καλύτερη προσαρμογή.



Διάγραμμα 7.7. Διάγραμμα παροχών για τις πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας.

Από τις παρατηρήσεις των μηνιαίων τιμών των παροχών των δύο πηγών σε σχέση με τις βροχοπτώσεις, προκύπτει ότι και οι δύο έχουν τον ίδιο χρόνο απόκρισης, με εξαίρεση ίσως τις πολύ ξηρές περιόδους, κατά τις οποίες η πηγή Μάτι Τυρνάβου παρουσιάζει ελαφρώς βραδύτερη απόκριση. Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται στον ρυθμιστικό ρόλο, τον οποίο συντελούν τα μετά-αλπικά ιζήματα, που παρεμβάλλονται πριν από την εκφόρτιση της συγκεκριμένης πηγής (Εικόνα 6.7). Ωστόσο το γεγονός αυτό, είναι επίσης ενδεικτικό μιας υπολεκάνης τροφοδοσίας μεγαλύτερης από την αντίστοιχη της πηγής Αγίας Άννας. Και για τις δύο πηγές, ο μέσος χρόνος απόκρισης βρέθηκε να είναι περίπου ένας μήνας κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης, στην περίπτωση που τα αποθέματα νερού του συστήματος είναι σημαντικά. Εντούτοις, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες καθώς και τους πρώτους μήνες του φθινοπώρου, όταν τα αποθέματα νερού έχουν εξαντληθεί, ο χρόνος απόκρισης βρέθηκε αυξημένος κατά τρεις με τέσσερις μήνες, όταν είχε προηγηθεί μια παρατεταμένη περίοδος ξηρασίας. Από την έναρξη της εντατικοποίησης της εκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων, την περίοδο 1985-1986, ο χρόνος απόκρισης των πηγών γενικά αυξήθηκε, αντανακλώντας έτσι τα μειωμένα αποθέματα ύδατος που αποθηκεύτηκαν στο καρστικό σύστημα.

Τέλος, από τις ίδιες παρατηρήσεις, παροχών-βροχοπτώσεων, προκύπτει το συμπέρασμα, ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι δύο πηγές έχουν κοινή περιοχή τροφοδοσίας, τον ενιαίο καρστικό όγκο. Ωστόσο, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και τους πρώτους μήνες του φθινοπώρου, καθώς και κατά τη διάρκεια περιόδων

παρατεταμένης ξηρασίας, οι στάθμες των υδάτων μειώνονται και το σύστημα τροφοδοσίας χωρίζεται σε δύο επιμέρους περιοχές τροφοδοσίας. Ως αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού, παρατηρούνται οι μικρές αλλά σταθερές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά των δύο πηγών, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω. Η περιοχή τροφοδοσίας της πηγής Μάτι Τυρνάβου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της Αγίας Άννας, όπως επίσης και η ροή της είναι καλύτερα ρυθμιζόμενη λόγω της εμφάνισης των πλευρικών κορημάτων μεταξύ του καρστ και των αλλουβιακών ιζημάτων, πριν από την εμφάνισή της. Η προτεινόμενη θέση του εποχιακού υπόγειου υδροκρίτη, ο οποίος διαχωρίζει τις περιοχές τροφοδοσίας των δύο πηγών, φαίνεται στην Εικόνα 6.3 και συμπίπτει με τον αντίστοιχο υδροκρίτη, που προτάθηκε από τη μελέτη της Electrowatt Engineering Services (1967).

7.6 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Το ισοζύγιο των επιφανειακών και υπόγειων νερών ή υδρολογικό ισοζύγιο μιας συγκεκριμένης περιοχής προκύπτει από τη μελέτη του υδρολογικού κύκλου του νερού και πιο συγκεκριμένα από την ποσοτική προσέγγιση κάθε σκέλους του. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων υδάτων της περιοχής. Η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου αποσκοπεί στον προσδιορισμό όλων των εισροών και εκροών νερού σε συνδυασμό με τις μεταβολές του αποθηκευμένου όγκου του στη μονάδα του χρόνου. Η θεμελιώδης εξίσωση, η οποία εκφράζει το υδατικό ισοζύγιο των υπόγειων υδατικών συστημάτων περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \pm \Delta S \quad (7.3)$$

όπου:

$\sum Q_{in}$ = οι συνολικές εισροές προς το σύστημα σε m^3/d ,

$\sum Q_{out}$ = οι συνολικές εκροές από το σύστημα σε m^3/d ,

ΔS = οι μεταβολές στην αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος σε m^3/d .

Δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια του έτους αναφοράς 1985, το σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας, η μεταβολή στην αποθηκευτική ικανότητα είναι μηδενική ($\Delta S=0$) και ως εκ τούτου η Εξίσωση 7.3 μπορεί να απλουστευθεί σε:

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \quad (7.4)$$

Οι δύο παράγοντες της Εξίσωσης 7.4, για την περιοχή μελέτης, αναλύονται ως εξής:

$\sum Q_{in} = Q_{\text{κάρστ}} + Q_{\text{ιζημάτων}} + Q_{\text{N-ΝΔ}} + Q_{\text{υποβάθρου}} + Q_{\text{Οσσα}} + Q_{\text{βροχ.λεκάνης}} + Q_{\text{επ.άρδέυσεων}} + Q_{\text{απ.δικτύων}} + Q_{\text{εισ.ποταμών}}$

$$\Sigma Q_{out} = Q_{επέκταση} + Q_{αντλήσεων} + Q_{εκ.ποταμών}$$

όπου:

$Q_{κάρσι}$ = οι πλευρικές υπόγειες εισροές από το καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης

$Q_{ιζημάτων}$ = οι πλευρικές υπόγειες εισροές από τα ιζήματα των λεκανών των ποταμών Τιταρήσιου και Πηνειού προ της εισόδου τους στην υπολεκάνη

Q_{N-NA} = οι πλευρικές υπόγειες εισροές από τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους και από την επέκταση του καρστικού συστήματος προς τα νότια

$Q_{υποβάθρου}$ = οι πλευρικές υπόγειες εισροές από τη διαρρηγμένη και αποσαθρωμένη ζώνη του κρυσταλλοσχιστώδους υποβάθρου της Πελαγονικής ζώνης, στο βόρειο περιθώριο της υπολεκάνης

$Q_{οσσα}$ = οι πλευρικές υπόγειες εισροές από τους ανθρακικούς σχηματισμούς της Όσσας που διαμέσου της ρηξιγενούς τεκτονικής, τροφοδοτούν την ανατολική επέκταση της υπολεκάνης (Κεφάλαιο 11)

$Q_{βροχ.λεκάνης}$ = η απευθείας κατείσδυση βροχόπτωσης στην αλλουβιακή υπολεκάνη

$Q_{επ.αρδεύσεων}$ = οι επιστροφές-επαναδιηθήσεις από τα αρδευτικά δίκτυα

$Q_{απ.δικτύων}$ = οι επιστροφές λόγω απωλειών από τα δίκτυα ύδρευσης

$Q_{εισ.ποταμών}$ = οι διηθήσεις κατά μήκος της κοίτης των ποταμών Τιταρήσιου και Πηνειού

$Q_{επέκταση}$ = οι πλευρικές υπόγειες εκφορτίσεις προς (α) την ανατολική-νοτιοανατολική συνέχεια του αλλουβιακού συστήματος και (β) προς την περιθωριακή αλλουβιακή υπολεκάνη βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης

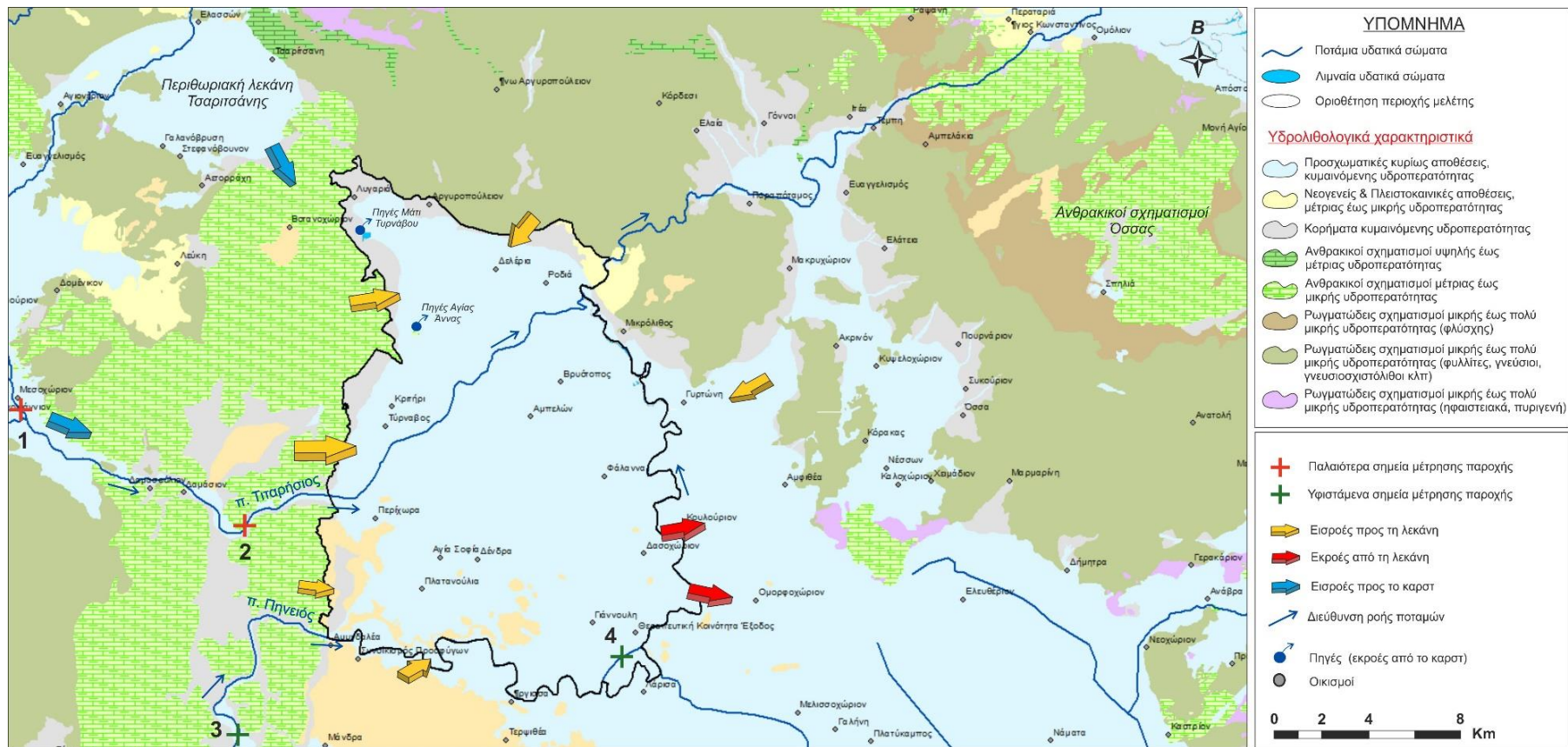
$Q_{αντλήσεων}$ = οι αντλήσεις των γεωτρήσεων για την κάλυψη αρδευτικών, υδρευτικών, κτηνοτροφικών και βιομηχανικών αναγκών

$Q_{εκ.ποταμών}$ = οι εκφορτίσεις του Πηνειού και του Τιταρήσιου ποταμού, κατά μήκος της κοίτης τους.

Σημειώνεται, ότι όλοι οι παραπάνω παράγοντες υπολογίζονται σε $m^3/ημέρα$. Επίσης, η επιφανειακή απορροή, από και προς την περιοχή μελέτης, θεωρήθηκε αμελητέα σε σύγκριση με τους υπόλοιπους παράγοντες που εμπλέκονται στο υδατικό ισοζύγιο του συστήματος και ως εκ τούτου αγνοήθηκε από την τελική εξίσωση. Με βάση τα παραπάνω, ακολουθεί στη συνέχεια ανάλυση για τον υπολογισμό όλων των επιμέρους παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου. Οι παρακάτω υπολογισμοί έχουν ως σκοπό (i) την ανάπτυξη της μεθοδολογίας υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου διαμέσου όλων των παραγόντων του (ii) με στόχο την διαμόρφωση μιας πρώτης εκτίμησης του υδατικού ισοζυγίου, για τα έτη αναφοράς και (iii) την σύνθεση (τροφοδοσία και βαθμονόμηση) του μαθηματικού μοντέλου υπόγειας ροής με δεδομένα, η οποία θα αναπτυχθεί στο 13^ο Κεφάλαιο. Με την εφαρμογή του

μαθηματικού μοντέλου θα ελεγχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, που θα προκύψουν από τον υπολογισμό των επιμέρους παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου, με τις όποιες παραδοχές και απλοποιήσεις έγιναν και οι οποίες θα αναφερθούν στη συνέχεια. Παράλληλα, μέσω του μοντέλου θα επιχειρηθεί η μελέτη της εξέλιξης του υδατικού συστήματος.

Το υδατικό ισοζύγιο υπολογίστηκε για δύο χρονικές περιόδους εκ των οποίων η μία ήταν το ημερολογιακό έτος 2017, ως τμήμα της χρονικής περιόδου συλλογής των πρωτογενών δεδομένων για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής. Για τη δεύτερη χρονική περίοδο, έγινε προσπάθεια να επιλεγεί μία περίοδος κατά την οποία το υδατικό σύστημα της περιοχής μελέτης, βρισκόταν σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας. Κατ' αυτό τον τρόπο, οι υπολογισμοί του υδατικού ισοζυγίου θα απλουστευθούν, καθώς δεν θα σημειώνονται αλλαγές στην αποθηκευτικότητα του συστήματος, εξαλείφοντας έτσι κατά το μέγιστο τις υπεισερχόμενες αβεβαιότητες. Στην ιδανική περίπτωση, το έτος αυτό θα πρέπει να έχει ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης που προηγείται ετών, τα οποία έτη χαρακτηρίζονται επίσης από μέσες ή τουλάχιστον όχι ακραίες βροχοπτώσεις, κατά τα οποία δεν υπήρχαν αντλήσεις ή τουλάχιστον αυτές δεν εξαντλούσαν το υπόγειο υδατικό δυναμικό. Ωστόσο, επειδή δεν ήταν δυνατό να επιτευχθούν ιδανικές συνθήκες, ως δεύτερη χρονική περίοδος επιλέχθηκε το ημερολογιακό έτος 1985, ως το προηγούμενο έτος από το έτος αναφοράς στην μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Καραβοκύρης κ.α. 2014), καθώς τότε καταγράφεται η έναρξη των συστηματικών και έντονων πτώσεων στάθμης στα υπόγεια υδατικά συστήματα της υπολεκάνης. Θεωρήθηκε λοιπόν ότι κατά το έτος 1985, το υδατικό σύστημα βρισκόταν σε οριακές συνθήκες δυναμικής ισορροπίας.



Εικόνα 7.17. Σχηματική απεικόνιση πλευρικών εισροών και εκροών για την περιοχή μελέτης και το καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου.

Πλευρικές υπόγειες εισροές από το καρστικό σύστημα ($Q_{\text{κάρστ}}$)

Οι πλευρικές υπόγειες εισροές από το καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου υπολογίζονται εμμέσως, εφαρμόζοντας την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου αποκλειστικά για το καρστ. Θεωρώντας, χάριν απλούστευσης, ότι το καρστικό σύστημα βρίσκεται σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας και επομένως δεν υφίστανται αξιόλογες μεταβολές στην αποθηκευτική του ικανότητα ($\Delta S=0$), η εφαρμογή της Εξίσωσης 7.4 για το καρστικό σύστημα έχει ως εξής:

$$\sum Q_{\text{karst in}} = \sum Q_{\text{karst out}} \quad (7.5)$$

Οι εισροές προς το καρστικό σύστημα ($Q_{\text{karst in}}$) αποτελούνται από:

$Q_{\text{karst βροχόπτωσης}}$ = η τροφοδοσία του καρστικού συστήματος από την απευθείας κατείδυση της βροχόπτωσης στην περιοχή του καρστ

$Q_{\text{karst Τιταρήσιου}}$ = οι πλευρικές υπόγειες εισροές από νερό διηθούμενο από την κοίτη του ποταμού Τιταρήσιου κατά μήκος του νότιου άκρου του καρστικού συστήματος

$Q_{\text{karst περιθ. λεκάνης}}$ = οι πλευρικές υπόγειες εισροές από την περιθωριακή αλλουβιακή υπολεκάνη της Τσαριτσάνης στο βορειοδυτικό όριο του καρστικού συστήματος.

Ενώ οι εκροές από το καρστικό σύστημα ($Q_{\text{karst out}}$) αποτελούνται από:

$Q_{\text{πηγών}}$ = οι εκφορτίσεις των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας

$Q_{\text{κάρστ}}$ = οι ζητούμενες πλευρικές υπόγειες εισροές του καρστικού συστήματος προς την περιοχή μελέτης.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση η Εξίσωση 7.5 δίνει:

$$Q_{\text{karst βροχόπτωσης}} + Q_{\text{karst Τιταρήσιου}} + Q_{\text{karst περιθ. λεκάνης}} = Q_{\text{πηγών}} + Q_{\text{κάρστ}} \quad (7.6)$$

από την οποία προκύπτουν εμμέσως οι ζητούμενες πλευρικές υπόγειες εισροές του καρστικού συστήματος αφού πρώτα υπολογισθούν οι υπόλοιποι παράγοντες της Εξίσωσης 7.4 (σε $\text{m}^3/\text{ημέρα}$).

Απευθείας κατείδυση βροχόπτωσης

Η τροφοδοσία του καρστικού συστήματος από την απευθείας κατείδυση της βροχόπτωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{karst βροχόπτωσης}} = i * R * A \quad (7.7) \quad \text{όπου,}$$

i = ο συντελεστής κατείδυσης

R = η βροχή που δέχεται η περιοχή του καρστ

A = η έκταση της περιοχής του καρστ.

Ο συντελεστής κατείδυσης, για την περιοχή του καρστ εξαρτάται από την τεκτονική

του καταπόνηση και την ανάπτυξη επιλεκτικών οδών κατείδυσης, την υγρασία του εδάφους, την επιφανειακή κλίση καθώς και από την ένταση της βροχόπτωσης (Καλλέργης 1970). Ωστόσο, εξαιτίας της φύσης του καρστ, των τεκτονικών παραμορφώσεων που αυτό δέχθηκε στο παρελθόν και των υδροχημικών διεργασιών στις οποίες έχει υποβληθεί (διαλυτοποίηση/απόθεση ανθρακικού ασβεστίου), ο συντελεστής κατείδυσης αναμένεται να είναι αρκετά υψηλός. Από τη μελέτη των καρστικών συστημάτων της Ελλάδας βγαίνει το συμπέρασμα ότι μια τιμή της τάξης $i = 50\%$, αντιπροσωπεύει το μέσο όρο των συντελεστών κατείδυσης του Ελληνικού καρστ (Σούλιος 1985). Σύμφωνα με τον ίδιο συγγραφέα για ένα καρστικό σύστημα με χαρακτηριστικά σαν αυτά της περιοχής μελέτης, ο συντελεστής κατείδυσης μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$i = \frac{V_{\beta\rho.} - V_{\epsilon\xi.}}{V_{\beta\rho.}} * 100 \quad (7.8) \quad \text{όπου:}$$

$V_{\beta\rho.}$ = ο όγκος της βροχής στην περιοχή του καρστ σε m^3

$V_{\epsilon\xi.}$ = η πραγματική εξάτμιση στην περιοχή του καρστ σε m^3 ,

θεωρώντας πρακτικά ως μηδενική την επιφανειακή απορροή στην έκταση που αυτό αναπτύσσεται.

Παλαιότερη μελέτη (Electrowatt Engineering Services 1967) είχε δεχθεί τιμές πραγματικής εξάτμισης, για τη συγκεκριμένη καρστική περιοχή, μεταξύ 150 και 200mm. Ωστόσο, σε νεότερες μελέτες (Παγώνης κ.α. 2007) καταγράφεται τάση αύξησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και για το λόγο αυτό θεωρείται ότι αυξήθηκε και η πραγματική εξάτμιση. Με βάση το γεγονός αυτό η επιλογή της τιμής 200mm θεωρήθηκε αντιπροσωπευτική, η οποία δεν αντιβαίνει και το αρχικό εύρος κύμανσης της παραμέτρου που αναφέρεται στην παλαιότερη μελέτη. Η τιμή αυτή υιοθετείται και για τα δύο έτη αναφοράς της παρούσας μελέτης, θεωρώντας ότι η απλοποίηση αυτή δεν εισάγει σημαντικά σφάλματα.

Μια πρώτη προσέγγιση για την βροχή που δέχεται το καρστ, μπορεί να γίνει ακολουθώντας τη μεθοδολογία από παλαιότερη διατριβή που εκπονήθηκε για την περιοχή για τα έτη 1972 έως και 1992 (Panagoroulos 1995). Στον Πίνακα 7.4 φαίνονται οι ετήσιες τιμές βροχόπτωσης και τα υψόμετρα για τα έτη 1985 και το 2017 τεσσάρων μετεωρολογικών σταθμών, οι οποίοι σχετίζονται με την υπολεκάνη Τυρνάβου και το καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου. Με βάση τα στοιχεία αυτά προκύπτουν δύο Σχέσεις 7.9 και 7.10 βροχόπτωσης-υψομέτρου (βροχοβαθμίδα) για τα έτη 1985 και το 2017 αντίστοιχα :

$$y = 0.4895x + 357.67 \quad (7.9)$$

$$y = 0.3593x + 480.40 \quad (7.10)$$

Σύμφωνα με την προαναφερόμενη παραπάνω εργασία, η περιοχή του καρστ έχει χωριστεί σε υψομετρικές ζώνες (Πίνακας 7.5), σε κάθε μία από τις οποίες εφαρμόζονται οι Σχέσεις 7.7 και 7.8, για τα αντίστοιχα έτη και στη συνέχεια υπολογίζεται το κλάσμα της βροχόπτωσης [(ανηγμένη % Έκταση/100)*Βροχόπτωση] για κάθε επιμέρους ζώνη για το 1985 και το 2017. Το άθροισμα των κλασμάτων αυτών μας δίνει την υπολογιζόμενη βροχόπτωση στην περιοχή του καρστ για το έτος 1985 = 548.1mm και για το έτος 2017 = 691.1mm.

Πίνακας 7.4. Βροχόπτωση ανά σταθμό για τα δύο έτη αναφοράς.

Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Βροχόπτωση 1985 (mm)	Βροχόπτωση 2017 (mm)
Λάρισα	74	356.0	500.0
Τύρναβος	92	443.4	520.6
Ελασσόνα	314	508.7	ελλιπή δεδομένα
Βερδικούσα	863	780.0	790.3

Πίνακας 7.5. Βροχόπτωση ανά υψομετρική ζώνη (Σύμφωνα με Ραπαγοπούλος 1995).

Υψομετρικές ζώνες	Μέσο υψόμετρο (m)	Επιφάνεια ζώνης (Km ²)	% Συνολικής επιφάνειας	Βροχόπτωση 1985 (mm)	Κλάσμα βροχόπτωσης 1985	Βροχόπτωση 2017 (mm)	Κλάσμα βροχόπτωσης 2017
<200	120	9.3	7.94	416.4	33.1	523.5	41.6
200-400	300	38	32.45	504.5	163.7	588.2	190.9
400-600	500	43.5	37.15	602.4	223.8	660.1	245.2
600-800	700	24.5	20.92	700.3	146.6	731.9	153.1
>800	850	1.8	1.54	773.7	11.9	785.8	12.1
	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	117.1			579		642.9

Για τον υπολογισμό της βροχής που κατεισδύει στο καρστ χρειάζεται η τιμή του συντελεστή κατεΐσδυσης *i*, που βρίσκεται από τη Σχέση 7.8 για τα δύο έτη:

$$1985: V_{βρ.} = (579 * 10^{-3}) * (117.1 * 10^6) = 67,800,224 \text{ m}^3$$

$$V_{εξ.} = (200 * 10^{-3}) * (117.1 * 10^6) = 23,420,000 \text{ m}^3$$

$$\text{άρα } i = 65.46\% \quad \text{και}$$

$$2017: V_{βρ.} = (642.9 * 10^{-3}) * (117.1 * 10^6) = 75,278,338 \text{ m}^3$$

$$V_{εξ.} = (200 * 10^{-3}) * (117.1 * 10^6) = 23,420,000 \text{ m}^3$$

$$\text{άρα } i = 68.89\%$$

Εφόσον είναι δεδομένος πλέον ο συντελεστής κατεισδυσης, η βροχή που κατεισδύει από την περιοχή του καρστ σύμφωνα με την Σχέση 7.7 είναι:

$$Q_{\text{karst.}\beta\text{p.1985}} = i * R * A = 0.6546 * 579 * 10^{-3} * 117.1 * 10^6 = 44,382,469 \text{ m}^3/\text{έτος}$$

$$\text{ή } Q_{\text{karst.}\beta\text{p.1985}} = 121,595.8 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{karst.}\beta\text{p.2017}} = i * R * A = 0.6889 * 642.9 * 10^{-3} * 117.1 * 10^6 = 51,862,865$$

$$\text{m}^3/\text{έτος ή } Q_{\text{karst.}\beta\text{p.2017}} = 142,090 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Πλευρικές υπόγειες εισροές από Τιταρήσιο

Η κύρια πηγή τροφοδοσίας του καρστικού συστήματος είναι το νερό που προέρχεται από τον ποταμό Τιταρήσιο, το οποίο κατεισδύει στην προσχωματική υπολεκάνη, πριν την είσοδο του ποταμού στην περιοχή μελέτης και μέσω αυτής στο καρστικό σύστημα (Εικόνα 6.3). Από προγενέστερη μελέτη (Panagoroulos 1995) προκύπτει, ότι οι πλευρικές αυτές εισροές είχαν υπολογιστεί με βάση τις τιμές των παροχών σε δύο σταθμούς μέτρησης επιφανειακής απορροής, έναν στα ανάντη (Εικόνα 6.3, περιοχή Μεσοχωρίου) και έναν στα κατάντη (Εικόνα 6.3, μετά το Δαμάσι πριν την είσοδο του ποταμού στην υπολεκάνη Τυρνάβου), της εξεταζόμενης περιοχής του Τιταρησίου (Electrowatt Engineering Services 1967). Η υπολογισμένη τιμή μέσω της διαφορικής μέτρησης παροχής ήταν $Q_{\text{karst Τιταρήσιου}} = 264,000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$. Οι μετρήσεις στους σταθμούς αυτούς εγκαταλείφθηκαν σε σύντομο χρονικό διάστημα από την εγκατάστασή τους, καθότι οι μετρήσεις ροής ήταν πολύ σπάνιες, λόγω του χαρακτήρα χειμαρρώδους απορροής του Τιταρήσιου συμπεριλαμβανομένης της περιοχής της υπολεκάνης του Τυρνάβου, μόνο κατά τη διάρκεια έντονων φαινομένων βροχόπτωσης.

Λόγω της έλλειψης δεδομένων γίνεται η παραδοχή, ότι η τιμή αυτή μειώνεται κατά 10% το 1985 και 20% το 2017. Η μείωση αυτή της παροχής του καρστικού συστήματος από τον Τιταρήσιο, οφείλεται στην αύξηση των απολήψεων ανάντη αυτού, ως αποτέλεσμα των αυξημένων καλλιεργούμενων εκτάσεων και της εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων. Δεδομένου ότι οι περιοχές, προς τα ανάντη, δεν είναι πολύ μεγάλες η μείωση αυτή δεν πρέπει να έχει μεγάλες αποκλίσεις.

Έτσι για το 1985 και το 2017 είναι:

$$Q_{\text{karst Τιταρήσιου}} (1985) = 264,000 * 0,9 = 237,600 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

$$Q_{\text{karst Τιταρήσιου}} (2017) = 264,000 * 0,8 = 211,200 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Πλευρικές υπόγειες εισροές από την περιθωριακή αλλουβιακή λεκάνη της Τσαριτσάνης

Η λεκάνη της Τσαριτσάνης είναι περιορισμένης έκτασης και βρίσκεται ανάντη του βορειοδυτικού ορίου του καρστικού συστήματος. Ο υπολογισμός των μεταγγίσεων προς το καρστικό σύστημα βασίζεται στο νόμο Darcy:

$$Q = A * K * i \quad (7.11)$$

και επειδή $A = L * D$, η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται:

$$Q = L * D * K * i \quad (7.12)$$

όπου :

Q = οι πλευρικές υπόγειες εισροές σε m^3 /ημέρα

L = το μήκος της περιοχής που συνδέει τη λεκάνη με το καρστ σε m

D = το βάθος κορεσμού της περιοχής που συνδέει τη λεκάνη με το καρστ m

K = η υδραυλική αγωγιμότητα της περιοχής σε m /ημέρα

i = η υδραυλική κλίση στην περιοχή επαφής των σχηματισμών.

Οι τιμές των L , D , και K θεωρούνται, ελλείψει δεδομένων, ότι δε μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου και για το λόγο αυτό οι τιμές αυτές είναι (Panagoroulos 1995):

$$A = 250,000m^2$$

$$K = 10 \text{ m/ημέρα}$$

Η υδραυλική κλίση είχε υπολογιστεί με βάση τα πλησιέστερα πιεζομετρικά δεδομένα που υπήρχαν, σε $i = 0.01$. Με βάση την τιμή αυτή και αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι στη λεκάνη της Τσαριτσάνης η πτώση των στάθμεων είναι μεγαλύτερη από την πτώση στάθμεων στην περιοχή του Τυρνάβου (λόγω των αυξημένων σε σχέση με τη δεκαετία 1990 απολήψεων για κάλυψη αρδευτικών αναγκών), τότε μπορεί να εξαχθεί μια μειωμένη τιμή για το i , ίση με $i = 0.005$ και για το 2017 ενώ μπορεί να διατηρηθεί ίδια για το 1985, $i = 0.01$. Με βάση τις παραπάνω τιμές η Σχέση 7.11 δίνει για τις υπόγειες εισροές από τη λεκάνη Τσαριτσάνης:

$$Q_{\text{karst περιθ. λεκάνης}} (1985) = 250,000 * 10 * 0.01 = 25,000 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \quad \text{και}$$

$$Q_{\text{karst περιθ. λεκάνης}} (2017) = 250,000 * 10 * 0.005 = 12,500 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Εκφορτίσεις των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας

Με βάση τα δεδομένα της Διεύθυνσης Υδάτων της Λάρισας για τα δύο έτη αναφοράς

1985 και 2017 υπολογίζονται οι μέσες τιμές παροχής (m³/ημέρα) για τις δύο καρστικές πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας (Πίνακας 7.6). Σημειώνεται, ότι όπου υπήρχαν κενά στις μηνιαίες μετρήσεις των πηγών, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των πιο πρόσφατων μετρήσεων.

Στη συνέχεια αθροίζονται οι τιμές των δύο πηγών, έτσι ώστε να υπολογιστεί η συνολική εκφόρτιση για κάθε έτος.

Πίνακας 7.6. Μέσες τιμές παροχής για τα δύο έτη αναφοράς.

	Παροχή 1985 (m ³ /ημέρα)	Παροχή 2017 (m ³ /ημέρα)
Μάτι Τυρνάβου	107,556.8	110,416.9
Αγία Άννα	5,665.6	7,331.2
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	113,222.4	117,748.1

Οπότε: $Q_{\text{πηγών}} (1985) = 113,222.4 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$

$Q_{\text{πηγών}} (2017) = 117,748.1 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις υπολογιζόμενες τιμές των παραγόντων της Σχέσης 7.5 για τα έτη 1985 και 2017 οι πλευρικές υπόγειες εισροές από το καρστ προκύπτουν εμμέσως και αντίστοιχα είναι:

$$1985: Q_{\text{καρστ}} = Q_{\text{karst βροχόπτωσης}} + Q_{\text{karst Τιταρήσιου}} + Q_{\text{karst περιθ. λεκάνης}} - Q_{\text{πηγών}} = 121,595.8 + 237,600 + 25,000 - 113,222.4 = \mathbf{270,971 \text{ m}^3/\text{ημέρα}}$$

$$2017: Q_{\text{καρστ}} = Q_{\text{karst βροχόπτωσης}} + Q_{\text{karst Τιταρήσιου}} + Q_{\text{karst περιθ. λεκάνης}} - Q_{\text{πηγών}} = 142,090 + 211,200 + 12,500 - 117,748.1 = \mathbf{248,042 \text{ m}^3/\text{ημέρα}}$$

Πλευρικές υπόγειες εισροές από τα ιζήματα των ποταμών Τιταρήσιου και Πηνειού (Q_{ιζημάτων})

Οι συνολικές υπόγειες εισροές υπολογίζονται ως το άθροισμα των πλευρικών υπόγειων μεταγίσεων των ποταμών Τιταρήσιου και Πηνειού. Ο υπολογισμός του παράγοντα αυτού βασίζεται και στην περίπτωση αυτή στο νόμο Darcy (Σχέση 7.11). Η υδραυλική κλίση (*i*) για τις αποθέσεις των δύο ποταμών θεωρείται ίδια και υπολογίζεται από τους πιεζομετρικούς χάρτες τις περιοχής. Η παραδοχή αυτή δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα ενώ παράλληλα δεν υφίστανται επαρκή δεδομένα για τον λεπτομερέστερο υπολογισμό της παραμέτρου αυτής. προς αυτή την κατεύθυνση, κατασκευάστηκε ο πιεζομετρικός χάρτης για τον Απρίλιο του 1985, σύμφωνα με τα δεδομένα από τη Διεύθυνση Υδάτων Θεσσαλίας και ο αντίστοιχος

χάρτης για τον Απρίλιο του 2017, σύμφωνα με τα πρωτογενή δεδομένα της παρούσας μελέτης. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι ζητούμενες υδραυλικές κλίσεις στην περιοχή της εισόδου των δύο ποταμών στην υπολεκάνη (Εικόνα 7.18). Οι υπόλοιπες παράμετροι του νόμου Darcy είναι γνωστές, σύμφωνα με προηγούμενη έρευνα (Panagoroulos 1995), όπου υπολογίστηκαν τα L (m), D (m) και η υδραυλική αγωγιμότητα (K) (m/d) λήφθηκε κατ' εκτίμηση λαμβάνοντας υπόψη τη λιθολογία της περιοχής και τα αποτελέσματα παλαιότερων δοκιμαστικών αντλήσεων (Sogreah 1974). Έτσι για τον Τιταρήσιο είναι $L=750m$, $D= 105m$, $K= 15m/ημέρα$, ενώ για τον Πηνειό $L=350m$, $D= 50m$, $K= 15m/ημέρα$ αντίστοιχα.

Η υδραυλική κλίση υπολογίζεται από το πηλίκο της διαφοράς του απολύτου υψομέτρου των στάθμων δύο γεωτρήσεων, προς την οριζόντια απόσταση των δύο αυτών γεωτρήσεων μεταξύ τους. Έτσι σύμφωνα με τις πιεζομετρικές καμπύλες, που χαράχθηκαν για την περιοχή για τα έτη 1985 και 2017, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπολογίστηκε η υδραυλική κλίση για την εν λόγω περιοχή που εκτείνεται μεταξύ των δύο ποταμών:

$$i (1985) = 0.005365$$

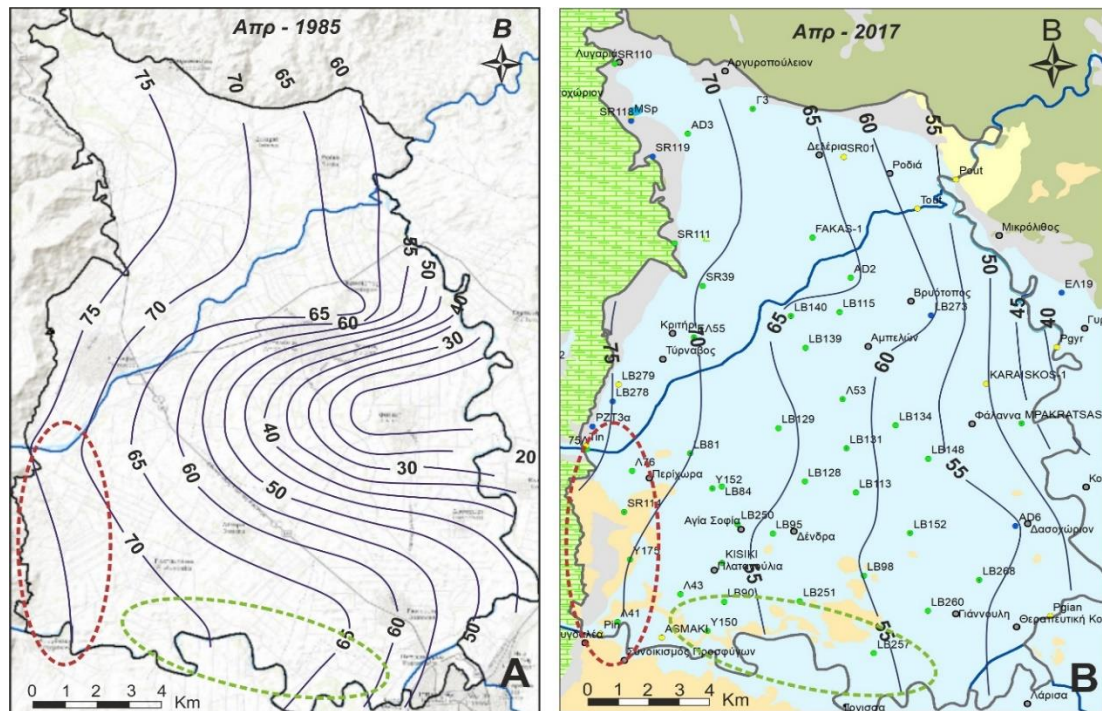
$$i (2017) = 0.003125$$

και σύμφωνα με το νόμο του Darcy υπολογίζονται οι πλευρικές εισροές των ιζημάτων των δύο ποταμών ως εξής:

$$Q_{\text{ιζημάτων}} (1985) = Q_{\text{Τιτ.1985}} + Q_{\text{Πην.1985}} = [(750 \cdot 105 \cdot 15) + (350 \cdot 50 \cdot 15)] \cdot 0.005365 = 7,746 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{ιζημάτων}} (2017) = Q_{\text{Τιτ.2017}} + Q_{\text{Πην.2017}} = [(750 \cdot 105 \cdot 15) + (350 \cdot 50 \cdot 15)] \cdot 0.003125 = 4,512 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$



Εικόνα 7.18. (Α) Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 1985 (Δ/νση Υδάτων Θεσσαλίας), (Β) Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 2017 (πρωτογενή δεδομένα). Με κόκκινη στικτή έλλειψη, η περιοχή υπολογισμού της υδραυλικής κλίσης για τον υπολογισμό των πλευρικών εισροών από τα ιζήματα των δύο ποταμών, ενώ με πράσινη, η περιοχή υπολογισμού της υδραυλικής κλίσης για τον υπολογισμό των πλευρικών εισροών από τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους.

Πλευρικές υπόγειες εισροές από τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους και την επέκταση του καρστικού συστήματος προς τα νότια (Q_{N-ND})

Ο νόμος Darcy χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό και αυτής της παραμέτρου χρησιμοποιώντας τα ήδη υπολογισμένα δεδομένα, $L=19,000m$, $D= 200m$, $K=4m/ημέρα$ (Panagoroulios 1995) για την περίπτωση αυτή και υπολογίζοντας εκ νέου την υδραυλική κλίση στην περιοχή των μεσο-θεσσαλικών λόφων, με τη βοήθεια των πιεζομετρικών χαρτών που σχεδιάστηκαν (Εικόνα 7.18Α και 7.18Β). Για τα δύο έτη αναφοράς ισχύει:

$$i (1985) = \Delta h / \Delta l = 5 / 1,800 = 0.0028$$

$$i (2017) = \Delta h / \Delta l = 5 / 2,945 = 0.002 \quad \text{οπότε}$$

$$Q_{N-ND} (1985) = 19,000 * 200 * 4 * 0.0028 = 42,560 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{N-ND} (2017) = 19,000 * 200 * 4 * 0.002 = 30,400 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Πλευρικές υπόγειες εισροές από το κρυσταλλοσχιστώδες υποβάθρο στο βόρειο περιθώριο της υπολεκάνης ($Q_{\text{υποβάθρου}}$)

Ομοίως και στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο νόμος του Darcy με τα ακόλουθα δεδομένα: $L=14,000\text{m}$, $D= 150\text{m}$. Για την υδραυλική αγωγιμότητα (K), χρησιμοποιείται η τιμή $K=0.5 \text{ m/ημέρα}$, η οποία είναι μια μέση τιμή, σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές για τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας αυτής της κατηγορίας σχηματισμών. Για τα δύο έτη αναφοράς η υδραυλική κλίση υπολογίζεται με βάση τους πιεζομετρικούς χάρτες της Εικόνας 7.19:

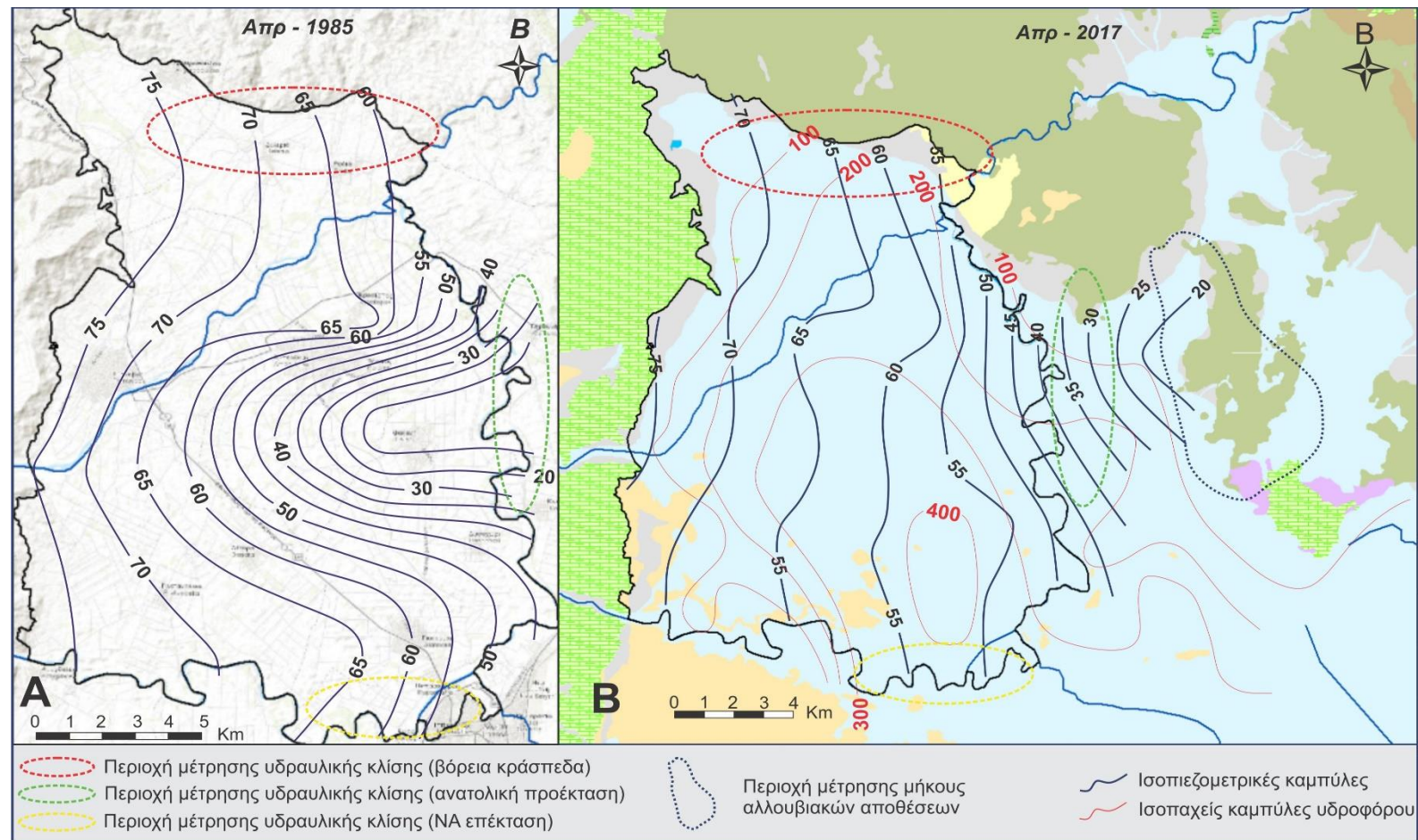
$$i (1985) = \Delta h / \Delta l = 5 / 1,750 = 0.00286$$

$$i (2017) = \Delta h / \Delta l = 5 / 1,425 = 0.0035 \quad \text{οπότε}$$

$$Q_{\text{υποβάθρου}} (1985) = 14,000 * 150 * 0.5 * 0.00286 = \mathbf{3,003 \text{ m}^3/\text{ημέρα}}$$

και

$$Q_{\text{υποβάθρου}} (2017) = 14,000 * 150 * 0.5 * 0.0035 = \mathbf{3,675 \text{ m}^3/\text{ημέρα}}$$



Εικόνα 7.19. (Α) Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 1985 και περιοχή υπολογισμού υδραυλικής κλίσης στα βόρεια κράσπεδα (κόκκινη στικτή έλλειψη), στην ανατολική περιοχή της υπολεκάνης (πράσινη στικτή έλλειψη), στην επέκταση της υπολεκάνης στα ΝΑ (κίτρινη στικτή έλλειψη) και (Β) Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 2017 και υπολογισμός (i) υδραυλικής κλίσης για στα βόρεια κράσπεδα (κόκκινη στικτή έλλειψη), στα ανατολικά (πράσινη στικτή έλλειψη), στα ΝΑ (κίτρινη στικτή έλλειψη), (ii) γινόμενου $L \times D$ για την τροφοδοσία από την Όσσα.

Πλευρικές υπόγειες εισροές από τους ανθρακικούς σχηματισμούς της Όσσας (Q_{οσσα})

Στην Εικόνα 7.19 απεικονίζεται η πιεζομετρία της περιοχής μελέτης εκτεινόμενης προς τα ανατολικά. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο της ισοτοπικής υδρολογίας αναλυτικότερα, οι ανθρακικοί σχηματισμοί του ορεινού όγκου της Όσσας τροφοδοτούν την ευρύτερη περιοχή μελέτης στα ανατολικά διαμέσου της ρηξιγενούς τεκτονικής. Για τις ανάγκες του υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου, θεωρήθηκε ότι η τροφοδοσία αυτή γίνεται κάτω από την επιφάνεια εμφάνισης των αλλουβιακών στην περιοχή αυτή (μαύρη στικτή καμπύλη, Εικόνα 7.19). Επίσης, στον ίδιο χάρτη, έχουν αποτυπωθεί οι ισοπαχείς καμπύλες του υδροφόρου, όπως αυτές σχεδιάστηκαν βάσει των μετρήσεων που προέκυψαν από την έρευνα της Sogreah (1974). Βάσει των στοιχείων αυτών για τη συγκεκριμένη περιοχή προκύπτει ένα πάχος του υδροφόρου μέχρι τα 100m περίπου. Από την χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας (Panagoroulos 1995) προκύπτει και η τιμή της παραμέτρου αυτής (θεωρώντας την σταθερή), ενώ από τις περιοχές που αποτυπώνονται, για το 1985 και για το 2017, στην Εικόνα 7.19, υπολογίζεται μια μέση κλίση για τα αντίστοιχα έτη.

Άρα σύμφωνα πάντα και με την κλίμακα του χάρτη είναι:

$$L = L_{(1)} + L_{(2)} = 2,290 + 800 = 3,090\text{m}$$

$$D = 100\text{m}$$

$$K = 4.5 \text{ m/ημέρα}$$

$$i (1985) = 0.0227 / 3 = 0.0075$$

$$i (2017) = 0.0164 / 3 = 0.00547$$

Οπότε

$$Q_{οσσα} (1985) = 3,090 * 100 * 4.5 * 0.0075 = 10,429 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{οσσα} (2017) = 3,090 * 100 * 4.5 * 0.0067 = 9,316 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Απευθείας κατείσδυση βροχόπτωσης στην αλλουβιακή υπολεκάνη (Q_{βροχ.λεκάνης})

Ο συντελεστής κατείσδυσης της βροχόπτωσης στη λεκάνη της Δυτικής Θεσσαλίας εκτιμάται ότι είναι $i = 5.1\%$ του ύψους βροχής (Καλλέργης 1972). Στην περιοχή μελέτης η αλλουβιακή υπολεκάνη έχει διαχωριστεί σε ζώνες που χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς συντελεστές κατείσδυσης σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της κάλυψης του εδάφους, τα λιθολογικά χαρακτηριστικά του επιφανειακού υδροφόρου

και σύμφωνα με τον μετεωρολογικό σταθμό άμεσης επίδρασης (Λάρισα, Τύρναβος), όπως προκύπτει από την εφαρμογή των πολυγώνων Thiessen (Εικόνα 7.20, Ραπαγορούλιος 1995). Η περιοχή μελέτης σύμφωνα με τα παραπάνω χωρίζεται σε τέσσερις διακεκριμένες ζώνες:

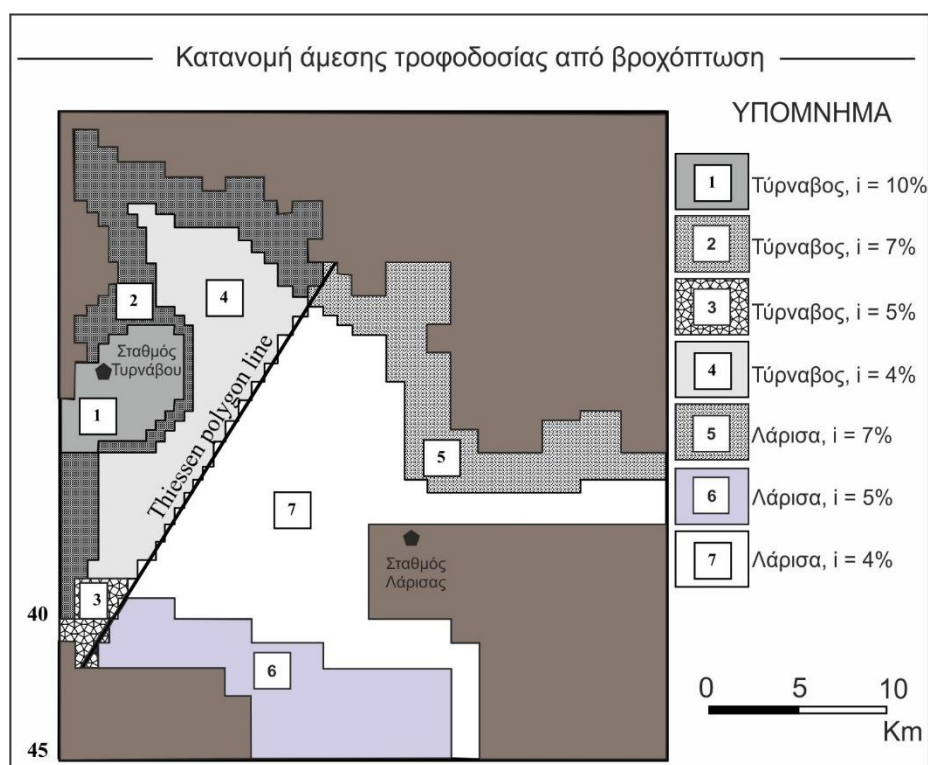
κώνος ποταμού Τιταρήσιου με $i = 10\%$

βόρεια κράσπεδα της αλλουβιακής υπολεκάνης με $i = 7\%$

N-ΝΔ όρια υπολεκάνης (μεσο-θεσσαλικοί λόφοι) $i = 5\%$

κεντρικό τμήμα υπολεκάνης με $i = 4\%$

ενώ λαμβάνοντας υπόψη και το σταθμό επίδρασης για κάθε ζώνη, οι παραπάνω ζώνες αυξάνουν σε 7 (Εικόνα 7.20).



Εικόνα 7.20. Χωρική κατανομή συντελεστή κατείσδυσης και διαχωρισμός ζωνών με βάση τα πολύγωνα Thiessen (Τροποποιημένο από Ραπαγορούλιος 1995).

Το ύψος της βροχής για την υπο-περιοχή επιρροής του σταθμού της Λάρισας είναι για το έτος 1985 $R_{\Lambda 1985} = 356\text{mm}$, ενώ για την υπο-περιοχή επιρροής του σταθμού Τυρνάβου για το ίδιο έτος είναι $R_{\text{T}1985} = 443.4\text{mm}$. Αντίστοιχα, για το έτος 2017 οι τιμές αυτές είναι $R_{\Lambda 2017} = 500\text{mm}$ και $R_{\text{T}2017} = 520.6\text{mm}$. Η βροχή που κατεισδύει στην υπολεκάνη είναι το άθροισμα του γινομένου της βροχόπτωσης, του συντελεστή κατείσδυσης και της εκτάσεως της κάθε υπο-περιοχής, δηλαδή:

$Q_{\text{βροχ.λεκάνης}} = \sum_i^k (i * R * A)$ από $i=1$ έως k , όπου k ο αριθμός των διακεκριμένων

ζωνών.

Στον παρακάτω Πίνακα 7.7 φαίνονται τα δεδομένα για κάθε υπό-περιοχή, όπως αυτά περιγράφηκαν παραπάνω, σύμφωνα πάντα και με τους υπολογισμούς της παλαιότερης μελέτης από τον Panagoroulos (1995).

Πίνακας 7.7. Σύνολο δεδομένων για τον υπολογισμό της απευθείας κατείδυσης από τη βροχόπτωση στην αλλουβιακή υπολεκάνη.

Υπό-περιοχή	Έκταση A (m ²)	i%	Βροχόπτωση R σταθμού επιρροής 1985 (m)	Βροχόπτωση R σταθμού επιρροής 2017 (m)	i*R*A 1985	i*R*A 2017
1	15,460,000	10	0.443	0.52	685,496.4	804,847.6
2	22,220,000	7	0.443	0.52	689,664.4	809,741.2
3	5,390,000	5	0.443	0.52	119,496.3	140,301.7
4	55,560,000	4	0.443	0.52	985,412.2	1,156,981
5	2,605,000	7	0.356	0.50	64,916.6	91,175
6	3,812,000	5	0.356	0.50	67,853.6	95,300
7	145,900,000	4	0.356	0.50	2,077,616	2,918,000
				Σύνολο (έτος)	4,690,455	6,016,347
				Σύνολο (ημέρα)	12,850.56	16,483.14

Βάσει των υπολογισμών στον Πίνακα 7.7, προκύπτει ότι η απευθείας κατείδυση από τη βροχόπτωση στην αλλουβιακή υπολεκάνη για τα έτη 1985 και το 2017 είναι αντίστοιχα:

$$Q_{\text{βροχ.λεκάνης}} (1985) = 12,851 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{βροχ.λεκάνης}} (2017) = 16,483 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Οι πιο εξελιγμένες μέθοδοι για την εκτίμηση της άμεσης τροφοδοσίας από τη βροχόπτωση βασίζονται στο ισοζύγιο εδαφικής υγρασίας (Soil Moisture Balance), ο υπολογισμός του οποίου απαιτεί λεπτομερή γνώση των ακόλουθων παραμέτρων: δυνητική εξάτμιση, έλλειμα εδαφικής υγρασίας, σταθερά ρίζας και σημείο μάρανσης για κάθε καλλιέργεια. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, τα δεδομένα για τις παραμέτρους αυτές, είτε δεν υπάρχουν καθόλου είτε είναι ελάχιστα, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή μιας τέτοιας μεθόδου. Ωστόσο, επειδή η συμβολή της άμεσης τροφοδοσίας από την κατείδυση της βροχόπτωσης προς το υδατικό σύστημα είναι πολύ χαμηλή, ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου δεν είναι τόσο εξαρτημένος από αυτή την παράμετρο και ως εκ τούτου η υιοθετημένη μέθοδος θεωρείται επαρκής για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης.

Αντλήσεις γεωτρήσεων για την κάλυψη αρδευτικών, υδρευτικών, κτηνοτροφικών και βιομηχανικών αναγκών (Q_{αντλήσεων})

Για τον υπολογισμό αυτής της παραμέτρου λαμβάνονται υπόψη οι απολήψεις του υπόγειου νερού, από τις γεωτρήσεις εντός της περιοχής μελέτης, για κάλυψη όλων των επιμέρους ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (ύδρευση, άρδευση, κτηνοτροφία και βιομηχανία).

Υδρευση

Για τον υπολογισμό την κατανάλωσης για υδρευτική χρήση απαιτείται αρχικά η γνώση των δημογραφικών δεδομένων της κάθε περιοχής. Για το σκοπό αυτό συγκεντρώθηκαν τα δημογραφικά δεδομένα των δύο απογραφών των ετών 1981 και 2011, σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛ.ΣΤΑΤ). Τα δημογραφικά αυτά στοιχεία παραθέτονται στους Πίνακες 7.8 και 7.9 ανά Δημοτική Ενότητα και ανά Τ.Ο.Ε.Β. της υπολεκάνης Τυρνάβου, αντίστοιχα.

Πίνακας 7.8. Δημογραφικά στοιχεία περιοχής ανά Δημοτική Ενότητα (ΕΛΣΤΑΤ, απογραφή 1981, 2011).

	Πληθυσμός (1981)	Πληθυσμός (2011)
Δήμος Λαρισαίων		
Δημοτική Ενότητα Λαρισαίων*	102,048	144,651
Δημοτική Ενότητα Γιάννουλης	4,864	12,496
Δήμος Τυρνάβου		
Δημοτική Ενότητα Τυρνάβου**	14,071	15,533
Δημοτική Ενότητα Αμπελώνα	8,007	8,055
Σύνολο πληθυσμού	128,990	180,735

* Έχει αφαιρεθεί ο πληθυσμός της Τ.Κ.Τερψιθέας

** Έχει αφαιρεθεί ο πληθυσμός της Τ.Κ. Δαμασίου

Πίνακας 7.9. Δημογραφικά στοιχεία περιοχής ανά ΤΟΕΒ (ΕΛΣΤΑΤ, απογραφή 1981, 2011).

	Πληθυσμός (1981)	Πληθυσμός (2011)
ΤΟΕΒ ΑΓΙΑΣ ΣΟΦΙΑΣ		
Πλατανούλια	490	563
Δένδρα	334	619
Αγία Σοφία	69	109
ΣΥΝΟΛΟ ΤΟΕΒ ΑΓ.ΣΟΦΙΑΣ	893	1,291
ΤΟΕΒ ΑΜΠΕΛΩΝΑ		
Αμπελώνας	5,086	6,083
Βρυότοπος	725	585
Αργυροπούλι	2,060	1,670
Δελέρια	1,020	655
Φαλάνη	2,368	3,987

Δασοχώρι	258	624
Γιάννουλη	2,238	7,885
Ροδιά	1,176	732
ΣΥΝΟΛΟ ΤΟΕΒ ΑΜΠΕΛΩΝΑ	14,931	22,221
ΤΟΕΒ ΤΥΡΝΑΒΟΥ		
Τύρναβος	10,965	12,484
Λυγαριά	65	56
Περαχώρα	88	32
ΣΥΝΟΛΟ ΤΟΕΒ ΤΥΡΝΑΒΟΥ	11,118	12,572
ΣΥΝΟΛΟ ΤΟΕΒ	26,942	36,084
ΛΑΡΙΣΑ	102,048	144,651
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	128,990	180,735

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία των απογραφών του 1981 και του 2011 πρέπει να γίνει αναγωγή στα έτη 1985 και 2017 με βάση τον ετήσιο ρυθμό μεταβολής του πληθυσμού, θεωρώντας απόλυτα γραμμική μεταβολή αυτού μέσα στη χρονική περίοδο των 30 ετών. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός μεταβολής προκύπτει από τη σχέση (<http://www.demography-lab.prd.uth.gr>):

$$P_y = P_x * (1+r)^n \quad (7.13)$$

όπου

P_x, P_y = οι πληθυσμοί για τα έτη εκκίνησης και κατάληξης αντίστοιχα

n = αριθμός ετών που πέρασαν

r = ο μέσος ετήσιος ρυθμός μεταβολής

Με βάση τα δεδομένα που βρέθηκαν για την πόλη της Λάρισας, η κατά κεφαλήν κατανάλωση νερού, εντός της περιοχής αρμοδιότητας της ΔΕΥΑΛ, ήταν **103.24 m³/άτομο** (12,191,845m³/118,090 άτομα) για το 1991 ενώ η αντίστοιχη τιμή για το έτος 2002 ήταν **137.76 m³/άτομο** (18,059,662m³/131,095 άτομα). Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει μια αύξηση 2.66% ανά έτος της κατά κεφαλήν κατανάλωσης στην πόλη της Λάρισας, η οποία θεωρείται ως αντιπροσωπευτική για το σύνολο της περιοχής μελέτης ελλείψει συναφών δεδομένων για τις υπόλοιπες Δημοτικές Ενότητες.

Δεδομένου ότι οι καταναλώσεις αυτές δεν εμπεριέχουν σχεδόν καθόλου κατανάλωση νερού για περιποίηση κήπων και μικρών αγροκηπίων, τα οποία αποτελούν συνήθη εικόνα των μικρών οικιστικών περιοχών της περιοχής και τα οποία αποτελούν μια σημαντική κατανάλωση νερού, γίνεται η παραδοχή ότι η βάση αναφοράς της μέσης κατά κεφαλήν κατανάλωσης νερού για τις λοιπές οικιστικές περιοχές το 2002 είναι 150 m³/άτομο. Συνυπολογίζοντας τον ετήσιο ρυθμό αύξησης της κατά κεφαλήν κατανάλωσης (2.66%), από τη Σχέση 7.13 προκύπτει:

για το 1985: 93.5 m³/άτομο και

για το 2017: 228.3 m³/άτομο.

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω στον Πίνακα 7.10 υπολογίζεται η συνολική κατανάλωση νερού για υδρευτικούς σκοπούς για όλη την περιοχή μελέτης:

Πίνακας 7.10. Υπολογισμός κατανάλωσης νερού ύδρευσης.

	Πληθυσμός 1985	Πληθυσμός 2017	Κατά κεφαλήν κατανάλωση (m ³)		Ετήσια κατανάλωση (m ³)		Κατανάλωση ανά ημέρα (m ³)	
			1985	2017	1985	2017	1985	2017
ΤΟΕΒ Αγ.Σοφίας	Κάτοικοι							
Πλατανουλία	499	579	93.5	228.3	46,671.2	132,153	127.9	362.1
Δένδρα	363	700	93.5	228.3	33,906.6	159,877	92.9	438.0
Αγία Σοφία	73	119	93.5	228.3	6,857.1	27,268	18.8	74.7
ΤΟΕΒ Αμπελώνα								
Αμπελώνας	5,209	6,305	93.5	228.3	487,027.5	1,439,369	1,334.3	3,943.5
Βρυσιότοπος	705	560	93.5	228.3	65,875.7	127,946	180.5	350.5
Αργυροπούλι	2,003	1,601	93.5	228.3	187,294.7	365,588	513.1	1,001.6
Δελερία	962	599	93.5	228.3	89,900.9	136,860	246.3	375.0
Φαλάνη	2,538	4,425	93.5	228.3	237,335.1	1,010,195	650.2	2,767.7
Δασοχώρι	290	745	93.5	228.3	27,137.7	169,982	74.3	465.7
Γιάννουλη	2,647	10,144	93.5	228.3	247,512.6	2,315,773	678.1	6,344.6
Ροδιά	1,104	666	93.5	228.3	103,220.5	151,998	282.8	416.4
ΤΟΕΒ Τυρνάβου								
Τυρνάβος	11,156	12,812	93.5	228.3	1,043,116.8	2,925,019	2,857.9	8,013.8
Λυγαριά	64	54	93.5	228.3	5,957.9	12,409	16.3	34.0
Περαχώρα	77	26	93.5	228.3	7,189.8	5,967	19.7	16.3
Λάρισα	106,907	155,105	93.5	228.3	9,277,814.6	30,860,345	25,419	84,548.9
				Σύνολο	11,866,819	39,840,748	32,512	109,153

Οπότε είναι:

$$Q_{\text{ύδρ.}} (1985) = 32,511.8 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{ύδρ.}} (2017) = 109,152.7 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Σημειώνεται ότι για την πόλη της Λάρισας η κατανάλωση προέκυψε απευθείας από τα στοιχεία της ΔΕΥΑΛ.

Αρδευση

Ο υπολογισμός της αρδευτικής κατανάλωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια σειρά εναλλακτικών τρόπων:

i) την κατανάλωση ρεύματος σε κάθε αρδευτική γεώτρηση,

ii) την υδατοκατανάλωση χρησιμοποιώντας τις καλλιεργούμενες εκτάσεις, όπως αυτές προκύπτουν από τα στοιχεία των Τ.Ο.Ε.Β.,

iii) την υδατοκατανάλωση χρησιμοποιώντας τις καλλιεργούμενες εκτάσεις, όπως αυτές προκύπτουν από τα στοιχεία του Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. κατά δήλωση του κάθε παραγωγού.

Επειδή η κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου αφορά στο σύνολο της υπολεκάνης Τυρνάβου, η χρήση των δεδομένων των καλλιεργούμενων εκτάσεων βάσει των δεδομένων των Τ.Ο.Ε.Β., δεν καλύπτει το σύνολο της περιοχής μελέτης. Επίσης, η χρήση των δεδομένων κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος δεν θα είχε τα καλύτερα αποτελέσματα γιατί (α) δεν υφίσταται δυνατότητα συλλογής τέτοιων στοιχείων για τη συντριπτική πλειοψηφία των ιδιωτικών γεωτρήσεων της περιοχής και (β) τα δεδομένα αυτά δε μεταφράζονται απαραίτητα με τον ορθό τρόπο σε κατανάλωση νερού, εξαιτίας των σημαντικών κατά περίπτωση μεταβολών των τεχνικών χαρακτηριστικών των αντλητικών συγκροτημάτων από την χρονική περίοδο εγκατάστασης αυτών, καθώς επίσης και των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας των υδροληπτικών έργων (πτώση στάθμης-μεταβολή βάθους άντλησης). Για το λόγο αυτό ο πλέον δόκιμος τρόπος προσέγγισης των αντλήσεων για άρδευση στο σύνολο της περιοχής μελέτης κρίθηκε ότι είναι ο υπολογισμός της υδατοκατανάλωσης με βάση τις καλλιεργούμενες εκτάσεις και το είδος αυτών ανά Τοπική Κοινότητα, όπως αυτές προκύπτουν από τις δηλώσεις των παραγωγών.

Τα δεδομένα αυτά, έχουν επισημανθεί σε προηγούμενη μελέτη (Παγώνης κ.α. 2007) από τα οποία προέκυψε ότι ο συνολικός μέγιστος όγκος νερού που αντλήθηκε από την περιοχή μελέτης για τα έτη **1996** και **2002** ήταν **69,423,502 m³/έτος** και **63,735,041 m³/έτος αντίστοιχα**. Αν σε αυτές τις τιμές συμπεριληφθούν και οι συντελεστές απόδοσης, μεταφοράς και εφαρμογής του αρδευτικού νερού στον αγρό (σύμφωνα πάντα με την παραπάνω μελέτη) και τέλος αναχθούν οι όγκοι νερού σε ημερήσια βάση, τότε προκύπτει τελικά ότι:

$$Q_{αρδ.}(1996) = 213,619.21 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{αρδ.}(2002) = 188,664.4 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Με βάση τις τιμές αυτές και το γεγονός ότι κατά το 1986 καταγράφεται η έναρξη των έντονων πτώσεων στάθμης στα υπόγεια υδατικά συστήματα της λεκάνης της Θεσσαλίας, ως αποτέλεσμα των συστηματικών υπεραντλήσεων, εκτιμάται μια πτώση του 30% του συνολικού όγκου αρδευτικού νερού του 1996, ως αντιπροσωπευτική για το έτος 1985. Επίσης, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου, σχετικά με την υδροδυναμική κατάσταση του υπόγειου υδατικού συστήματος, φαίνεται ότι υπάρχει μια εξισορρόπηση των υπόγειων στάθμων τα τελευταία 10-15 χρόνια, με τάση επανάκαμψης για το μεγαλύτερο

κομμάτι της περιοχής έρευνας. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται μια εκτίμηση για μια μείωση του 5% των αρδεύσεων το 2017 σε σχέση με το 2002. Σημειώνεται ότι στο 13^ο Κεφάλαιο (Κεφάλαιο μαθηματικής προσομοίωσης) παρουσιάζεται αναλυτική εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών για το ημερολογιακό έτος 2017, βάσει του οποίου υπολογίζονται μετέπειτα και οι αρδευτικές ανάγκες για όλη την περίοδο της προσομοίωσης. Επιπρόσθετα σημειώνεται επίσης ότι, παρόλη την διαχρονική διακύμανση στην κατανομή των καλλιεργειών (Κεφάλαιο 3, Παράγραφος 3.4), στους παρακάτω υπολογισμούς υιοθετήθηκε η διατήρηση μιας σταθερής κατάστασης στην κατανομή τους, θεωρώντας ότι οι διακυμάνσεις αυτές δεν επηρεάζουν ουσιαστικά τα αποτελέσματα του υδατικού ισοζυγίου.

Σύμφωνα με τις παραπάνω εκτιμήσεις προκύπτει ότι:

$$Q_{αρδ.}(1985) = 213,619.21 * 0.7 = 149,533 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{αρδ.}(2017) = 188,664 * 0.90 = 169,798 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Κτηνοτροφία

Για τον υπολογισμό της κτηνοτροφικής κατανάλωσης χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας Ελλάδας, αναφορικά με το είδος και τον αριθμό του ζωικού κεφαλαίου ανά Τ.Ο.Ε.Β. και ανά Δημοτικό Διαμέρισμα, όπως αυτά καταγράφηκαν από προηγούμενη μελέτη (Παγώνης κ.α. 2007). Η κατανάλωση νερού για κάλυψη κτηνοτροφικών αναγκών συνίσταται, ανάλογα με το είδος του ζωικού κεφαλαίου, στην κάλυψη των παρακάτω αναγκών: πόση, καθαρισμός ζώων και εγκαταστάσεων σταβλισμού, καθαρισμός αμελκτηρίων. Για την προσέγγιση της συνολικής κατανάλωσης νερού για τις κτηνοτροφικές δραστηριότητες, υιοθετήθηκαν μέσες αντιπροσωπευτικές τιμές και έγινε μια σειρά παραδοχών, όπως αυτές αναλύονται στο Παράρτημα 1, όπου και φαίνονται οι αναλυτικοί Πίνακες Π1.12 έως Π1.14, της συνολικής ημερήσιας κατανάλωσης κτηνοτροφικών αναγκών για τα έτη αναφοράς της προαναφερθείσας εργασίας.

Με βάση τα στοιχεία των πινάκων αυτών και το γεγονός ότι, οι κτηνοτροφικές ανάγκες στις περισσότερες των περιπτώσεων, αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού όγκου των αντλήσεων από γεωτρήσεις (2-3%), μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι τα δεδομένα για τα έτη αναφοράς της προγενέστερης αυτής μελέτης (1996-2002), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα αντίστοιχα έτη της παρούσας μελέτης, με μια μικρή μείωση της τάξης του 10% για το 1985, ως αποτέλεσμα του μικρότερου πληθυσμού των ζώων για το έτος αυτό και μια ανάλογη αύξηση 15% για το έτος 2017, ως αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού των ζώων για το 2017.

Επομένως:

$$Q_{\text{κτην.}} (1985) = Q_{\text{κτην.}} (1996) * 0.9 = 1,155.55 * 0.9 = 1,004 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{κτην.}} (2017) = Q_{\text{κτην.}} (2002) * 1.15 = 1,962.75 * 1.15 = 2,257 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Βιομηχανία

Οι εγκατεστημένες βιομηχανικές και βιοτεχνικές μονάδες στην περιοχή μελέτης, μπορούν να προκύψουν από τα στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ (πρώην Ε.Σ.Υ.Ε.), τα αντίστοιχα Επιμελητήρια του Νομού Λάρισας, καθώς επίσης και από τα στοιχεία της Διαχειριστικής Μελέτης Υδάτων Θεσσαλίας (Καραβοκύρης κ.α. 2014).

Με βάση το είδος της δραστηριότητάς τους είναι δυνατή η προσέγγιση της κατανάλωσης νερού ανά μονάδα παραγωγής. Ωστόσο, δεν υπάρχουν καθόλου πληροφορίες για το μέγεθος παραγωγής της κάθε μονάδας και για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατή η προσέγγιση της κατανάλωσης νερού ανά βιομηχανική/βιοτεχνική μονάδα. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός αυτό, καθώς επίσης και το γεγονός ότι η περιοχή μελέτης είναι κατ' εξοχήν αγροτική, με περιορισμένη βιομηχανική-βιοτεχνική δραστηριότητα, η προσέγγιση της βιομηχανικής κατανάλωσης γίνεται με βάση την ακόλουθη προσέγγιση.

Η μέση βιομηχανική κατανάλωση νερού στην Ελλάδα εκτιμάται σε περίπου 5% του συνόλου των άλλων καταναλώσεων (ύδρευση, άρδευση, κτηνοτροφία) με βάση σχετικά πρόσφατες μελέτες (Περγιαλιώτης 2003). Λόγω της περιορισμένης βιομηχανικής-βιοτεχνικής δραστηριότητας της περιοχής, ιδιαίτερα σε υδροβόρες μονάδες, η αναλογία της βιομηχανικής χρήσης νερού σε σχέση με τις υπόλοιπες χρήσεις (ιδίως την αρδευτική), είναι πολύ περιορισμένη και επομένως κάτω του μέσου όρου της επικράτειας. Επομένως εκτιμάται, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ότι η βιομηχανική κατανάλωση είναι ίση με το 3-4% του αθροίσματος των άλλων καταναλώσεων. Με βάση την προσέγγιση αυτή προκύπτει ότι:

$$Q_{\text{βιομ.}} (1985) = 0.03 * (Q_{\text{υδρ.}} (1985) + Q_{\text{αρδ.}} (1985) + Q_{\text{κτην.}} (1985)) = 0.03 * 185,392.99 = 5,561 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{βιομ.}} (2017) = 0.04 * (Q_{\text{υδρ.}} (2017) + Q_{\text{αρδ.}} (2017) + Q_{\text{κτην.}} (2017)) = 0.04 * 257,389.4 = 10,296 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Αθροίζοντας τους απαιτούμενους όγκους των επιμέρους παραγόντων (ύδρευση, άρδευση, κτηνοτροφία, βιομηχανία), προκύπτει ο συνολικός απαιτούμενος όγκος ανά ημέρα που αντλείται από τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης για τα δύο έτη. Έτσι:

$$Q_{\text{αντλήσεων}} (1985) = 32,512 + 149,533 + 1,004 + 5,561 = 188,610 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{αντλήσεων}} (2017) = 109,153 + 169,798 + 2,257 + 10,296 = 291,504 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Επιστροφές λόγω απωλειών από τα δίκτυα ύδρευσης ($Q_{\text{απ.δικτύων}}$)

Στο πολεοδομικό συγκρότημα της Λάρισας η επικρατούσα υπόγεια υδραυλική κλίση της περιοχής έχει φορά προς τα κατάντη, δηλαδή προς την επέκταση του συστήματος προς στα ΝΑ. Για το λόγο αυτό θεωρείται, ότι πρακτικά δεν υπάρχει επανατροφοδοσία του υδατικού συστήματος εντός της περιοχής μελέτης και έτσι οι απώλειες από το δίκτυο ύδρευσης της Λάρισας (που τροφοδοτούν το υπό μελέτη ΥΥΣ) θεωρούνται μηδενικές.

Επίσης, με βάση τα στοιχεία της ΔΕΥΑΛ προκύπτει ότι η μέση ετήσια απόληψη νερού ανέρχεται σε περίπου 19,000,000 m³, έναντι του τιμολογημένου όγκου νερού που ανέρχεται σε 13,000,000 m³. Προκύπτει δηλαδή ένας μη τιμολογημένος όγκος νερού της τάξης των 6,000,000 m³/έτος ανά έτος, ο οποίος αναγόμενος σε εκατοστιαία κλίμακα, αποτελεί το 31.6% της απολαμβανόμενης ποσότητας νερού. Στον όγκο αυτό συμπεριλαμβάνονται οι ποσότητες νερού που χρησιμοποιούνται για άρδευση και καθαρισμό εντός του πολεοδομικού συγκροτήματος, καθώς και τροφοδοσία των πυροσβεστικών οχημάτων και των δημόσιων χώρων της πόλης της Λάρισας. Σύμφωνα με τα παραπάνω εκτιμάται, ότι οι απώλειες του δικτύου διανομής υδρευτικού νερού ανέρχονται σε 25% της ονομαστικής κατά κεφαλήν κατανάλωσης. Το ποσοστό αυτό υιοθετείται για τον υπολογισμό των απωλειών των δικτύων ύδρευσης των υπόλοιπων οικιστικών περιοχών της περιοχής μελέτης πλην της πόλης της Λάρισας (που όπως προαναφέρθηκε δεν επανατροφοδοτούν το υπό μελέτη ΥΥΣ). Οι απώλειες αυτές διηθούνται και επανατροφοδοτούν (εν δυνάμει και κατά παραδοχή, καθώς ενδέχεται τμήμα αυτών να εκφορτιστεί σε επιφανειακούς αποδέκτες) το υδατικό σύστημα. Έτσι, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.10, αφαιρώντας από την συνολική ετήσια υδρευτική κατανάλωση, την ετήσια υδρευτική κατανάλωση της πόλης της Λάρισας για τα δύο έτη και υπολογίζοντας απώλειες 25% επί αυτών, προκύπτει ότι:

$$Q_{\text{απ.δικτύων}} (1985) = 2,589,004 * 0.25 / 365 = 1,773 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{απ.δικτύων}} (2017) = 8,980,403 * 0.25 / 365 = 6,151 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Επιστροφές-επαναδιηθήσεις από τα αρδευτικά δίκτυα ($Q_{\text{επ.άρδεύσεων}}$)

Οι επιστροφές αυτές αφορούν τις απώλειες από τις εφαρμοζόμενες πρακτικές της άρδευσης, απώλειες οι οποίες επιστρέφουν στο υδατικό σύστημα ως βαθιά διήθηση.

Στην παράμετρο αυτή συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες κατά τη μεταφορά του νερού μέσω των συλλογικών δικτύων, οι οποίες όμως έχουν πρακτική σημασία μόνο για το έτος 1985 κατά το οποίο λειτουργούσε το ανοικτό συλλογικό δίκτυο βαρύτητας του Τ.Ο.Ε.Β. Αμπελώνα και το οποίο σταμάτησε να λειτουργεί το 1999 (βάσει στοιχείων από τον Τ.Ο.Ε.Β.). Έκτοτε γίνεται η παραδοχή αμελητέων απωλειών από τα δίκτυα μεταφοράς (κλειστά δίκτυα κατά την συντριπτική πλειοψηφία αυτών)

Από τους υπολογισμούς των υδατοκαταναλώσεων των καλλιεργειών, οι οποίες υπολογίσθηκαν, όπως έχει ήδη ειπωθεί, από προηγούμενη μελέτη (Παγώνης κ.α. 2007), προέκυψε ότι οι απώλειες αυτές ήταν για το 1996 ίσες με το 14% του συνολικού αντληθέντος όγκου νερού για άρδευση, ενώ για το 2002 ήταν ίσες με το 11% του συνολικού αντληθέντος όγκου αρδευτικού νερού.

Σύμφωνα με τα στοιχεία των τριών (3) Τ.Ο.Ε.Β. εντός της περιοχής μελέτης αναφορικά με τα δίκτυα άρδευσης:

- Στον τον Τ.Ο.Ε.Β. Αμπελώνα δεν προέκυψε κάποια ουσιαστική αλλαγή στα δίκτυα άρδευσης κατά την περίοδο 1985 – 1996, ενώ υπήρξαν βελτιώσεις τα τελευταία χρόνια (περίοδος 2002 – 2017) με υπογειοποίηση σημαντικού μέρους του δικτύου. Κατά την τελευταία αυτή περίοδο όμως, έχει επικρατήσει η στάγδην άρδευση σε ποσοστό 95%.
- Στον Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας, μετά το 1987 υπογειοποιήθηκαν τα 200 από τα συνολικά 240 km του δικτύου άρδευσης. Ως εκ τούτου προέκυψε ουσιαστική μείωση των απωλειών μετά το 1987. Επίσης, τα τελευταία 20 χρόνια έχει επικρατήσει η σταγόνα, ως μέθοδος άρδευσης, σε ποσοστό πάνω από 85%.
- Στον Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου πριν το 2000, οι σωλήνες άρδευσης ήταν επιφανειακές, μεταλλικές, ωστόσο μετά το 2000 αντικαταστάθηκαν από υπόγειες πλαστικές σωλήνες (PVC). Η στάγδην άρδευση επικρατεί σε ποσοστό 98%.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι μόνο για τον Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας, διαφοροποιείται ουσιαστικά η κατάσταση των απωλειών του δικτύου (άρα και της επανατροφοδότησης) που υπολογίσθηκαν για τα έτη 1996 και 2002 συγκρινόμενες με τα έτη 1985 και 2017 της παρούσας μελέτης. Έτσι, οι απώλειες για το έτος 1985, εκτιμώνται ως ελαφρά αυξημένες σε σχέση με αυτές του 1992, της τάξης του 18% (δεχόμενοι και ότι ο ΤΟΕΒ Αγίας Σοφίας είναι ο δεύτερος κατά σειρά Τ.Ο.Ε.Β. σε μήκος δικτύου). Για το 2017, λόγω της υπογειοποίησης των δικτύων αλλά και της βελτίωσης των μεθόδων άρδευσης, με τη στάγδην άρδευση να επικρατεί σχεδόν αποκλειστικά, οι απώλειες είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές του έτους 2002 (~5%). Πρακτικά:

$$Q_{\text{επ.αρδεύσεων}}(1985) = 0.18 * Q_{\text{αρδ.}}(1985) = 0.18 * 149,533 = \mathbf{26,916 \text{ m}^3/\text{ημέρα}}$$

και

$$Q_{\text{επ.αρδεύσεων}}(2017) = 0.05 * Q_{\text{αρδ.}}(2017) = 0.11 * 169,798 = \mathbf{8,490 \text{ m}^3/\text{ημέρα}}$$

Πλευρικές υπόγειες εκφορτίσεις προς (α) την ανατολική-νοτιοανατολική συνέχεια του αλλουβιακού συστήματος και (β) προς την περιθωριακή αλλουβιακή υπολεκάνη βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης (Q_{επέκταση})

Η περιοχή μελέτης, όντας το ΒΔ τμήμα της ανατολικής Θεσσαλικής λεκάνης, συνεισφέρει ουσιαστικά στην τροφοδοσία, μέσω υπόγειων πλευρικών μεταγγίσεων, των ΝΑ τμημάτων της ευρύτερης λεκάνης. Στο ΒΑ τμήμα της περιοχής, μετά την έξοδο του Πηνειού από την περιοχή μελέτης, λόγω της γεωμετρίας και της γεωλογίας του συστήματος στην εν λόγω περιοχή, η οποία είναι τέτοια που εμποδίζει τη ροή των υπόγειων υδάτων διαμέσου των σχηματισμών, η εκφόρτιση τους συστήματος σε αυτή την περιοχή διευκολύνεται από τους ποταμούς Πηνειό και Τιταρήσιο και ενδεχομένως τις αποθέσεις της κοίτης του Πηνειού.

Η προσέγγιση του όγκου νερού που εκφορτίζεται μέσω υπόγειων πλευρικών μεταγγίσεων προς τη ΝΑ επέκταση του υδατικού συστήματος γίνεται και στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζοντας το νόμο του Darcy, χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής, όπως αυτά περιγράφονται στην προγενέστερη ερευνητική εργασία που εκπονήθηκε στην περιοχή (Panagoroulos 1995). Οι τιμές των γεωμετρικών αυτών χαρακτηριστικών είναι: L=17,000m, D= 300m και K= 8m/ημέρα, οπότε απαιτείται μόνο ο υπολογισμός της υδραυλικής κλίσης για τα έτη 1985 και 2017.

Με βάση τους πιεζομετρικούς χάρτες που συντάχθηκαν για την περιοχή, για το 1985 και το 2017 (Εικόνα 7.9, περιοχή με κίτρινη στικτή έλλειψη), η κλίση αυτή υπολογίζεται σε:

$$i(1985) = 5/1,770.83 = 0.0028$$

και

$$i(2017) = 5/2,628.57 = 0.0019, \text{ οπότε σύμφωνα με το νόμο Darcy είναι:}$$

$$Q_{\text{επέκταση}}(1985) = 17,000 * 300 * 8 * 0.0044 = 179,500 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

και

$$Q_{\text{επέκταση}}(2017) = 17,000 * 300 * 8 * 0.0019 = 77,520 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Εισροές και Εκροές Πηνειού και Τιταρήσιου, κατά μήκος της κοίτης τους (Q_{εισ.ποταμών} - Q_{εκ.ποταμών})

Η έλλειψη ικανοποιητικών δεδομένων αναφορικά με τις μετρήσεις της παροχής των ποταμών, αποτελεί εγγενή αδυναμία στην προσπάθεια της ποσοτικής ανάλυσης της ροής μεταξύ των ποταμών και του αλλουβιακού συστήματος. Ωστόσο, από τα υδρογραφήματα των ποταμών (βλέπε 5^ο Κεφάλαιο) σε συνδυασμό με τους

πιεζομετρικούς χάρτες, φαίνεται ότι υπάρχει μια υδραυλική σχέση επικοινωνίας ανάμεσα στο υδατικό σύστημα και τους δύο ποταμούς. Σύμφωνα με τον Panagoroulos (1995), η σχέση αυτή υποδηλώνει ότι τα ποτάμια τροφοδοτούν το υδατικό σύστημα κυρίως στα ανάντη κατά μήκος του άνω ρου τους, ενώ αντίθετα το υδατικό σύστημα εκφορτίζεται και τροφοδοτεί τους ποταμούς στα κατάντη, δηλαδή κατά μήκος του κάτω ρου αυτών. Παράλληλα προκύπτει και εποχική μεταβολή της σχέσης υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ ποταμών και υδατικού συστήματος. Τα παραπάνω συμπεράσματα ενισχύονται σημαντικά και από υδροχημικά αποτελέσματα των επιφανειακών και υπόγειων νερών, καθώς και από την εφαρμογή μαθηματικού υδροχημικού μοντέλου εξέλιξης της ποιότητας του υπόγειου νερού εντός της περιοχής μελέτης (Panagoroulos et al. 1995). Με βάση όλες τις παραπάνω αναφορές γίνεται η προσέγγιση ότι, η συνολική ποσότητα των διηθήσεων των ποταμών προς το υδατικό σύστημα είναι, κατά ένα μεγάλο ποσοστό, ίση με την ποσότητα των εκφορτίσεων του συστήματος προς τα ποτάμια, σε κλίμακα περιοχής μελέτης. Δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$Q_{\text{εισ.ποταμών}} = Q_{\text{εκ.ποταμών}} \quad (7.14)$$

Στους Πίνακες 7.11 και 7.12 συνοψίζονται όλοι οι προηγούμενοι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό του συνόλου των συντελεστών του υδατικού ισοζυγίου, με βάση τη Σχέση 7.3 ($\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \pm \Delta S$), για κάθε ένα από τα έτη αναφοράς αντίστοιχα.

Πίνακας 7.11. Υπολογισμός υδατικού ισοζυγίου για το έτος αναφοράς 1985.

1985					
ΣQ_{in}	Q_{κάρστ}	270,971	m ³ /ημέρα	$\Sigma Q_{in} = 376,248$	$\Delta S = 8,139$
	Q_{ιζημάτων}	7,746	m ³ /ημέρα		
	Q_{N-ΝΔ}	42,560	m ³ /ημέρα		
	Q_{υποβάθρου}	3,003	m ³ /ημέρα		
	Q_{οσσα}	10,429	m ³ /ημέρα		
	Q_{βροχ.λεκάνης}	12,851	m ³ /ημέρα		
	Q_{απ.δικτύων}	1,773	m ³ /ημέρα		
	Q_{επ.αρδεύσεων}	26,916	m ³ /ημέρα		
	Q_{εισ.ποταμών}	-	-		
ΣQ_{out}	Q_{επέκταση}	179,500	m ³ /ημέρα	$\Sigma Q_{out} = 368,110$	
	Q_{αντλήσεων}	188,610	m ³ /ημέρα		
	Q_{εκ.ποταμών}	-	-		

Πίνακας 7.12. Υπολογισμός υδατικού ισοζυγίου για το έτος αναφοράς 2017.

2017					
ΣQ_{in}	Q _{κάρστ}	248,042	m ³ /ημέρα	ΣQ_{in} = 327,069	ΔS = -31,767
	Q _{ιζημάτων}	4,512	m ³ /ημέρα		
	Q _{N-ND}	30,400	m ³ /ημέρα		
	Q _{υποβάθρου}	3,675	m ³ /ημέρα		
	Q _{οσσα}	9,316	m ³ /ημέρα		
	Q _{βροχ.λεκάνης}	16,483	m ³ /ημέρα		
	Q _{απ.δικτύων}	6,151	m ³ /ημέρα		
	Q _{επ.αρδεύσεων}	8,490	m ³ /ημέρα		
	Q _{εισ.ποταμών}	-	-		
ΣQ_{out}	Q _{επέκταση}	77,520	m ³ /ημέρα	ΣQ_{out} = 369,024	
	Q _{αντλήσεων}	291,504	m ³ /ημέρα		
	Q _{εκ.ποταμών}	-	-		

Λαμβάνοντας υπόψη και τη Σχέση 7.14, προκύπτει ότι οι μεταβολές στην αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος για τα έτη 1985 και 2017 είναι:

$$\Delta S_{1985} = 8,139 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

$$\Delta S_{2017} = -31,767 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Για το 1985 η πολύ μικρή διαφορά ($\Delta S = 8,139 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$, περίπου το 2% του ολικού όγκου) μεταξύ των εισροών και των εκροών του συστήματος, η οποία λαμβάνοντας υπόψη και τις προσεγγίσεις που έγιναν, θεωρείται αμελητέα και κατ' αυτό τον τρόπο επαληθεύεται η αρχική θεώρηση ότι κατά το έτος αυτό το σύστημα βρισκόταν σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας ($\Delta S = 0$).

Κατά το 2017, έτος κατά το οποίο υπήρχαν πρωτογενή δεδομένα για την εφαρμογή του υδατικού ισοζυγίου, προέκυψε μια μεταβολή στην αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος ($\Delta S = -31,767 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$), κατά την οποία το σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερες εκροές, σε σχέση με τις εισροές, της τάξης του 9%. Επομένως, το υπό μελέτη σύστημα φαίνεται ότι για το έτος αυτό έχει αρνητικό ισοζύγιο και βρίσκεται σε κατάσταση υπερεκμετάλλευσης.

8 ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ

8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ποιοτική κατάσταση των υδάτων εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που είτε αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους είτε δρουν μεμονωμένα επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο την χημική σύσταση του νερού. Στο Κεφάλαιο αυτό αναλύονται διεξοδικά τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, τα οποία και αντανακλούν τις υδροχημικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Οι πληροφορίες που εξάγονται από την ανάλυση και επεξεργασία των υδροχημικών δεδομένων είναι πολύ σημαντικές τόσο για την κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος όσο και για την εξέλιξή του. Η πολυπλοκότητα των διεργασιών που συμβαίνουν σε ένα υπόγειο υδατικό σύστημα είναι μεγάλη και αυξάνει το βαθμό δυσκολίας στην προσπάθεια εξαγωγής βέβαιων συμπερασμάτων. Ωστόσο, η διεξοδική ανάλυση και η στοιχειοθετημένη ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό και με τη χρήση των κατάλληλων μαθηματικών και εποπτικών εργαλείων υποστηρίζει σημαντικά τη διαδικασία κατανόησης των υδρογεωχημικών διεργασιών και σύνδεσής τους με την υδροδυναμική λειτουργία και εξέλιξη.

Η επιλογή των θέσεων δειγματοληψίας μέσω ενός εμπειριστατωμένου και αντιπροσωπευτικού δικτύου παρακολούθησης και η διαδικασία της δειγματοληψίας, καθοδηγούμενη από αυστηρό πρωτόκολλο, αποτελούν τα πρωταρχικά βασικά στάδια, πάνω στα οποία βασίζεται η μετέπειτα διαδικασία των εργαστηριακών αναλύσεων και της ποιοτικής αξιολόγησης.

8.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Η σύσταση των δικτύων παρακολούθησης είναι μια κοπιώδης, χρονοβόρα διαδικασία, η οποία απαιτεί γνώσεις και εμπειρία. Υπάρχουν πολλά εγχειρίδια, πρωτόκολλα και ερευνητικά έργα σχετικά με τις αρχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη σύσταση ενός δικτύου παρακολούθησης προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια, η αξιοπιστία και η αντιπροσωπευτικότητα των συλλεχθέντων δεδομένων (Babiy 1984, Tebutt 1992, Panagopoulos 2002, Tulipano et al. 2005, Panagopoulos et al. 2007, Panagopoulos et al. 2014, Panagopoulos et al. 2017). Η σημασία της ακρίβειας και της αντιπροσωπευτικότητας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα δίκτυα παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων, έχει αναγνωριστεί εδώ και μερικές δεκαετίες. Για την επίτευξη των στόχων αυτών, έχουν προταθεί αρκετές προσεγγίσεις, που θεωρούν ορθή τη διαδικασία συλλογής δειγμάτων νερού και αποτελεσματική την λειτουργία των δικτύων παρακολούθησης των υπογείων

υδάτων, εφόσον στηρίζονται σε γεωστατιστικές μεθόδους (Rouhani 1985, Rouhani & Hall 1988).

Σε μια προσπάθεια καθορισμού κατευθυντήριων γραμμών για ουσιαστικές και αξιόπιστες μελέτες παρακολούθησης, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ορίζει επίσης αρχές για την αξιοπιστία και την αντιπροσωπευτικότητα στην επιλογή των θέσεων των δικτύων παρακολούθησης καθώς και τη λειτουργία των δικτύων αυτών, μέσω της Οδηγίας Πλαίσιο για το Νερό, της θυγατρικής Οδηγίας για το Υπόγειο Νερό και του τελευταίου οδηγού εφαρμογής για τη νιτρορρύπανση (EEC 2000, EC 2006, EC 2011). Παρόλα αυτά, οι περισσότερες επιστημονικές προσπάθειες και οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις που αναπτύσσονται στην επιλογή των δικτύων παρακολούθησης, επικεντρώνονται στην αντιπροσωπευτική χωρική κάλυψη μιας λεκάνης, χωρίς να λαμβάνονται επιπλέον κριτήρια και χωρίς να υπάρχει μια ιεραρχική αυτοματοποιημένη διαδικασία επιλογής.

8.2.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Ο σαφής καθορισμός των στόχων που πρέπει να εξυπηρετεί ένα δίκτυο παρακολούθησης είναι υψίστης σημασίας για τον επιτυχημένο σχεδιασμό του. Η ορθή επιστημονική αιτιολόγηση της επιλογής θέσεων παρακολούθησης εξασφαλίζει την αξιοπιστία, την αντιπροσωπευτικότητα, την αποδοχή και την έγκριση του δικτύου από την επιστημονική κοινότητα και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Τυπικά, η επιλογή των σημείων παρακολούθησης γίνεται με βάση την έμπειρη γνώμη της επιστημονικής ομάδας που αναλαμβάνει την υποχρέωση αυτή, στηριζόμενη σε συγκεκριμένες αρχές. Παρόλο που αυτό αποτελεί μια κοινά αποδεκτή διαδικασία, δεν διασφαλίζει την αντικειμενικότητα της επιλογής των θέσεων. Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο βαθμός υποκειμενικότητας και να μεγιστοποιηθεί η αντικειμενικότητα στη διαδικασία επιλογής, αποφασίστηκε η κατάρτιση ενός αλγορίθμου πολυκριτηριακής ανάλυσης, βασιζόμενου σε προγενέστερες μελέτες που έχουν γίνει από την ομάδα του Τμήματος Εγγείων Βελτιώσεων του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων (Panagopoulos et al. 2007, Panagopoulos et al. 2011, Panagopoulos et al. 2014a, Panagopoulos et al. 2014b, Panagopoulos et al. 2017), έτσι ώστε να προκύψει το δίκτυο παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων για την περιοχή μελέτης.

Το πρώτο στάδιο περιλάμβανε τη συλλογή των στοιχείων των γεωτρήσεων με βάση τα υφιστάμενα δεδομένα. Ανατρέχοντας σε πιθανές πηγές πληροφοριών (εκθέσεις μελετών, ερευνητικών έργων, βάσεις δεδομένων περιφέρειας και ΥΠΑΑΤ, διατριβές, ερευνητικές εργασίες κλπ), συλλέχθηκαν δεδομένα για περισσότερες από 350 γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας. Με βάση αυτό το αρχικά καταγεγραμμένο δίκτυο, πραγματοποιήθηκε μια σειρά επισκέψεων στην περιοχή έρευνας, από τις αρχές

Ιουλίου έως και τα τέλη Αυγούστου του 2016, με σκοπό την απογραφή όσο το δυνατό περισσότερων γεωτρήσεων. Για τον επιτόπου έλεγχο των γεωτρήσεων, η απογραφή γινόταν, στις περισσότερες των περιπτώσεων, είτε με συνοδεία εκπροσώπων των Τ.Ο.Ε.Β. της περιοχής είτε με ιδιώτες παραγωγούς. Υπήρχαν ωστόσο και μεμονωμένες μετακινήσεις, κυρίως για να διερευνηθεί η ύπαρξη των καταγεγραμμένων γεωτρήσεων καθώς και η δυνατότητα δειγματοληψίας σε όσο το δυνατό περισσότερες από αυτές. Παράλληλα με την απογραφή των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις τόσο κατά μήκος της κοίτης του Πηνειού ποταμού όσο και της κοίτης του Τιταρήσιου, με σκοπό της εξεύρεση κατάλληλων θέσεων δειγματοληψίας, στο πλαίσιο της επικουρικής παρακολούθησης των επιφανειακών υδάτων στην περιοχή έρευνας.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η απογραφή των δυνητικών θέσεων παρακολούθησης της ποιοτικής κατάστασης των υδάτων, γινόταν σε ειδικά διαμορφωμένο δελτίο απογραφής (κοινό με το αντίστοιχο των σταθμημετρήσεων). Στο δελτίο αυτό αναγράφονται ένα πλήθος στοιχείων αναφορικά τόσο με τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε σημείου απογραφής όσο και με τα δεδομένα ιδιοκτησίας (καθεστώς ιδιοκτησίας, όνομα, τηλέφωνο επαφής, άδεια δειγματοληψίας κ.α). Σημειώνεται ότι όλα τα αναγραφόμενα δεδομένα, που αναφέρονται στο δελτίο απογραφής και τα οποία συμπληρώθηκαν είτε από την επιτόπου επίσκεψη είτε από τις συλλεχθείσες βιβλιογραφικές πηγές στο γραφείο, είχαν ως στόχο την παροχή όλης της απαραίτητης πληροφορίας έτσι ώστε το κάθε σημείο απογραφής να αξιολογηθεί σύμφωνα με τον αλγόριθμό που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια. Η μορφή του, ειδικά διαμορφωμένου για την παρούσα διατριβή, δελτίου απογραφής παρουσιάζεται στο Παράρτημα 1 (Εικόνα Ε1.1). Από τη διαδικασία της απογραφής προέκυψε μια αναλυτική βάση δεδομένων για συνολικά 185 γεωτρήσεις, ως επί το πλείστον εντός της οριοθετημένης περιοχής έρευνας, καταβάλλοντας προσπάθεια να καλυφθεί σε γενικές γραμμές το σύνολο της έκτασής της. Ωστόσο, εκ των προτέρων ήταν γνωστό ότι σε κάποιες περιοχές είτε δεν υπήρχαν λειτουργικές γεωτρήσεις είτε υπήρχαν λίγες μη αδειοδοτημένες και ως εκ τούτου παρουσίαζαν αντικειμενικές δυσκολίες στην ένταξή τους στο δίκτυο. Από το σύνολο το απογεγραμμένων γεωτρήσεων, οι 15 τέθηκαν εκτός αξιολόγησης, σύμφωνα με όσα θα ειπωθούν στην επόμενη παράγραφο, ενώ οι υπόλοιπες 170 γεωτρήσεις, ήταν αυτές που προ-επιλέχθηκαν, ώστε να τεθούν υπό αξιολόγηση βάσει του αλγορίθμου επιλογής και τελικά να προκύψει η οριστική μορφή του δικτύου παρακολούθησης της ποιοτικής κατάστασης των υπογείων υδάτων για την περιοχή έρευνας.

8.2.1.1 Ανάπτυξη αλγορίθμου πολυκριτηριακής ανάλυσης

Ο αλγόριθμος επιλογής των θέσεων δειγματοληψίας, αποτελείται από μια σειρά κριτηρίων, σε κάθε ένα από τα οποία αποδόθηκε ένας συγκεκριμένος συντελεστής βαρύτητας και μια κλάση, προκειμένου να υπολογιστεί μια βαθμολογία για κάθε υποψήφιο σημείο παρακολούθησης. Στην προσέγγιση αυτή ο βαθμός υποκειμενικότητας μειώνεται και περιορίζεται στην επιλογή των κριτηρίων αξιολόγησης, στη δήλωση των καθορισμένων συντελεστών στάθμισης και στις αντίστοιχες τάξεις. Ως εκ τούτου, ο βαθμός υποκειμενικότητας είναι συστηματικός για όλες τις υποψήφιες θέσεις επιλογής στο πλαίσιο αυτής της έρευνας. Οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο κυμαίνονται από το 1 έως το 10, ανάλογα με το πόσο καθοριστικό θεωρείται το κριτήριο στην τελική επιλογή και οι αντίστοιχες κλάσεις έχουν κλίμακα από το 1 έως το 5 (ακέραιες τιμές). Οι κλάσεις για κάθε κριτήριο αποδίδονται με τρόπο που να αντικατοπτρίζει τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή έρευνας.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 14 παράμετροι στην ανάπτυξη του πολυκριτηριακού αλγορίθμου επιλογής και αυτές χωρίζονται σε δύο διαφορετικές κατηγορίες (Πίνακας 8.1). Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει 4 παραμέτρους που σχετίζονται με το εξεταζόμενο φυσικό σύστημα (είδος υδροφόρου, βάθος εμφάνισης και υδρομάστευσης, κλπ). Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει 10 παραμέτρους που σχετίζονται: (α) με τις τεχνικές προδιαγραφές της γεώτρησης αφαίρεσης, (β) την δυνατότητα δειγματοληψίας κατά τη διάρκεια των προκαθορισμένων περιόδων δειγματοληψίας, (γ) τη συσχέτιση με ποσοτικά στοιχεία του υδροφόρου συστήματος σε αυτήν τη θέση (μετρήσεις στάθμης) και την ύπαρξη ιστορικών στοιχείων (ποιότητας και ποσότητας) και τέλος (ε) τον βαθμό βεβαιότητας ότι το συλλεγόμενο δείγμα θα είναι αντιπροσωπευτικό (φρέσκο υπόγειο νερό) και απαλλαγμένο από επιμολύνσεις μέσω της κεφαλής της γεώτρησης.

Ο αλγόριθμος συμπεριέλαβε και τα ακόλουθα κριτήρια αποκλεισμού, που σχετίζονται με την επιχειρησιακή λειτουργικότητα κάθε υποψήφιας θέσης παρακολούθησης:

- i) μη χορήγηση άδειας δειγματοληψίας από τον ιδιοκτήτη ή τον υπεύθυνο λειτουργίας της γεώτρησης,
- ii) η γεώτρηση δεν είχε ρεύμα,
- iii) δεν υπήρχε αντλητικός εξοπλισμός ή παρουσίαζε προβλήματα λειτουργίας. Σημειώνεται, ότι στην περίπτωση μη ύπαρξης αντλητικού εξοπλισμού αλλά μικρού βάθους στάθμης (>15m), το κριτήριο δεν οδηγεί σε αποκλεισμό, καθώς παρέχεται η τεχνική δυνατότητα λήψης δείγματος με εναλλακτικό τρόπο,
- iv) μη εφικτός τρόπος δειγματοληψίας.

Τα παραπάνω κριτήρια αποκλεισμού δεν σχετίζονται στην πραγματικότητα με το ίδιο το φυσικό σύστημα, τις αγρονομικές πρακτικές ή τις τεχνικές προδιαγραφές του

σημείου, με στοιχεία δηλαδή τα οποία διασφαλίζουν την ακεραιότητα του συλλεγόμενου δείγματος. Ωστόσο, ο ορισμός τους ως τέτοιων κρίθηκε απαραίτητος ώστε να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου παρακολούθησης με τη συλλογή τακτικών δειγμάτων υπόγειων υδάτων στις προκαθορισμένες περιόδους. Η ακριβής μορφή του αλγορίθμου έχει ως εξής:

$$R = \frac{\sum_1^n (WF_n * C_n)}{\sum(WF_n)} * \prod_1^n E_n \quad (8.1)$$

όπου:

R = η υπολογιζόμενη βαθμολογία για κάθε δυνητικό σημείο δειγματοληψίας

WF_n = συντελεστής βαρύτητας που αποδίδεται στη n παράμετρο

C_n = κατηγορία από 1 έως 5 (3 ή 5 κατηγορίες για κάθε παράμετρο) με την οποία αξιολογείται η n παράμετρος

Σ = Άθροισμα

Π = Γινόμενο

E = Παράγοντας αποκλεισμού

n = 1 -14

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, 14 παράμετροι εξετάστηκαν στην πολυκριτηριακή ανάλυση. Αυτά αναφέρονται στον Πίνακα 8.1 και αναλύονται στις επόμενες παραγράφους. Οι αντίστοιχες τάξεις ανά κριτήριο αναφέρονται στον Πίνακα 8.2.

Πίνακας 8.1. Εξεταζόμενα κριτήρια και συντελεστές βαρύτητας του αλγορίθμου επιλογής θέσεων δειγματοληψίας.

α/α	Παράμετρος (φυσικό σύστημα)	Συντελεστής βαρύτητας
1	Ύπαρξη λιθολογικής τομής	4
2	Βάθος υπόγειας στάθμης	5
3	Βάθος φίλτρων	6
4	Είδος υδροφόρου	8
5	Βάθος έργου	6
α/α	Παράμετρος (τεχνικές προδιαγραφές και συνθήκες)	Συντελεστής βαρύτητας
6	Δυνατότητα μέτρησης υπόγειας στάθμης	10
7	Ύπαρξη δεδομένων υπόγειας στάθμης	9
8	Καθεστώς λειτουργίας	8
9	Δυνατότητα δειγματοληψίας	7
10	Ύπαρξη ποιοτικών δεδομένων	9
11	Προσέγγιση Θέσης - Άδεια δειγματοληψίας – Ετήσια Πρόσβαση	7
12	Χρήση γεώτρησης	3
13	Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5
14	Προστασία κεφαλής	7

Πίνακας 8.2. Κατηγορίες για κάθε παράμετρο που συμμετέχει στον αλγόριθμο επιλογής των θέσεων δειγματοληψίας.

Κατηγορίες Παράμετροι	5	4	3	2	1	Παράγοντας αποκλεισμού	
						Εφαρμογή	Επιλεξιμότητα
Λιθολογική τομή	Υπάρχει	Υπάρχει αντιπροσωπευτική	Περιγραφική	Περιγραφική Δίπλα	Δεν υπάρχει	Όχι	1
Βάθος υπ. στάθμης	<3	3 to 10	10.01 to 20	20.01 to 50	>50.0 ή άγνωστο	Όχι	1
Βάθη φίλτρων	Διακριτά <50>		Συνεχόμενα		Άγνωστο	Όχι	1
Είδος υδροφόρου ορίζοντα	Ελεύθερος		Μεικτός/Απλός Υπο-Πίεση/Πολλαπλός Υπο-Πίεση		Άγνωστο	Όχι	1
Βάθος έργου	Γνωστό		Περιγραφικό		Άγνωστο	Όχι	1
Δυνατότητα μέτρησης υπ. στάθμης	Ναι, ανοικτή σωλήνα	Ναι, πιεζόμετρο	Ναι, διάκενο πομόνας	Ναι, διάκενο καλώδιων	Όχι	Όχι	1
Δεδομένα υπ. στάθμης	Χρονοσειρά συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας 10ετίας	Μεμονωμένες τιμές συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας 10ετίας	Χρονοσειρά μη συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας 10ετίας	Μεμονωμένες τιμές μη συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας 10ετίας	Όχι	Όχι	1
Καθεστώς Λειτουργίας	Πλήρη λειτουργία	Πηγάδι (άντληση με φορητή αντλία)	Κενή οπή (άντληση με φορητή αντλία)	Λειτουργεί βοηθητικά	Λειτουργεί σε έκτακτες περιπτώσεις	Παράγοντες αποκλεισμού: Δεν έχει ρεύμα, χαλασμένος εξοπλισμός, καθόλου εξοπλισμός (& βάθος στάθμης >15m)	0 ή 1
Δυνατότητα δειγματοληψίας	Ναι, υπάρχον βρυσάκι/βάνα		Ναι, εξαγωγή σωλήνα		Ναι, με φορητή αντλία	Παράγοντας αποκλεισμού: Δεν υπάρχει δυνατότητα δειγματοληψίας	0 ή 1
Δεδομένα ποιότητας	Χρονοσειρά συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας 10ετίας	Μεμονωμένες τιμές συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας 10ετίας	Χρονοσειρά μη συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας 10ετίας	Μεμονωμένες τιμές μη συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας 10ετίας	Όχι	Όχι	
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	ΠΘ - ΑΔ - ΕΠ		ΠΘ - ΑΔ		Μόνο ΑΔ ή ΑΔ και ΕΠ	Παράγοντας αποκλεισμού: Δεν υπάρχει άδεια δειγματοληψίας	0 ή 1
Χρήση γεώτρησης	Υδρευτική	Μεικτή	Αρδευτική	Κτηνοτροφική	Βιομηχανική/Άλλη/Άγνωστο	Όχι	1
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	Δημοτική	ΤΟΕΒ/Συνιδιοκτησία	Ιδιωτική	Στρατιωτική	Άλλη ή Άγνωστο	Όχι	1
Προστασία κεφαλής	Υψηλή	Μέση	Αποδεκτή	Χαμηλή	Ανεπαρκής	Όχι	1

Σημειώνεται, ότι ο παράγοντας αποκλεισμού δηλώνει σε ποια από τις παραμέτρους ορίζονται τα κριτήρια αποκλεισμού. Στη στήλη «Εφαρμογή» επισημαίνονται οι παράμετροι όπου τέτοια κριτήρια είναι εφαρμόσιμα. Στη στήλη «Επιλεξιμότητα» σημειώνεται ο παράγοντας, που έχει εκχωρηθεί στον αλγόριθμο για τη συγκεκριμένη παράμετρο (0 = αποκλεισμός, 1 = μη αποκλεισμός). Εφόσον ενεργοποιηθούν κριτήρια αποκλεισμού (δηλαδή ακόμη και ένας παράγοντας επιλεξιμότητας έχει οριστεί ως "0"), το υποψήφιο σημείο δεν θεωρείται πλέον επιλέξιμο παρά την κατάταξη που μπορεί να λάβει από τις υπόλοιπες παραμέτρους.

8.2.1.2 Ανάλυση παραμέτρων αλγορίθμου

Στη παράγραφο αυτή αναλύεται η κάθε μία από τις εξεταζόμενες παραμέτρους, που συμμετέχουν στον αλγόριθμο επιλογής, όπως αυτές παρουσιάσθηκαν στον Πίνακα 8.1, δίνοντας έμφαση στη σημασία της κάθε παραμέτρου και τη συνάφειά της με το στόχο της παρούσας έρευνας.

1. Λιθολογική τομή: Η ύπαρξη μιας αξιόπιστης λιθολογικής τομής για μία γεώτρηση είναι σημαντική, καθώς επιτρέπει τη μελέτη της στρωματογραφικής ακολουθίας στη θέση όπου έχει κατασκευαστεί η γεώτρηση. Από τη λιθολογική τομή εξάγονται πολύτιμες πληροφορίες τόσο για τη λιθοστρωματογραφία όσο και για την κατασκευή της γεώτρησης. Ως εκ τούτου, η θέση των ενεργών υδροφόρων μπορεί να προσδιορισθεί. Η ακριβής γνώση αυτών των παραμέτρων είναι χρήσιμη, ως προς την επιλογή της συγκεκριμένης γεώτρησης και συμβάλλει στην επιστημονική αιτιολόγηση της επιλογής. Στη παράμετρο αυτή αποδίδεται συντελεστής βαρύτητας 4. Η σχετικά χαμηλή αυτή τιμή του συντελεστή, δεν σχετίζεται τόσο με τη σημασία της παραμέτρου όσο με το γεγονός ότι ορισμένες πληροφορίες που λαμβάνονται από μια λιθολογική τομή μπορούν επίσης να εξαχθούν και από άλλες πηγές. Πέντε κλάσεις (κατηγορίες) αναγνωρίζονται για τη συγκεκριμένη παράμετρο και περιγράφονται ως εξής: Η κλάση 5 αντιστοιχεί σε περιπτώσεις, όπου υπάρχει λιθολογική τομή (έντυπα ή ψηφιακά) και αυτή θεωρείται αξιόπιστη. Η κλάση 4 αντιστοιχεί σε τομές που θεωρούνται αξιόπιστες αλλά αναφέρονται σε μία άλλη γεώτρηση που βρίσκεται πλησίον της υπό εξέταση γεώτρησης. Η κλάση 3 αναφέρεται σε περιγραφικές λιθολογικές τομές, που σχεδιάστηκαν με βάση τις περιγραφικές πληροφορίες που ανέφερε είτε ο ιδιοκτήτης της γεώτρησης, είτε ο εκπρόσωπος του Τ.Ο.Ε.Β. ή ακόμα και ο κατασκευαστής της γεώτρησης. Η κλάση 2 αντιστοιχεί σε περιγραφικές τομές, οι οποίες αναφέρονται σε μία κοντινή γεώτρηση ενώ η κλάση 1 αντιστοιχεί στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει καθόλου λιθολογική τομή.

2. Βάθος υπόγειας στάθμης: Η γνώση του βάθους της υπόγειας στάθμης του νερού αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για τον σκοπό της παρούσας έρευνας και άρα για τη διαδικασία επιλογής. Ωστόσο, αυτό το κριτήριο πρέπει να αξιολογηθεί σε συνδυασμό με τον τύπο του ενεργού υδροφόρου (-ων), τον οποίο υδρομαστεύει η γεώτρηση (δηλαδή

συνδέεται στενά με την παράμετρο 4). Λαμβάνοντας υπόψη την έλλειψη δεδομένων για τη φρεάτια υδροφορία της περιοχής έρευνας, τα μικρά βάθη στάθμης σε συνδυασμό και με έναν ελεύθερο τύπο υδροφόρου, προτιμώνται έναντι των μεγαλύτερων βαθών, τα οποία ως επί το πλείστον αντανακλούν έναν βαθύτερο υπό-πίεση υδροφόρο. Επίσης, η ένταξη στο δίκτυο γεωτρήσεων της φρεάτιας υδροφορίας προτιμάται καθώς θα επέδιδε με καλύτερο τρόπο τις ζώνες και πηγές ρύπανσης από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, που κατεισδύει στην κορεσμένη ζώνη μέσω βαθιάς διήθησης. Ως εκ τούτου, μικρά βάθη στάθμης που σχετίζονται με έναν βαθύ υπό-πίεση υδροφόρο μπορεί να μην αποδώσουν μια πιθανή υπάρχουσα ρύπανση, ενώ τα ρηχά ύδατα που σχετίζονται με έναν φρεάτιο υδροφόρο αποδίδουν καλύτερα τη δυνητική ρύπανση. Η γνώση άλλωστε των ευάλωτων περιοχών ρύπανσης αποτελεί βασικό εργαλείο για την εξέλιξη των εργασιών της παρούσας έρευνας. Ένας συντελεστής βαρύτητας 5 αποδίδεται σε αυτό το κριτήριο, καθώς είναι σημαντικό, αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του υδροφόρου (Παράμετρος 4, τύπος υδροφόρου), έτσι ώστε να μην υπάρξει παρερμηνεία των αποτελεσμάτων. Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, η κλάση 5 αντιστοιχεί σε βάθη μικρότερα από 3m, η κλάση 4 σε βάθη 3-10m, η κλάση 3 σε βάθη 10.01-20m, η κλάση 2 σε βάθη 20.01-50m και τέλος η κλάση 1 στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν δεδομένα ή το βάθος ξεπερνά τα 50m.

3. Βάθη φίλτρων: Αυτή η παράμετρος συνδέεται με την παράμετρο 5 (βάθος έργου) και επίσης έμμεσα με την επόμενη παράμετρο (είδος υδροφόρου). Εκτός από το ενεργό βάθος της γεώτρησης, τα διαστήματα των φίλτρων παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τον(τους) υδροφόρο(-ους), τους οποίους υδρομαστεύει η γεώτρηση. Ανεξάρτητα από την ακριβή θέση των φίλτρων, στις γεωτρήσεις που δεν διαθέτουν απομόνωση των υδροφόρων στρωμάτων που διατρήουν, (πχ τσιμεντάρισμα φρεάτιας υδροφορίας), η ανάμιξη υπόγειων υδάτων μεταξύ των επάλληλων υδροφόρων πραγματοποιείται μέσω της διήθησης από το χαλικό φίλτρο με το οποίο είναι εξοπλισμένες. Ωστόσο, το φαινόμενο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντο σε σχέση με την ανάμιξη που προκαλείται μέσω των φίλτρων. Είναι επομένως απαραίτητη η γνώση για κάθε θέση παρακολούθησης, εάν το δείγμα νερού είναι αντιπροσωπευτικό ενός μόνο υδροφόρου ή περισσοτέρων και ποιο ακριβώς είναι αυτοί. Τα βάθη των φίλτρων, αποτελούν ένα στοιχείο που είναι χρήσιμο και για την μετέπειτα σύνθεση του μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής, ωστόσο δεν είναι καθοριστικό για τη λειτουργία του. Με βάση το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό και με το ότι σχετίζεται και με άλλες παραμέτρους, του αποδίδεται ένας συντελεστής βαρύτητας 6, χωρίς να υποβαθμίζεται η σημασία του. Τρεις κλάσεις κατάταξης της παραμέτρου αυτής καθορίστηκαν με γνώμονα τη γεωμετρία των υδροφόρων. Η κλάση 5 αντιστοιχεί σε περιπτώσεις όπου τα φίλτρα βρίσκονται σε διακριτά βάθη πάνω και κάτω των 50m, η κλάση 3 στις περιπτώσεις συνεχόμενων φίλτρων ενώ η κλάση 1 αντιστοιχεί στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.

4. Είδος υδροφόρου: Η γνώση του τύπου των υδροφόρων, από τους οποίους προέρχεται το δείγμα νερού είναι ουσιαστική για τη συγκεκριμένη έρευνα. Μια ρηχή γεώτρηση αντλεί

έναν επιφανειακό και πιθανότατα φρεάτιο υδροφόρο, ο οποίος είναι πιο ευαίσθητος στη ρύπανση σε σχέση με έναν βαθύτερο υπό-πίεση υδροφόρο. Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με τις παραμέτρους 2 (βάθος υπόγειας στάθμης), 3 (βάθη φίλτρων) και 5 (βάθος έργου). Έχοντας ως δεδομένο την ύπαρξη δύο διαφορετικού τύπου υδροφόρων στην περιοχή, η ύπαρξη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων για κάθε υδροφόρο αποτελεί ουσιαστικό δεδομένο της ποιοτικής τους αξιολόγησης. Η περίπτωση να αποδοθεί μια ποιοτική σύσταση, που να αντανακλά το είδος του υδροφόρου για την περιοχή, αποτελεί πλεονέκτημα, καθώς ενδιάμεσες συστάσεις οδηγούν σε πολύτιμα συμπεράσματα (ανάμιξη, υδραυλική επικοινωνία κ.α.). Λαμβάνοντας υπόψη την έλλειψη δεδομένων για τον φρεάτιο υδροφόρο, προτιμάται (και ως εκ τούτου αποδίδεται υψηλότερη κλάση), η περίπτωση της παρουσίας του υδροφόρου αυτού σε μία θέση δειγματοληψίας. Προκειμένου λοιπόν να δοθεί ένα πλεονέκτημα σε θέσεις όπου αντλούν από τον ελεύθερο υδροφόρο (εφόσον υπάρχουν), αποδίδεται υψηλός συντελεστής βαρύτητας στην παράμετρο αυτή (9). Με βάση τα προηγούμενα, η κλάση 5 αποδίδεται στην περίπτωση του ελεύθερου υδροφόρου, η κλάση 3 αντιπροσωπεύει όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις υδροφόρου (μεικτός, μερικώς υπό πίεση, υπό πίεση, πολλαπλός) και η κλάση 1 αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν δεδομένα για να καθορισθεί ο τύπος του υδροφόρου που έχει διατηρηθεί. Το σκεπτικό της παράθεσης 3 σχετιζόμενων παραμέτρων (είδος υδροφόρου, βάθος υπόγειας στάθμης, βάθη φίλτρων) στον εξεταζόμενο αλγόριθμο, ενεργεί ως διασταύρωση ή μέσο επικύρωσης των υπαρχόντων δεδομένων, προκειμένου να διασφαλιστεί, ότι το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας επιλογής είναι καλά ελεγχόμενο και όχι παραπλανητικό, ως αποτέλεσμα πιθανής έλλειψης δεδομένων.

5. Βάθος έργου: Το βάθος μιας γεώτρησης αντανακλά, συνήθως, τόσο τον τύπο του υδροφόρου όσο και εμμέσως το μέτρο του βαθμού αποτύπωσης πιθανής ρύπανσης από την επιφάνεια. Ως εκ τούτου, μία ρηχή γεώτρηση αντλεί έναν επιφανειακό και πιθανότατα φρεάτιο υδροφόρο, ο οποίος είναι πιο ευαίσθητος στη ρύπανση σε σχέση με έναν βαθύτερο υπό-πίεση υδροφόρο. Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με τις παραμέτρους 2 (βάθος υπόγειας στάθμης), 3 (βάθη φίλτρων) και 4 (είδος υδροφόρου). Μιλώντας για την περιοχή έρευνας, μια βαθιά γεώτρηση μπορεί να αντλεί είτε μόνο τον βαθύτερο υδροφόρο είτε τον βαθύ και τον φρεάτιο, επομένως τα δείγματα νερού από αυτήν θα αντικατοπτρίζουν είτε τις συνθήκες των βαθιών υπόγειων υδάτων είτε το αποτέλεσμα της ανάμιξης των δύο υδροφόρων. Σε κάθε περίπτωση, η σαφής γνώση της ακριβούς κατάστασης ανά θέση παρακολούθησης διασφαλίζει την ακεραιότητα της έρευνας. Σε αυτή την παράμετρο αποδίδεται τιμή συντελεστή βαρύτητας 6. Το βάθος του έργου βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση με τις προηγούμενες παραμέτρους και επιπλέον, πολλές από τις πληροφορίες που εξάγονται από την παράμετρο αυτή, μπορούν να προκύψουν και από άλλες παραμέτρους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ταξινόμηση της παραμέτρου αυτής σε τρεις κλάσεις, ως εξής: κλάση 5 όταν το βάθος του έργου είναι γνωστό, κλάση 3 όταν το βάθος του έργου προκύπτει κατ' εκτίμηση από την περιγραφή του ιδιοκτήτη (ή άλλου υπευθύνου) και κλάση 1 όταν το βάθος του έργου είναι άγνωστο.

6. Δυνατότητα μέτρησης υπόγειας στάθμης: Ο σχεδιασμός ενός κοινού δικτύου παρακολούθησης της ποιοτικής κατάστασης, μέσω των δειγματοληψιών, καθώς και της ποσοτικής, μέσω της μέτρησης της υπόγειας στάθμης, αποτέλεσε βασικό στόχο της παρούσας έρευνας. Γνωρίζοντας τη γενικότερη κατάσταση που επικρατεί στον ελληνικό χώρο και ιδιαίτερα στη θεσσαλική πεδιάδα, αναφορικά με την κατάσταση των υφιστάμενων γεωτρήσεων, ένα τέτοιο σενάριο πλήρους ταύτισης των δικτύων φαντάζει ιδανικό. Ωστόσο, γίνεται προσπάθεια μέσω αυτής της παραμέτρου, για την πρόκριση θέσεων δειγματοληψίας, που παρέχουν και τη δυνατότητα μέτρησης της υπόγειας στάθμης. Είναι ξεκάθαρη η σημασία της συσχέτισης της ποιοτικής με την ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων, καθώς αυτές είναι άρρηκτα συνδεδεμένες. Ως εκ τούτου η ανάγκη για κοινές θέσεις παρακολούθησης οδηγεί στην απόδοση συντελεστή βαρύτητας 10 στην παράμετρο αυτή και η διαφοροποίηση των τάξεων γίνεται με βάση τον τρόπο μέτρησης της υπόγειας στάθμης (ικανότητα μέτρησης από περίοδο σε περίοδο). Η κλάση 5 αποδίδεται στην ιδανική περίπτωση ύπαρξης κενής εγκαταλελειμμένης γεώτρησης, δίπλα στην υπάρχουσα, που χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία. Η εγκαταλελειμμένη γεώτρηση παίζει το ρόλο ανοικτού πιεζόμετρου και προκρίνεται έναντι του απλού πιεζόμετρου (κλάση 4), καθώς είναι δύσκολο να παρουσιάσει προβλήματα φραγής ή καταστροφής. Η κλάση 3 αποδίδεται στην περίπτωση ύπαρξης διακένου στην κεφαλή της γεώτρησης (που είναι εξοπλισμένη με αντλία κατακόρυφου άξονα), μέσα από το οποίο μπορεί να εισχωρήσει το σταθμόμετρο και να μετρηθεί η υπόγεια στάθμη. Μια περίπτωση που δεν είναι το ίδιο ασφαλής με τις προηγούμενες, γι' αυτό και ο μικρότερος βαθμός κλάσης. Η μέτρηση της υπόγειας στάθμης από διάκενο, που μπορεί να παρουσιάζεται μεταξύ των καλωδίων μιας υποβρύχιας γεώτρησης, αποτελεί την έσχατη λύση σταθμημέτρησης, καθώς είναι ιδιαίτερα επισφαλής, γι' αυτό και της αποδίδεται η κλάση 2. Τέλος, η κλάση 1 αντανακλά την περίπτωση μη δυνατότητας πραγματοποίησης μέτρησης της στάθμης.

7. Ύπαρξη δεδομένων υπόγειας στάθμης: Γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι η γνώση της επικρατούσας κατάστασης, σχετικά με την ποσοτική εκτίμηση της περιοχής έρευνας, αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση που αυτή μπορεί να συγκριθεί με πρότερες αλλά και σχετικά πρόσφατες χρονικές περιόδους. Η γνώση της προγενέστερης κατάστασης σε συνδυασμό με την κατανόηση της υπάρχουσας, αποτελεί τη βάση για την πρόγνωση των μελλοντικών σεναρίων εξέλιξης της περιοχής. Έτσι, η ύπαρξη χρονοσειράς μετρήσεων υπόγειας στάθμης, αποτελεί εφάμιλλης σημασίας παράμετρο με τη δυνατότητα μέτρησής της. Μιας και η σημασία της παραμέτρου αυτής, εξαρτάται από την προηγούμενη, της αποδίδεται ένας συντελεστής βαρύτητας 9. Η κλάση 5 προσδίδεται στην περίπτωση ύπαρξης χρονοσειράς δεδομένων, που περιλαμβάνουν και την τελευταία δεκαετία, η κλάση 4 στην περίπτωση που δεν υπάρχει πλήρης χρονοσειρά αλλά μεμονωμένες τιμές, που περιλαμβάνουν την τελευταία δεκαετία, η κλάση 3 περιλαμβάνει την περίπτωση χρονοσειράς χωρίς πρόσφατες μετρήσεις (>10 χρόνια), η κλάση 2 σε ύπαρξη μεμονωμένων τιμών παλαιών μετρήσεων (>10 χρόνια) και η κλάση 1 αποδίδεται στην μη ύπαρξη δεδομένων υπόγειας στάθμης.

8. Καθεστώς λειτουργίας γεώτρησης: Το κριτήριο αυτό συνδέεται με το κριτήριο 11 (Προσβασιμότητα, άδεια δειγματοληψίας, ύπαρξη βρύσης) και εξετάζει την ικανότητα κάθε γεώτρησης να αντλεί τα υπόγεια ύδατα, μέσω της ύπαρξης εγκατεστημένου αντλητικού εξοπλισμού, αλλά και την κατάσταση στην οποία αυτός βρίσκεται. Μη λειτουργικές γεωτρήσεις (λόγω βλάβης εξοπλισμού, διακοπών ρεύματος, ανύπαρκτου εξοπλισμού ή άλλου λόγου), αποτελούν αποτρεπτικό παράγοντα για δειγματοληψία και επηρεάζουν αρνητικά συνολικά το πρόγραμμα δειγματοληψίας (παράγοντας αποκλεισμού). Πέντε κλάσεις και συντελεστής βαρύτητας 8 αποδίδονται σε αυτό το κριτήριο. Η κλάση 5 αντιστοιχεί σε γεωτρήσεις πλήρως εξοπλισμένες και συνεχούς λειτουργίας, η κλάση 4 αντιστοιχεί σε πηγάδια, όπου η άντληση μπορεί να λάβει χώρα με φορητή αντλία, η κλάση 3 στην περίπτωση μη εξοπλισμένης γεώτρησης και μικρού βάθους στάθμης (έως 15m, φορητή αντλία), η κλάση 2 για γεωτρήσεις που λειτουργούν επικουρικά και η τελευταία κλάση 1, στην ύπαρξη γεωτρήσεων, οι οποίες λειτουργούν μόνο σε έκτακτες περιπτώσεις. Αυτή είναι η πρώτη παράμετρος στην οποία έχουν εισαχθεί οι προϋποθέσεις επιλεξιμότητας, έτσι ώστε να λειτουργήσουν ως παράγοντας αποκλεισμού (Παράγραφος 8.2.1.1). Στις γεωτρήσεις που δεν χρησιμοποιούνται (δεν υπάρχει ηλεκτρική ισχύς, βλάβη στον εξοπλισμό ή δεν υπάρχει εγκατεστημένος αντλητικός εξοπλισμός με μεγάλο βάθος στάθμης) αποδίδεται η τιμή "0" στην επιλεξιμότητα και δεν παίρνει μέρος σε περαιτέρω αξιολόγηση, παρά το γεγονός ότι θα μπορούσε να καταταχθεί υψηλά με βάση τις υπόλοιπες παραμέτρους που εξετάζονται.

9. Δυνατότητα δειγματοληψίας: Αποτελεί τη δεύτερη παράμετρο, στην οποία υπεισέρχεται ο παράγοντας αποκλεισμού. Εξετάζει την περίπτωση των γεωτρήσεων, οι οποίες δεν παρουσιάζουν κάποιο πρόβλημα λειτουργικότητας, ωστόσο ο τρόπος δειγματοληψίας μπορεί να παρουσιάζει δυσκολίες ή και να είναι μη εφικτός. Τρεις κλάσεις και συντελεστής βαρύτητας 7, προσδίδονται στην παρούσα παράμετρο. Ιδανική περίπτωση (Κλάση 5), η ύπαρξη διακόπτη και υδροληψίας (βρυσάκι) στην κεφαλή της γεώτρησης, από την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα και βάσει πρωτοκόλλου η δειγματοληψία του νερού. Η κλάση 3 αποδίδεται στις περιπτώσεις δειγματοληψίας, όπου χρειάζεται η εξαγωγή κάποιου σωλήνα (εφόσον αυτό είναι εφικτό) για να λάβει χώρα η δειγματοληψία. Η κλάση 1 είναι η περίπτωση, όπου λόγω του μικρού βάθους στάθμης (<15m), η δειγματοληψία δύναται να πραγματοποιηθεί με φορητή αντλία, όπως γίνεται και στις περιπτώσεις λήψης δειγμάτων από επιφανειακά ύδατα. Ο παράγοντας αποκλεισμού (0 στην επιλεξιμότητα) υπεισέρχεται στην περίπτωση που ενώ η γεώτρηση μπορεί να λειτουργήσει κανονικά δεν υπάρχει κάποιος εμφανής τρόπος δειγματοληψίας (π.χ. μη ύπαρξη διακόπτη/υδροληψίας και πλήρως υπογειοποιημένο δίκτυο). Δειγματοληψία από τυχόν διαρροές ή από δεξαμενές πλήρωσης, απορρίπτονται βάσει του πρωτοκόλλου δειγματοληψίας (Παράγραφος 8.3).

10. Ύπαρξη δεδομένων ποιότητας υπόγειου νερού: Όπως και στην περίπτωση της ύπαρξης ποσοτικών δεδομένων έτσι και οι πληροφορίες σχετικά με την προηγούμενη ποιοτική κατάσταση των υπογείων υδάτων, είναι σημαντικές για την περαιτέρω εξέλιξη της

παρούσας έρευνας. Ο ίδιος συντελεστής βαρύτητας (9) και οι ίδιες κλάσεις με την παράμετρο 7 (Υπαρξη δεδομένων υπόγειας στάθμης), αποδίδονται και στην παράμετρο αυτή.

11. Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση: Τρία συγκεκριμένα στοιχεία εξετάζονται βάσει αυτού του κριτηρίου (α) η σχετικά εύκολη προσέγγιση της δυνητικής θέσης δειγματοληψίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είτε υπό κανονικές είτε υπό ακραίες καιρικές συνθήκες, (β) η ύπαρξη άδειας δειγματοληψίας από τον ιδιοκτήτη της γεώτρησης, κατόπιν επαφής μαζί του, (γ) η ετήσια δυνατότητα πρόσβασης στο σημείο δειγματοληψίας (περίπτωση σημείου εντός οικίσκου). Το τελευταίο στοιχείο υπεισέρχεται στην παράμετρο αυτή, καθώς σε πολλές περιπτώσεις γεωτρήσεων (κυρίως των Τ.Ο.Ε.Β.), οι οποίες βρίσκονται εντός οικίσκου, σφραγίζονται κατά περιόδους, έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα φθορών και κλοπών. Αν και αυτές οι περίοδοι, δε συμπίπτουν με τις προγραμματισμένες περιόδους δειγματοληψίας (Παράγραφος 8.2.2), ωστόσο το συγκεκριμένο στοιχείο μπαίνει ως παράγοντας διαχωρισμού στην περίπτωση που μπορεί να χρειασθεί κάποια έκτακτη (μη προγραμματισμένη) λήψη δείγματος. Η εξέταση των παραπάνω παραγόντων αντικατοπτρίζει τις δυνατότητες επιτυχούς ολοκλήρωσης των προκαθορισμένων περιόδων δειγματοληψίας, με όσο το δυνατό περισσότερες, από τις θέσεις του υπό σύσταση δικτύου. Αν και δεν θεωρείται υψίστης σημασίας για τα επιστημονικά αποτελέσματα που θα προκύψουν, το κριτήριο αυτό είναι ουσιαστικό για τη σωστή επιμέλεια της έρευνας και σχετίζεται με πρακτικές πτυχές της δειγματοληψίας, που αναπόφευκτα επηρεάζουν την ακεραιότητα της διαδικασίας. Τρεις κλάσεις και συντελεστής βαρύτητας 7 προσδίδονται στη συγκεκριμένη παράμετρο. Η κλάση 5 αντιστοιχεί σε γεωτρήσεις που ικανοποιούν και τις τρεις συνθήκες που συζητήθηκαν, η κλάση 3 αναφέρεται σε γεωτρήσεις που έχουν άδεια δειγματοληψίας και είναι εύκολα προσεγγίσιμες υπό οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες. Η κλάση 1 αναφέρεται σε γεωτρήσεις, όπου εξασφαλίζεται μόνο η άδεια δειγματοληψίας ή η άδεια σε συνδυασμό με την ετήσια πρόσβαση. Είναι η τρίτη και τελευταία παράμετρος, στην οποία έχουν εισαχθεί οι προϋποθέσεις επιλεξιμότητας, που λειτουργούν ως παράγοντας αποκλεισμού. Στις γεωτρήσεις όπου δεν χορηγείται άδεια δειγματοληψίας, αποδίδεται "0" ως παράγοντας επιλεξιμότητας και επομένως δεν εξετάζονται περαιτέρω για την συμπερίληψη τους στο δίκτυο παρακολούθησης, παρά το γεγονός ότι μπορεί να βαθμολογηθούν υψηλά στις υπόλοιπες παραμέτρους.

12. Χρήση γεώτρησης: Η παράμετρος αυτή, αν και είναι σημαντική για την παρούσα έρευνα, ωστόσο δεν αναμένεται να παίξει ουσιαστικό ρόλο στη τελική κατάταξη, καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των γεωτρήσεων της περιοχής είναι αρδευτικής χρήσης. Υπεισέρχεται στον αλγόριθμο, ως παράγοντας διαχωρισμού για τις λίγες περιπτώσεις, στις οποίες η χρήση αλλάζει (και πρέπει να είναι γνωστή, ως ένα επιπλέον στοιχείο κατανόησης και ερμηνείας τυχόν ιδιαίτερων αποτελεσμάτων που θα προκύψουν) και ως εκ τούτου της αποδίδεται ένας χαμηλός συντελεστής συσχέτισης (3), ο οποίος αντικατοπτρίζει αυτό το γεγονός. Η κλάση 5 αντιπροσωπεύει τις γεωτρήσεις παροχής πόσιμου νερού

(κατασκευαστικά αρτιότερες, σαφή γνώση υδροφόρου υδρομάστευσης, ύπαρξη χημικών δεδομένων), η κλάση 4 αναφέρεται σε γεωτρήσεις συνδυαστικής χρήσης, δηλαδή γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται τόσο για άρδευση όσο και για οικιακές ή άλλες χρήσεις. Η κλάση 3 αντιστοιχεί σε γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για άρδευση (υδρομαστεύουν συνήθως το σύνολο των υδροφόρων) και είναι η βασική κατηγορία χρήσης στην περιοχή, η κλάση 2 αποδίδεται στις γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται για την κτηνοτροφία και στην κατηγορία 1 ανήκουν οι γεωτρήσεις βιομηχανικής, άλλης ή άγνωστης χρήσης.

13. Ιδιοκτησιακό καθεστώς γεώτρησης: Το ιδιοκτησιακό καθεστώς μιας γεώτρησης σχετίζεται με διάφορες πτυχές που ενδιαφέρουν τη συγκεκριμένη έρευνα. Πιο συγκεκριμένα: η ευκολία επικοινωνίας και συνεργασίας, η ευκολία προσβασιμότητας, η διαθεσιμότητα εγγράφων, η διαφάνεια των διαδικασιών, το κύρος των δεδομένων κ.α. δίνουν ένα προβάδισμα στις γεωτρήσεις, οι οποίες ανήκουν σε κάποια αρχή έναντι των ιδιωτικών. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε ότι η επιλογή των γεωτρήσεων που ανήκουν στον δημόσιο τομέα, όπου αυτό είναι εφικτό, αυξάνει την αξία και το κύρος της έρευνας. Ένας συντελεστής βαρύτητας 5 αποδίδεται στη συγκεκριμένη παράμετρο με την κλάση 5 να αντιστοιχεί στις δημοτικές γεωτρήσεις. Η κατηγορία 4 αποδίδεται στις γεωτρήσεις που ανήκουν στους Τοπικούς Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων (Τ.Ο.Ε.Β.), η κλάση 3 στις ιδιωτικές γεωτρήσεις, η κλάση 2 σε γεωτρήσεις των ενόπλων δυνάμεων και η κατηγορία 1 σε οποιαδήποτε άλλη ιδιοκτησία που δεν καλύπτεται από τις 4 προηγούμενες τάξεις ή στην περίπτωση που η ιδιοκτησία είναι άγνωστη.

14. Προστασία κεφαλής: Όντας σημαντική για τη συγκεκριμένη έρευνα, στη συγκεκριμένη παράμετρο αποδόθηκε σχετικά υψηλή τιμή συντελεστή βαρύτητας (7). Εδώ εξετάζεται το καθεστώς προστασίας της κεφαλής της γεώτρησης, όπως αυτό συνάγεται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης. Η αξιολόγηση βασίζεται τόσο στη λιθολογική τομή (εφόσον υπάρχει) όσο και στον επιτόπιο έλεγχο κατά την απογραφή. Ένας από τους σκοπούς της έρευνας της ποιότητας των υπόγειων νερών, είναι να προσδιορισθούν, με αντικειμενικό τρόπο, τα πιο ευάλωτα σε ρύπανση τμήματα της περιοχής. Ωστόσο πρέπει να διασφαλιστεί, ότι τα δείγματα που θα συλλεχθούν, αντανakλούν τις συνθήκες των φρέσκων υπόγειων υδάτων και δεν επηρεάζονται από μια τυχαία ρύπανση που μπορεί να οφείλεται στην ελλιπή προστασία της κεφαλής των γεωτρήσεων (π.χ. αερομεταφερόμενα σωματίδια, υπερχείλιση μετά από βροχόπτωση κ.α). Οι κλάσεις 5 και 4 αντιστοιχούν σε υψηλή και μέση κατάσταση προστασίας κεφαλής ενώ οι κλάσεις 3, 2 και 1 αποδίδονται σε αποδεκτές, χαμηλές και ανεπαρκείς συνθήκες προστασίας κεφαλής αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση αυτού του κριτηρίου, και κατά συνέπεια η απόδοση του βαθμού κλάσης, είναι υποκειμενική ως ένα βαθμό παρά το γεγονός ότι ακολουθούνται ορισμένοι κανόνες στην αξιολόγηση. Για να ελαχιστοποιηθεί η υποκειμενικότητα σε αυτήν την αξιολόγηση, μετά από τη μελέτη των λιθολογικών τομών και του επιτόπου ελέγχου, μια δεύτερη αξιολόγηση της προστασίας της κεφαλής, βάσει φωτογραφιών, πραγματοποιήθηκε από ανεξάρτητο μέλος της

ερευνητικής ομάδας του ΙΕΥΠ. Σε περίπτωση απόκλισης μεγαλύτερης από 1 κλάση από την αρχική αξιολόγηση, ο παράγοντας αυτός επανεξετάστηκε. Παρόλο που οι σχετικές πληροφορίες συλλέχθηκαν με ιδιαίτερη προσοχή, ωστόσο, πολλές από τις γεωτρήσεις είναι πολύ παλιάς κατασκευής και η αξιολόγηση της πλήρους ακεραιότητας κάθε γεώτρησης κάποιες φορές δεν ήταν εφικτή. Επίσης, παρόλο που μια γεώτρηση μπορεί να είναι κατάλληλη ως προς το σκοπό της παρούσας έρευνας, αυτό δεν αποτελεί εγγύηση ότι άλλες γεωτρήσεις πλησίον, δεν αποτελούν δυνητική πηγή τυχαίας ρύπανσης, επηρεάζοντας έτσι τα ευρήματα και στην επιλεγμένη γεώτρηση.

8.2.1.3 Εφαρμογή αλγορίθμου

Από το σύνολο των 185 γεωτρήσεων, οι οποίες απογράφησαν, οι 15 δεν τηρούσαν τα κριτήρια αξιολόγησης, σε μία τουλάχιστον από τις τρεις παραμέτρους, για τις οποίες υπήρχε ο παράγοντας αποκλεισμού. Έτσι, για τις γεωτρήσεις αυτές με τιμή επιλεξιμότητας «0», σύμφωνα και με τη Σχέση 8.1, δεν έγινε περαιτέρω αξιολόγηση. Δεν συμμετείχαν δηλαδή στον αλγόριθμο παρά το γεγονός ότι θα μπορούσαν με βάση τις υπόλοιπες παραμέτρους, να σημειώσουν υψηλή βαθμολογία. Οι εναπομείνουσες 170 γεωτρήσεις είναι αυτές που εισήχθησαν στον αλγόριθμο, για την σύσταση του δικτύου παρακολούθησης, τα αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πριν την ανάλυση των αποτελεσμάτων πρέπει να αναφερθούν οι πρόσθετοι κανόνες χωρικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων που υιοθετήθηκαν προκειμένου να επιλυθούν ορισμένα τεχνικά θέματα του υπό-σύσταση δικτύου και να εξασφαλιστεί η ομοιογενής κατά το δυνατόν χωρική κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος:

1) Προκειμένου να καλυφθεί η συνθήκη, του να υπάρχουν και κάποιες θέσεις δειγματοληψίας, περιμετρικά της περιοχής έρευνας (ουσιαστικά δυτικά και ανατολικά της περιοχής, όπου υπήρχαν απογεγραμμένες γεωτρήσεις), ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε ξεχωριστά για τις γεωτρήσεις εντός των ορίων της υπολεκάνης (146 από τις 170), ξεχωριστά για τις γεωτρήσεις δυτικά της περιοχής (15 από τις 170) και ξεχωριστά για τις υπόλοιπες (9 από τις 170), ανατολικά των ορίων της περιοχής έρευνας.

2) Για να υπάρχει ικανοποιητική χωρική κάλυψη της έκτασης της περιοχής, θεωρήθηκε ως ελάχιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ δύο επιλεγμένων γεωτρήσεων, το 1km. Δηλαδή, εφόσον υπήρχαν δύο (ή και περισσότερες) γεωτρήσεις, οι οποίες με βάση τη συνολική αξιολόγηση του αλγορίθμου, ήταν στις επιλέξιμες και η μεταξύ τους απόσταση ήταν μικρότερη από 1km, μόνο αυτή με τη μεγαλύτερη βαθμολογία επιλεγόταν για ένταξη στο δίκτυο ενώ οι υπόλοιπες τίθενται αυτομάτως εκτός αυτού. Σε περίπτωση ισοβαθμίας, προκρίνεται η γεώτρηση, βάσει της οποίας υπάρχει καλύτερη χωρική κατανομή σε σχέση με τις όμορες επιλεγμένες γεωτρήσεις.

3) Ο συνολικός αριθμός θέσεων του δικτύου παρακολούθησης, καθορίστηκε τοποθετώντας ολοένα και αυξανόμενο αριθμό επιλεγμένων γεωτρήσεων στο χάρτη,

ώσπου να προκύψει ικανοποιητική χωρική κάλυψη της περιοχής. Σε αυτό λήφθηκε υπόψη και το γεγονός ότι σε κάποια συγκεκριμένα τμήματα της περιοχής, ο αριθμός των αξιόπιστων γεωτρήσεων ήταν περιορισμένος. Για τα τμήματα εκτός της υπολεκάνης, εξ' αρχής θεωρήθηκε ότι αρκούν 2 θέσεις για κάθε περιοχή.

Η αναλυτική αξιολόγηση, για το σύνολο των 170 γεωτρήσεων, παρουσιάζεται στον Πίνακα Π1.16 του Παραρτήματος 1 ενώ στον Πίνακα 8.3 φαίνονται οι βαθμολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή της ανεπτυγμένης μεθοδολογίας και τη χρησιμοποίηση της Σχέσης 8.1, για τις θέσεις εντός της υπολεκάνης. Οι βαθμολογίες παρουσιάζονται με φθίνουσα ταξινόμηση και ως εκ τούτου πρώτες είναι αυτές που τελικά επιλέχθηκαν και αποτέλεσαν το δίκτυο παρακολούθησης εντός της περιοχής (γαλάζια απόχρωση). Στη σειρά κατάταξης, ενδιάμεσα από τις επιλεγμένες γεωτρήσεις είναι αυτές, που ενώ συγκέντρωσαν υψηλή βαθμολογία, ωστόσο απορρίφθηκαν λόγω μικρότερης απόστασης από 1km, ως προς μία ανώτερη βαθμολογικά επιλεγμένη γεώτρηση (γκρι απόχρωση). Η αιτιολόγηση της απόρριψης για κάθε μία από τις γεωτρήσεις αυτές, ξεχωριστά, δίνεται στον Πίνακα 8.4.

Πίνακας 8.3. Υπολογιζόμενη βαθμολογία για τις υπό αξιολόγηση γεωτρήσεις εντός της περιοχής έρευνας.

Κωδικός	R	Κωδικός	R	Κωδικός	R	Κωδικός	R
75Λ	4.27	Λ51	3.12	LB242	2.73	PZT3α	2.37
SR111	4.27	LB279	3.10	LB78	2.73	ΕΛ23	2.37
AD2	4.14	LB80	3.10	LB89	2.73	ΕΛ57	2.37
SR110	4.12	LB151	3.09	LB99a	2.73	ΕΛ68	2.37
LB113	3.99	LB250	3.06	Υ150	2.72	Λ33	2.37
SR39	3.89	Λ53	3.06	Υ152	2.72	Λ32	2.35
LB131	3.70	LB136	3.03	Υ175	2.72	LB256	2.31
SR114	3.63	LB138	3.03	KISIKI	2.72	Λ58	2.31
Λ41	3.50	LB251	3.03	LB103	2.69	M237	2.29
LB257	3.47	LB128	3.02	LB266	2.68	ΕΛ20	2.26
LB260	3.46	ΕΛ55	3.01	Λ54	2.63	GC9?	2.26
LB140	3.45	Λ43	3.01	ΑΣΜΑΚΙ	2.62	FAKAS-3	2.24
LB258	3.43	FAKAS-1	2.99	AD6	2.61	ΕΛ38	2.23
LB115	3.39	KARAIKOS-1	2.99	LB255	2.57	Λ55	2.23
LB148	3.39	LB109	2.99	LB263	2.57	LB278	2.20
LB261	3.39	ΜΠΑΚΡΑΤΣΑΣ	2.98	LB265	2.57	Λ56	2.20
LB268	3.39	ΕΛ50	2.96	LB267	2.57	KARAIKOS-3	2.18
LB274	3.37	LB106	2.94	LB269	2.57	FAKAS-2	2.16
LB134	3.35	SR118	2.91	ΕΛ45	2.57	LB102	2.16
Γ3	3.34	LB282	2.88	Λ57	2.57	LB104	2.16
LB90	3.33	LB285	2.88	Λ59	2.57	LB108	2.16
LB84	3.30	LB77	2.88	LB114	2.52	LB284	2.16
LB116	3.29	LB96A	2.88	ΕΛ43	2.52	LB85	2.16
LB139	3.29	LB97	2.88	ΕΛ52	2.52	LB86	2.16
LB81	3.24	Λ80	2.88	Λ52	2.52	LB92	2.16
LB91	3.24	LB135	2.88	LB83	2.50	LB93	2.16
LB95	3.24	LB137	2.88	LB127	2.47	ΕΛ22	2.16
LB98	3.24	LB276	2.88	LB130	2.47	ΕΛ25	2.16

Κωδικός	R	Κωδικός	R	Κωδικός	R	Κωδικός	R
Λ76	3.24	LB273	2.86	LB149	2.47	ΕΛ59	2.16
LB105	3.20	LB87	2.86	LB262	2.47	Λ40Α	2.16
Λ42	3.20	LB259	2.85	ΑΑ	2.43	LB126Α	2.09
LB129	3.19	SR119	2.85	ΚΑΡΑΙΣΚΟΣ-2	2.39	ΕΛ21	2.09
SR01	3.19	LB76	2.82	Γ1	2.38	Λ40	2.09
LB152	3.15	LB99	2.82	LB100	2.37	Λ67	2.09
AD3	3.14	Λ31	2.81	LB101	2.37	ΑΛΑΤΑΣ	1.81
LB153	3.14	AD1	2.79	LB291	2.37		
ΕΛ24	3.13	Γ4	2.79	LB94	2.37		

Πίνακας 8.4. Γεωτρήσεις που απορρίφθηκαν παρά την σχετικά υψηλή τους αξιολόγηση.

Κωδικός	Αιτία απόρριψης
LB258	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB257
LB261	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB260
LB274	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά 75Λ
LB116	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την ίσης βαθμολογίας LB139, η οποία προκρίνεται λόγω καλύτερης χωρικής κατανομής.
LB91	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB90
LB105	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB257
Λ42	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά Λ41
LB153	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB152
ΕΛ24	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB129
Λ51	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB152
LB80	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά Λ76
LB151	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB152
LB136	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά Λ53
LB138	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά Λ53
LB109	Βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση του 1km από την υψηλότερη βαθμολογικά LB95

Στη συνέχεια με βάση την αναλυτική αξιολόγηση του Πίνακα Π2.2 του Παραρτήματος 1, προέκυψε η σειρά κατάταξης, των θέσεων των γεωτρήσεων, οι οποίες βρίσκονται εκτός της υπολεκάνης Τυρνάβου. Η αξιολόγηση έγινε ξεχωριστά για τις δυτικές (περιοχή Δαμασίου) και ανατολικές (περιοχή Ελευθεροχωρίου) θέσεις γεωτρήσεων (Πίνακας 8.5) και στο δίκτυο εντάχθηκαν οι δύο πρώτες από κάθε κατάταξη.

Πίνακας 8.5. Υπολογιζόμενη βαθμολογία για τις υπό αξιολόγηση γεωτρήσεις εκτός της περιοχής έρευνας.

ΔΥΤΙΚΑ (ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΑΜΑΣΙΟΥ)		ΑΝΑΤΟΛΙΚΑ (ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΜΟΡΦΟΧΩΡΙΟΥ)	
Κωδικός	R	Κωδικός	R
SR112	3.26	LB214	3.22
LB110	3.14	LB271	3.22
LB302	3.09	ΕΛ48	3.16
SR113	3.07	LB209	3.12
LB300	3.03	LB237	3.03
LB299	3.03	LB213	3.01

ΔΥΤΙΚΑ (ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΑΜΑΣΙΟΥ)	
Κωδικός	R
LB313	3.01
LB312	2.88
LB301	2.63
LB315	2.41
LB316	2.41
LB317	2.41
SR67	2.41
Π14Λ	2.37
PZ52	2.32

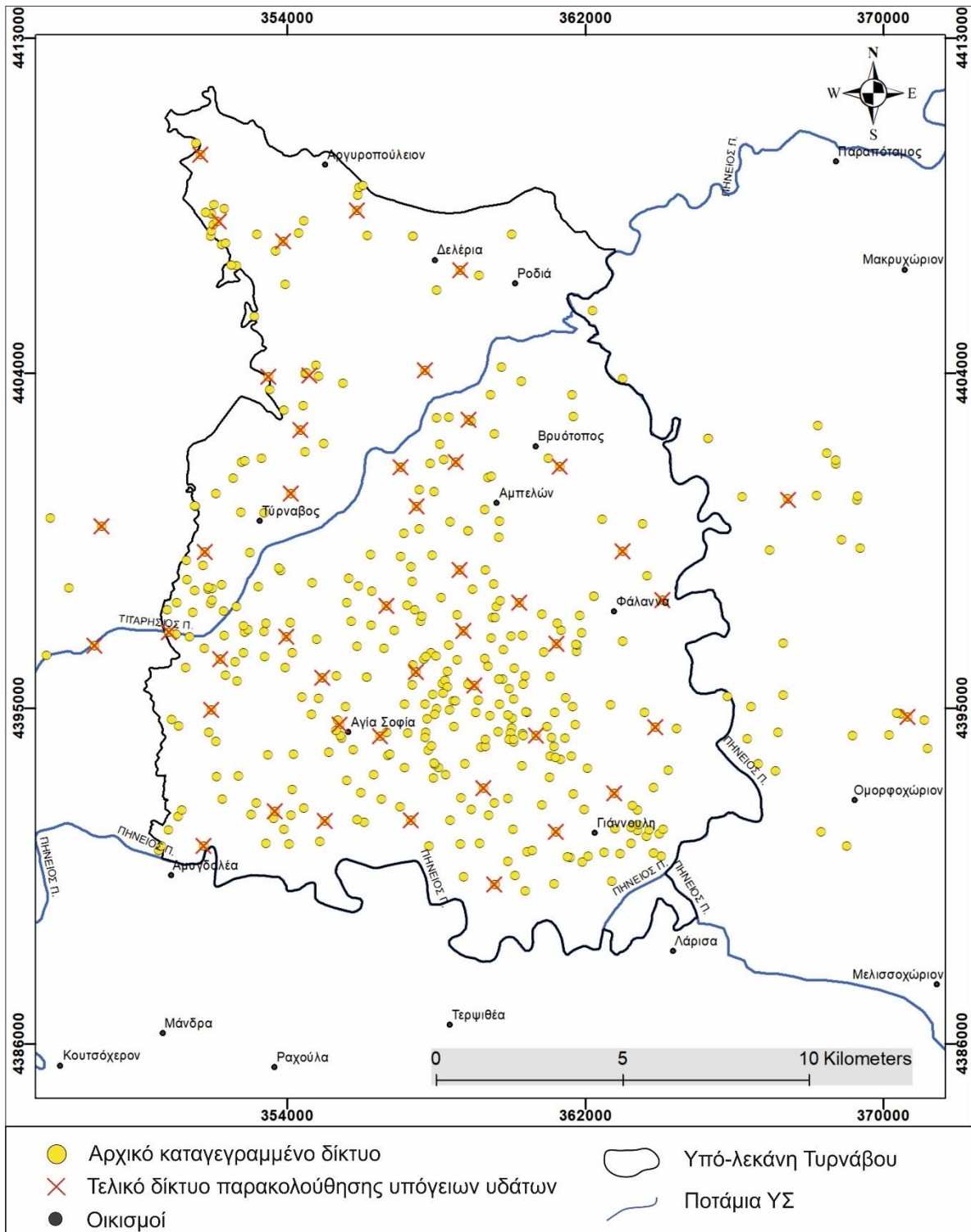
ΑΝΑΤΟΛΙΚΑ (ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΜΟΡΦΟΧΩΡΙΟΥ)	
Κωδικός	R
ΕΛ47	2.94
ΕΛ19	2.38
LB118	2.10

Εκτός των παραπάνω θέσεων που προέκυψαν από την αξιολόγηση, με βάση τον αλγόριθμο της Σχέσης 8.1, στο δίκτυο παρακολούθησης εντάχθηκαν οι δύο θέσεις των καρστικών πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας και έξι επιλεγμένες, κατόπιν επιτόπιας επίσκεψης, θέσεις επιφανειακών υδάτων από τους ποταμούς Πηνειό (4) και Τιταρήσιο (2).

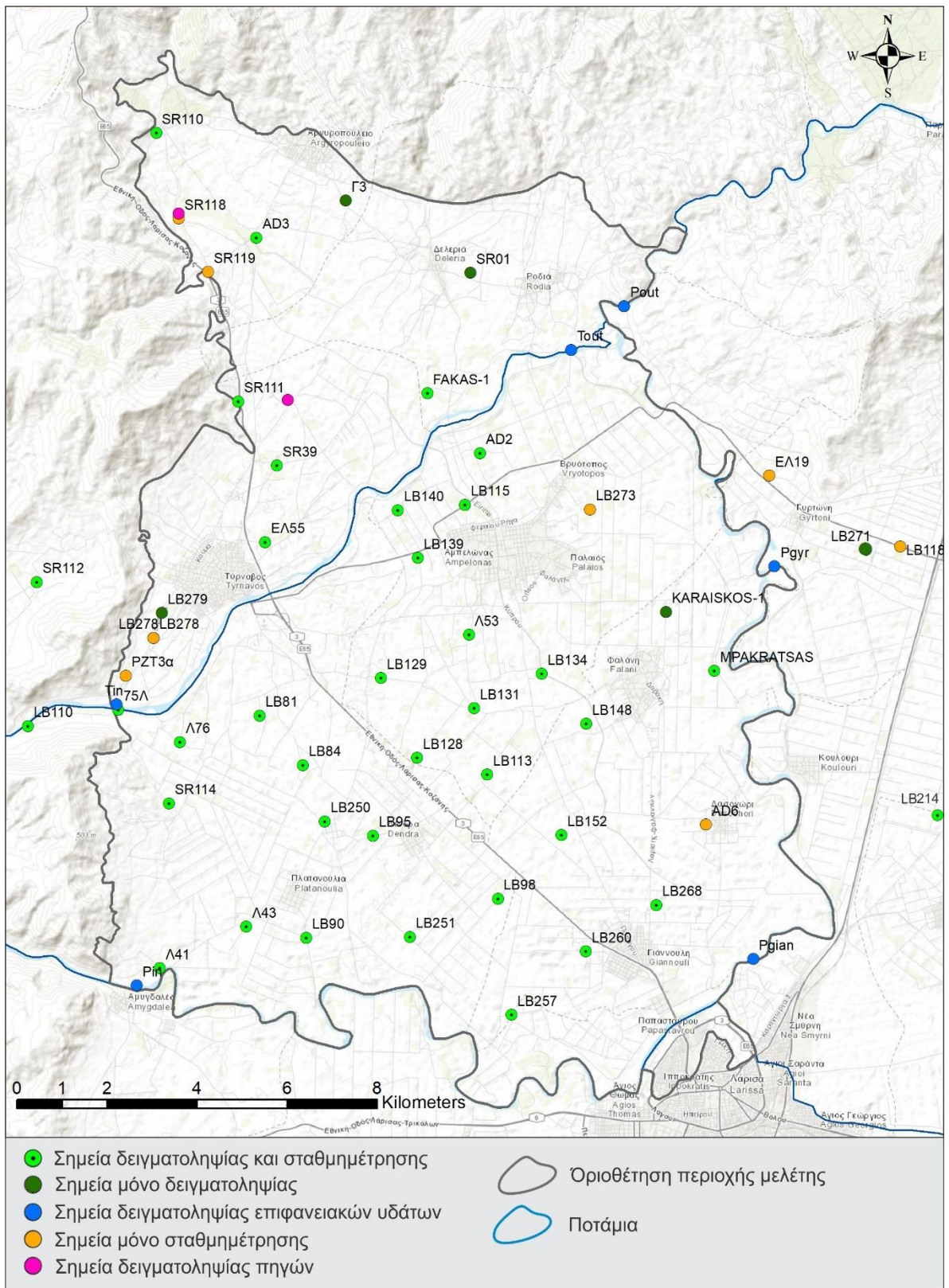
Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω, το συνολικό δίκτυο παρακολούθησης αποτελούνταν από:

- 38 θέσεις υπόγειων υδάτων, οι οποίες προκρίθηκαν με βάση την αξιολόγηση του Πίνακα Π2.2 του Παραρτήματος και τη σειρά κατάταξης του Πίνακα 8.3,
- 4 θέσεις υπόγειων υδάτων, οι οποίες προκρίθηκαν με βάση την αξιολόγηση του Πίνακα Π2.2 του Παραρτήματος και τη σειρά κατάταξης του Πίνακα 8.5,
- 2 θέσεις των πηγών (υπόγεια ύδατα),
- 4 θέσεις επιφανειακών υδάτων από τον ποταμό Πηνειό. Μία κατά την είσοδό του στην υπολεκάνη (θέση Αμυγδαλέα), μία κατά την έξοδό του από την υπολεκάνη (θέση Ροδιά) και δύο ενδιάμεσες (θέση Γιάννουλη και θέση Γυρτώνη).
- 2 θέσεις επιφανειακών υδάτων από τον ποταμό Τιταρήσιο. Μία στην είσοδο (θέση Τύρναβος) και μία στην έξοδο (θέση Ροδιά), πριν τη συμβολή του με τον Πηνειό.

Στην Εικόνα 8.1 φαίνεται ο χάρτης με το αρχικό καταγεγραμμένο δίκτυο, που δημιουργήθηκε από τη συγκέντρωση πληροφοριών, πριν από την απογραφή, καθώς και το τελικό δίκτυο παρακολούθησης, το οποίο συστάθηκε ύστερα από την αξιολόγηση με βάση τον αλγόριθμο πολυκριτηριακής ανάλυσης. Συμπεριλαμβανομένων και όσων αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, σχετικά με τις θέσεις μέτρησης της υπόγειας στάθμης, στην Εικόνα 8.2 απεικονίζεται το συνολικό δίκτυο παρακολούθησης (στάθμεων-δειγματοληψιών), το οποίο σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής.



Εικόνα 8.1. Αρχικό καταγεγραμμένο δίκτυο γεωτρήσεων και τελικό δίκτυο παρακολούθησης υπόγειων υδάτων, ύστερα από την εφαρμογή του αλγορίθμου πολυκριτηριακής ανάλυσης.



Εικόνα 8.2. Συνολικό δίκτυο παρακολούθησης υπολεκάνης Τυρνάβου.

8.2.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Αμέσως μετά τη σύσταση του δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας των υδατικών πόρων καταρτίστηκαν οι χρονικές περίοδοι δειγματοληψίας. Το σκεπτικό της απόφασης για την επιλογή των περιόδων αυτών, ήταν να διαφοροποιούνται από άποψη χαρακτηριστικών, έτσι ώστε να ελεγχθεί μια αντίστοιχη πιθανή διαφοροποίηση και στην ποιότητα των υδάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά σχετίζονται με την άρδευση, καθώς αυτή είναι η κύρια χρήση των υδάτων για την περιοχή έρευνας, όπως θα ειπωθεί αναλυτικά στη συνέχεια, αλλά και με τις αναμενόμενες μεταβολές λόγω διαφοροποίησης των συνθηκών τροφοδοσίας του συστήματος. Ως εκ τούτου επιλέχθηκαν οι δύο χαρακτηριστικές, από άποψη αρδεύσεων, περίοδοι πριν και μετά το τέλος της αρδευτικής περιόδου. Συνολικά τέσσερις περίοδοι προγραμματίστηκαν και πραγματοποιήθηκαν σε χρονικό διάστημα δύο ετών. Ο πρώτος χρόνος των μετρήσεων αποτέλεσε τις δειγματοληψίες (μετρήσεις) αναφοράς, ενώ οι μετρήσεις του δεύτερου χρόνου αποτέλεσαν ουσιαστικά τις μετρήσεις επιβεβαίωσης των δεδομένων αναφοράς (data validation period). Οι περίοδοι δειγματοληψίας μετά το τέλος της αρδευτικής περιόδου (ξηρές περίοδοι) έλαβαν χώρα τον Σεπτέμβριο του 2016 και τον Σεπτέμβριο του 2017, ενώ οι περίοδοι δειγματοληψίας πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου (υγρές περίοδοι) πραγματοποιήθηκαν τους μήνες Απρίλιο-Μάιο του 2017 και του 2018.

Στη συνέχεια αναφέρονται τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια των δύο αυτών χρόνων συλλογής δειγμάτων νερού. Όπως ειπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο συντονισμός όλων των εμπλεκόμενων φορέων και ιδιωτών, με σκοπό τη διάθεση της γεώτρησης προς δειγματοληψία, ήταν ίσως το δυσκολότερο κομμάτι της όλης διαδικασίας. Οι διαφορετικές καλλιέργειες ανά Τ.Ο.Ε.Β. αλλά και ανά ιδιώτη, με τις διαφορετικές αρδευτικές ανάγκες, διαφοροποιούσε χρονικά την έναρξη ή/και τη λήξη της άρδευσης για κάθε έναν από αυτούς. Το γεγονός αυτό δεν δημιουργούσε μόνο θεωρητικό πρόβλημα (έναρξη-λήξη περιόδου) αλλά και πρακτικό, καθώς σε πολλές περιπτώσεις οι γεωτρήσεις σφραγίζονταν, με το τέλος της περιόδου άρδευσης, προκειμένου να αντιμετωπιστούν φαινόμενα κλοπών. Ιδιαίτερο πρόβλημα επίσης, αποτέλεσε το γεγονός της ηλεκτροδότησης των γεωτρήσεων. Παρόλο που κατά τη διάρκεια της απογραφής, σημειώθηκαν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία των γεωτρήσεων (ή μη) καθώς επίσης, η συγκεκριμένη πληροφορία αποτέλεσε παράγοντα αποκλεισμού στον αλγόριθμο επιλογής, ωστόσο τα διάφορα οικονομικά προβλήματα των παραγωγών, ως συνέπεια της οικονομικής κρίσης των τελευταίων ετών, είχαν ως αποτέλεσμα τις αλληπάλληλες διακοπές στην ηλεκτροδότηση αρκετών γεωτρήσεων. Στις περισσότερες των περιπτώσεων τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν με εκ νέου επίσκεψη στην περιοχή, εφόσον είχε αποκατασταθεί η διακοπή και σε κάποιες λίγες περιπτώσεις με δειγματοληψία από κάποια άλλη κοντινή γεώτρηση που είχε ρεύμα και ήταν στη λίστα της απογραφής (με χαμηλότερη αξιολόγηση). Ειδικά στην τελευταία περίοδο δειγματοληψίας, υπήρχε παρατεταμένη διακοπή ρεύματος σε μεγάλα τμήματα της περιοχής και ως εκ τούτου υπήρχαν αρκετές περιπτώσεις αδυναμίας λήψης δειγμάτων.

Επίσης, κατά την πρώτη περίοδο δειγματοληψίας, λόγω της μεγάλης πίεσης χρόνου, έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η αξιολόγηση των γεωτρήσεων και να προκύψει το δίκτυο παρακολούθησης, κάποιες από τις γεωτρήσεις είχαν σφραγισθεί, καθώς είχε τελειώσει η αρδευτική περίοδος, και ως εκ τούτου δεν λήφθηκε δείγμα για την περίοδο αυτή. Τέλος, παρά τις κάποιες, αναμενόμενες, απώλειες δειγμάτων, η συνολική εικόνα των δειγματοληψιών, με βάση το δίκτυο παρακολούθησης που συστάθηκε κρίνεται άκρως ικανοποιητική.

Η πρώτη περίοδος δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα 14-29 Σεπτεμβρίου του έτους 2016, όπου ελήφθησαν συνολικά 42 δείγματα νερού. Ήταν η πρώτη αναγνωριστική περίοδος δειγματοληψιών, αμέσως μετά το τέλος της επεξεργασίας των δεδομένων της απογραφής και της σύστασης των δικτύων παρακολούθησης (ποιοτικών-ποσοτικών). Σημειώνεται, ότι κατά την περίοδο αυτή πάρθηκε και ένα δείγμα αντικατάστασης επιλεγμένης γεώτρησης από διπλανή γεώτρηση χαμηλότερης αξιολόγησης (SR67 αντί της SR112).

Ακολούθησε η περίοδος του Απριλίου του έτους 2017 (χρονικό διάστημα από 5 Απριλίου έως 10 Μαΐου του 2017) με συνολικά 50 δείγματα. Ήταν η πιο αποδοτική περίοδος, από άποψη ποσότητας δειγμάτων, στην οποία πάρθηκε και ένα επιπλέον δείγμα στην ανατολική επέκταση της υπολεκάνης (LB237).

Η τρίτη κατά σειρά περίοδος δειγματοληψίας έλαβε χώρα κατά το χρονικό διάστημα 29 Αυγούστου-13 Σεπτεμβρίου του έτους 2017, αμέσως μετά την ολοκλήρωση της αρδευτικής περιόδου. Συνολικά 45 δείγματα συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της, συμπεριλαμβανομένων και δύο νέων δειγμάτων, ένα προς αντικατάσταση επιλεγμένης γεώτρησης από άλλη υπάρχουσα στη λίστα αξιολόγησης (LB213 αντί της LB214) και ένα επιπλέον στην ανατολική επέκταση της υπολεκάνης (EL47).

Η τελευταία περίοδος, αφορούσε την υγρή περίοδο του έτους 2018 (2 Μαΐου έως 6 Ιουνίου 2018), η οποία πήγε πίσω χρονικά, λόγω των έντονων προβλημάτων στην ηλεκτροδότηση που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρουσίασε χρονική καθυστέρηση. Για τον ίδιο λόγο, υπήρξε αδυναμία δειγματοληψίας σε ορισμένες θέσεις, κυρίως στο ΝΑ τμήμα της περιοχής έρευνας, και ως εκ τούτου ελήφθησαν συνολικά 42 δείγματα. Παράλληλα κατά τη διάρκεια αυτής της δειγματοληψίας, συλλέχθηκαν και ξεχωριστά δείγματα από προκαθορισμένες θέσεις του δικτύου, προς ανάλυση των σταθερών ισοτόπων ^{18}O και ^2H . Περισσότερα για τα συγκεκριμένα δείγματα θα αναφερθούν στο Κεφάλαιο της Ισοτοπικής Υδρογεωλογίας. Η πλειοψηφία των δειγμάτων, όλων των περιόδων, αφορούσε εξοπλισμένες υδρογεωτρήσεις, υπήρχαν όμως και δείγματα από παλιές ερευνητικές γεωτρήσεις, όπου αυτά ελήφθησαν με τη χρήση φορητής αντλίας, καθώς και δείγματα πηγών και επιφανειακών υδάτων από τους ποταμούς Πηνειό και Τιταρήσιο. Ο ακριβής διαχωρισμός των δειγμάτων ανά περίοδο φαίνεται στον Πίνακα 8.6.

Πίνακας 8.6. Διαχωρισμός δειγμάτων ανά περίοδο δειγματοληψίας.

Περίοδος δειγματοληψίας	Εξοπλισμένες υδρογεωτρήσεις	Μη εξοπλισμένες γεωτρήσεις	Πηγές	Επιφανειακά ύδατα	Σύνολο
Σεπτέμβριος 2016	34	2	1	5	42
Απρίλιος 2017	41	2	1	6	50
Σεπτέμβριος 2017	38	2	1	4	45
Απρίλιος 2018	32	2	2	6	42

Σημειώνεται, ότι κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου του έτους 2018 πραγματοποιήθηκε εκ νέου δειγματοληψία, αποκλειστικά για τη συλλογή δειγμάτων προς ανάλυση των σταθερών ισotόπων ^{18}O και ^2H , για τα οποία θα γίνει αναφορά στο 11^ο Κεφάλαιο.

8.3 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα επιμολύνσεων των δειγμάτων κατά την λήψη τους, εφαρμόστηκαν συστηματικά βασικοί κανόνες. Η δειγματοληψία έλαβε χώρα βάσει αυστηρού πρωτοκόλλου, το οποίο είχε συνταχθεί σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων του ΕΛ.Γ.Ο. ΔΗΜΗΤΡΑ σε προηγούμενες μελέτες και προσαρμόστηκε κατάλληλα για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία του πρωτοκόλλου αυτού, ενώ ολόκληρο επισυνάπτεται στο Παράρτημα 1.

Από τα βασικά στοιχεία μιας επιτυχημένης δειγματοληψίας και της αποφυγής απρόοπτων καταστάσεων, αποτελεί η υπό τη μορφή καταλόγου καταγραφή όλων των απαραίτητων υλικών που απαιτούνται για την εκτέλεσή της. Την προηγούμενη ημέρα της δειγματοληψίας συγκεντρωνόταν όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός, σε συγκεκριμένο χώρο και γινόταν σχολαστικός έλεγχος, με βάση τον προαναφερόμενο κατάλογο.

Απαραίτητο έγγραφο για μια δειγματοληψία αποτελεί το απογραφικό δελτίο, έτσι ώστε να υπάρχουν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες και ιδιαιτερότητες για κάθε θέση δειγματοληψίας ξεχωριστά. Στη συγκεκριμένη έρευνα τα δείγματα, που αφορούσαν τις υδροχημικές αναλύσεις και προορίζονταν για το εργαστήριο φυσικοχημικών δοκιμών του Ι.Ε.Υ.Π., συλλέγονταν σε πλαστικές φιάλες πολυαιθυλενίου του 1 lt με διπλό πώμα, για την αποφυγή διαρροών. Επίσης, για την αποφυγή επιμολύνσεων, αποφασίστηκε η διαδικασία δειγματοληψίας να μην περιλαμβάνει διήθηση και οξύνιση στο πεδίο για την ανάλυση των βαρέων μετάλλων, κάτι που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο.

Η διαδικασία της πλήρωσης των πλαστικών φιαλών, γινόταν πάντα με τη χρήση γαντιών μιας χρήσης και τα οποία αλλάζονταν όσες φορές κρινόταν σκόπιμο κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη διαδικασία της δειγματοληψίας, καθώς και τον πλήρη εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται

στο Παράρτημα 1. Μετά τη λήψη κάθε δείγματος, η πλαστική φιάλη αποθηκευόταν προσωρινά σε ψυχόμενο, θερμικά μονωμένο δοχείο, αφού πρώτα είχε επικολληθεί πάνω σε αυτήν, προ-τυπωμένη ετικέτα με τα απαραίτητα στοιχεία του δείγματος (Εικόνα Ε1.2., Παράρτημα 1). Κάθε δείγμα συνοδευόταν από την αντίστοιχη Φόρμα Συλλογής (Εικόνα Ε1.3, Παράρτημα 1), πάνω στην οποία συμπληρώνονταν βασικά στοιχεία που αφορούσαν τη δειγματοληψία και το συγκεκριμένο δείγμα καθώς και τις μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων, που λάμβαναν χώρα κατά τη διάρκεια αυτής.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός, ότι τα αποτελέσματα των εργαστηριακών προσδιορισμών είναι τόσο πιο αντιπροσωπευτικά, όσο μικρότερο είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της δειγματοληψίας και του προσδιορισμού, αλλά και της «υποχρέωσης» για όσο πιο άμεση οξύνιση μέρους του δείγματος, τα δοχεία με τα συμπεριλαμβανόμενα δείγματα αποστέλλονταν αυθημερόν στο διαπιστευμένο εργαστήριο φυσικοχημικών δοκιμών του Ι.Ε.Υ.Π. προς συντήρηση και ανάλυση. Κάθε ένα από τα δοχεία αυτά συνοδευόταν με το αντίστοιχο δελτίο αποστολής/παραλαβής δειγμάτων (Εικόνα Ε1.4., Παράρτημα 1), πάνω στο οποίο αναφέρονταν τα στοιχεία της αποστολής (αριθμός και όγκος δειγμάτων, ημερομηνία δειγματοληψίας και αποστολής, τρόπος αποστολής). Το έντυπο αυτό συμπληρωνόταν κατά το ήμισυ από τον αποστολέα και το υπόλοιπο από τον παραλήπτη, ως ένα στοιχείο παρακολούθησης της διαδικασίας παραλαβής των δειγμάτων.

8.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών, που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, πραγματοποιήθηκαν και επιτόπου μετρήσεις βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων. Οι μετρήσεις αυτές, για τις οποίες χρησιμοποιήθηκε το πολυπαραμετρικό όργανο ProDSS της εταιρίας YSI, ήταν οι ακόλουθες:

- i) μετρήσεις οξύτητας (pH),
- ii) μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), σε $\mu\text{S}/\text{cm}$,
- iii) μετρήσεις θερμοκρασίας νερού (T_w), σε $^{\circ}\text{C}$,
- iv) μετρήσεις διαλυμένου οξυγόνου (DO) με οπτικό αισθητήρα, σε mg/L ,
- v) μετρήσεις δυναμικού οξειδοαναγωγής (ORP), σε mV.

Για κάθε δείγμα νερού συμπληρωνόταν επιτόπου η φόρμα συλλογής δείγματος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πάνω στην οποία αναγράφονται (α) τα στοιχεία του δειγματολήπτη, (β) η ώρα και η ημερομηνία της δειγματοληψίας, (γ) τα στοιχεία της θέσης λήψης και του δείγματος, (δ) οι μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων, (ε) οι απαραίτητοι έλεγχοι που έγιναν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας και (στ) τυχόν παρατηρήσεις και σημειώσεις που αφορούσαν τη θέση δειγματοληψίας ή την διαδικασία αυτής.

Σημειώνεται, ότι η πολύ καλή ποιότητα των επιστημονικών οργάνων μέτρησης των φυσικοχημικών παραμέτρων στο πεδίο, αλλά και η τακτική συντήρησή τους, αποτελούν βασικό παράγοντα παραγωγής αξιόπιστων μετρήσεων. Αυτό αποτυπώνεται, όπως θα ειπωθεί στη συνέχεια, στην πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των τιμών πεδίου και εργαστηριακών τιμών στις περιπτώσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και της ενεργού οξύτητας (pH).

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά για κάθε μία από τις παραπάνω φυσικοχημικές παραμέτρους και παρουσιάζεται η χωρική τους κατανομή για κάθε περίοδο δειγματοληψίας.

8.5 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, της συντήρησης και της αποστολής ελήφθησαν όλα τα απαραίτητα μέτρα έτσι ώστε να αποφευχθούν οι επιμολύνσεις και αλλοιώσεις των δειγμάτων με απώτερο σκοπό της εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Εφόσον έχει ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα επιμόλυνσης/αλλοίωσης στο πεδίο απομένει να γίνει το ίδιο τόσο κατά την παραλαβή και παραμονή του δείγματος στο εργαστήριο όσο και κατά τη διάρκεια των αναλύσεων. Για τον λόγο αυτό το διαπιστευμένο εργαστήριο φυσικοχημικών δοκιμών του Ι.Ε.Υ.Π. ακολουθεί μια σειρά διαδικασιών οι οποίες αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

(α) παραλαβή του δείγματος (ή των δειγμάτων) από εξουσιοδοτημένο άτομο του εργαστηρίου και συμπλήρωση του δελτίου αποστολής/παραλαβής που το συνοδεύει,

(β) απόδοση μονοσήμαντης ταυτότητας στο κάθε δείγμα με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ο ανώνυμος χειρισμός του και να αποκλείονται φαινόμενα ακούσιας προκατάληψης στους εργαστηριακούς προσδιορισμούς,

(γ) συμπλήρωση του *Δελτίου Παραλαβής Δειγμάτων Νερού (E05-01-01-W)*, του εργαστηρίου, το οποίο περιέχει όλα τις απαραίτητες πληροφορίες για το δείγμα και τυχόν αποκλίσεις από τις κανονικές συνθήκες που απαιτούν οι μέθοδοι δοκιμών,

(δ) διήθηση και οξίνιση για την χημική συντήρηση του δείγματος,

(ε) αποθήκευση του δείγματος από τον Τεχνικό Υπεύθυνο του εργαστηρίου σε κατάλληλο χώρο και συνθήκες, έτσι ώστε να αποφεύγονται αλλοιώσεις κατά τη διάρκεια φύλαξής του και

(στ) διατήρηση αντιδείγματος με τον ίδιο κωδικό το οποίο φυλάσσεται σε ανάλογες συνθήκες για χρονικό διάστημα τουλάχιστον ενός μήνα από το πέρας των προσδιορισμών και την αποστολή των αποτελεσμάτων στον παραλήπτη.

8.5.1 ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ

Οι εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής αφορούσαν τις εξής παραμέτρους:

Φυσικοχημικές παράμετροι:

οξύτητα (pH), ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), ολική σκληρότητα (mg CaCO₃/L), συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS)

Υπολογιστικές παράμετροι:

συντελεστής προσρόφησης Νατρίου (SAR)

Κύρια ιόντα:

Ασβέστιο (Ca²⁺), Μαγνήσιο (Mg²⁺), Νάτριο (Na⁺), Κάλιο (K⁺), Αμμωνιακά (NH₄⁺), Ώξινα ανθρακικά (HCO₃⁻), Ανθρακικά (CO₃⁻), Θειικά (SO₄⁻²), Χλώριο (Cl⁻), Νιτρικά (NO₃⁻), Νιτρώδη (NO₂⁻),

Ιχνοστοιχεία*:

Βόριο (B), Χαλκός (Cu), Μαγγάνιο (Mn), Κάδμιο (Cd), Μόλυβδος (Pb), Σίδηρος (Fe), Αρσενικό (As*), Ψευδάργυρος (Zn*)

* Μετρούνται οι ολικές διαλυμένες συγκεντρώσεις

** Μόνο κατά την 4^η περίοδο δειγματοληψίας

Σταθερά ισότοπα:

Οξυγόνο (¹⁸O) και Δευτέριο (²H)

Οι αναλύσεις των ισωτόπων πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών του Lubeck της Γερμανίας, ενώ όλες οι υπόλοιπες στο διαπιστευμένο εργαστήριο φυσικοχημικών δοκιμών του Ι.Ε.Υ.Π, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στον Πίνακα 8.7 παρουσιάζονται για κάθε παράμετρο η μέθοδος προσδιορισμού που χρησιμοποιήθηκε, καθώς επίσης και το αντίστοιχο πρωτόκολλο διαπίστευσης, σε όσες από αυτές υπάρχει.

Πίνακας 8.7. Μέθοδοι προσδιορισμού και πρωτόκολλο διαπίστευσης ανά παράμετρο (Ι.Ε.Υ.Π.).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ	ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΙΑΠΙΣΤΕΥΣΗΣ
pH	Προσδιορισμός με πεχάμετρο	ΕΛΟΤ 658 : 1983
EC	Προσδιορισμός με αγωγιμόμετρο	ΕΛΟΤ EN 27888 : 1993
Ca ²⁺	Μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/μέθοδος φλόγας	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA 2012
Mg ²⁺	Μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/μέθοδος φλόγας	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA 2012
Na ⁺	Μέτρηση σε φλογοφωτόμετρο	ISO 9964-3 : 1993

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ	ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΙΑΠΙΣΤΕΥΣΗΣ
K^+	Μέτρηση σε φλογοφωτόμετρο	-
NH_4^+	μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο UV-VIS σε 210 και 270 nm	-
HCO_3^-	ογκομετρικός προσδιορισμός/ εξουδετέρωση H_2SO_4	Ποτενσιομετρική μέθοδος, ΕΛΟΤ EN ISO 9963-1 : 1996
CO_3^{2-}	ογκομετρικός προσδιορισμός/ εξουδετέρωση H_2SO_4	Ποτενσιομετρική μέθοδος, ΕΛΟΤ EN ISO 9963-1 : 1996
SO_4^{2-}	Μέθοδος $BaCl_2$ /μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο UV-VIS σε 600 nm	-
Cl^-	Ογκομετρικός προσδιορισμός/εξουδετέρωση $AgNO_3$	Μέθοδος Mohr, ISO 9297 : 1989
NO_3^-	μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο UV-VIS σε 210 και 270 nm	-
NO_2^-	μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο UV-VIS σε 210 και 270 nm	-
B	Μέθοδος αζωμεθίνης- H/μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο UV-VIS σε 420 nm	Methods of Soil Analysis, Soil Science of America Society of Agronomy, M.W.USA,1996, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA 2012
Cu	Μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/μέθοδος φούρνου γραφίτη	-
Mn	Μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/μέθοδος φούρνου γραφίτη	ΕΛΟΤ EN ISO 15586:2003
Cd	Μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/μέθοδος φούρνου γραφίτη	-
Pb	Μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/μέθοδος φούρνου γραφίτη	-
Fe	Μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/μέθοδος φούρνου γραφίτη	-
As	μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/ μέθοδος φούρνου γραφίτη	-
Zn	μέτρηση σε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης/ μέθοδος φλόγας	-
^{18}O	φασματοσκοπική απορρόφηση λέιζερ ρυθμιζόμενης διόδου (TDLAS LG)	
2H	φασματοσκοπική απορρόφηση λέιζερ ρυθμιζόμενης διόδου (TDLAS LG)	

8.5.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΩΝ

Η ακρίβεια των δεδομένων εργαστηριακών προσδιορισμών της ποιότητας του νερού μπορεί να ελεγχθεί υπολογίζοντας την ισορροπία μεταξύ των θετικών και των αρνητικών κύριων ιόντων (ιοντική ισορροπία). Σε ένα δείγμα νερού ισχύει η αρχή της ηλεκτρο-

ουδετερότητας και συνεπώς είναι πάντα αφόρτιστο. Το επίπεδο σφάλματος των δεδομένων των χημικών αναλύσεων υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο (Appelo & Postma 1996):

$$\text{Ion Balance Error (IBE\%)} = \frac{(\sum \text{κατιόντων} - \sum \text{ανιόντων})}{(\sum \text{κατιόντων} + \sum \text{ανιόντων})} \times 100 \quad (8.2)$$

όπου στο άθροισμα των κατιόντων συμπεριλαμβάνονται οι συγκεντρώσεις των K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ και στο άθροισμα των ανιόντων οι συγκεντρώσεις των Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , με τις τιμές συγκέντρωσης των στοιχείων και ενώσεων να δίδονται σε mg/L. Σημειώνεται ότι στον τύπο έχουν συμπεριληφθεί τα αζωτούχα ιόντα καθώς οι συγκεντρώσεις τους συχνά λαμβάνουν τιμές κύριου ιόντος (>5%), καθώς η επιβάρυνση των νερών από τις ασκούμενες αγροτικές δραστηριότητες συχνά είναι υψηλή

Για τις ανάγκες της τρέχουσας έρευνας, θεωρήθηκαν αξιόπιστες οι εργαστηριακές δοκιμές των οποίων το σφάλμα ιοντικής ισορροπίας ήταν $IBE < 10\%$. Η συνθήκη αυτή τηρήθηκε στο σύνολο των δειγμάτων ενώ στη μεγάλη πλειοψηφία των αυτών το ποσοστό ήταν κάτω από 5%.

Τα σφάλματα αυτά, στα δεδομένα των χημικών αναλύσεων, μπορεί να οφείλονται είτε σε παράγοντες που αφορούν στη συλλογή των δειγμάτων στο πεδίο είτε σε παράγοντες που αφορούν καθαρά στην επεξεργασία και ανάλυση των δειγμάτων στο εργαστήριο. Όσον αφορά τις δειγματοληψίες στο πεδίο, η αποφυγή καταστάσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα αντιμετωπίστηκε με την τήρηση, όπως ήδη αναφέρθηκε, αυστηρού πρωτοκόλλου τόσο κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας όσο και κατά τη συντήρηση και αποστολή των δειγμάτων. Κατά το στάδιο των χημικών αναλύσεων, σύμφωνα και με τους Appelo & Postma (1996), δύναται να υπάρχουν δύο είδη σφαλμάτων: (α) τα τυχαία σφάλματα και (β) τα συστηματικά σφάλματα, τα οποία ονομάζονται από κοινού αναλυτικά σφάλματα, και επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στην ποιότητα των εργαστηριακών αποτελεσμάτων. Για την εξάλειψη των τυχαίων σφαλμάτων συστήνεται η επανάληψη των χημικών δοκιμών, ενώ στην περίπτωση των συστηματικών σφαλμάτων, ως τρόπος αντιμετώπισης, συστήνεται η σύγκριση των αναλύσεων είτε με αναλύσεις δειγμάτων αναφοράς είτε με σύγκριση αναλύσεων από διαφορετικά εργαστήρια. Τέλος, πιθανή αιτία υπολογισμού υψηλών τιμών IBE αποτελεί η ύπαρξη ιχνοστοιχείου σε υψηλές συγκεντρώσεις στο δείγμα νερού που αναλύθηκε. Οι περιπτώσεις αυτές συνδέονται με ιδιαίτερες γεωλογικές συνθήκες ή/και σημαντικότερες πηγές ρύπανσης, όπου τα αποτελέσματα δεν υποδεικνύουν εργαστηριακό σφάλμα, αλλά πιθανές ιδιαίτερες συνθήκες πεδίου.

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων και των τεσσάρων περιόδων δειγματοληψιών, τόσο για τα υπόγεια ύδατα όσο και για τα επιφανειακά παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1 (Πίνακες Π1.17 έως Π1.20) της παρούσας διατριβής.

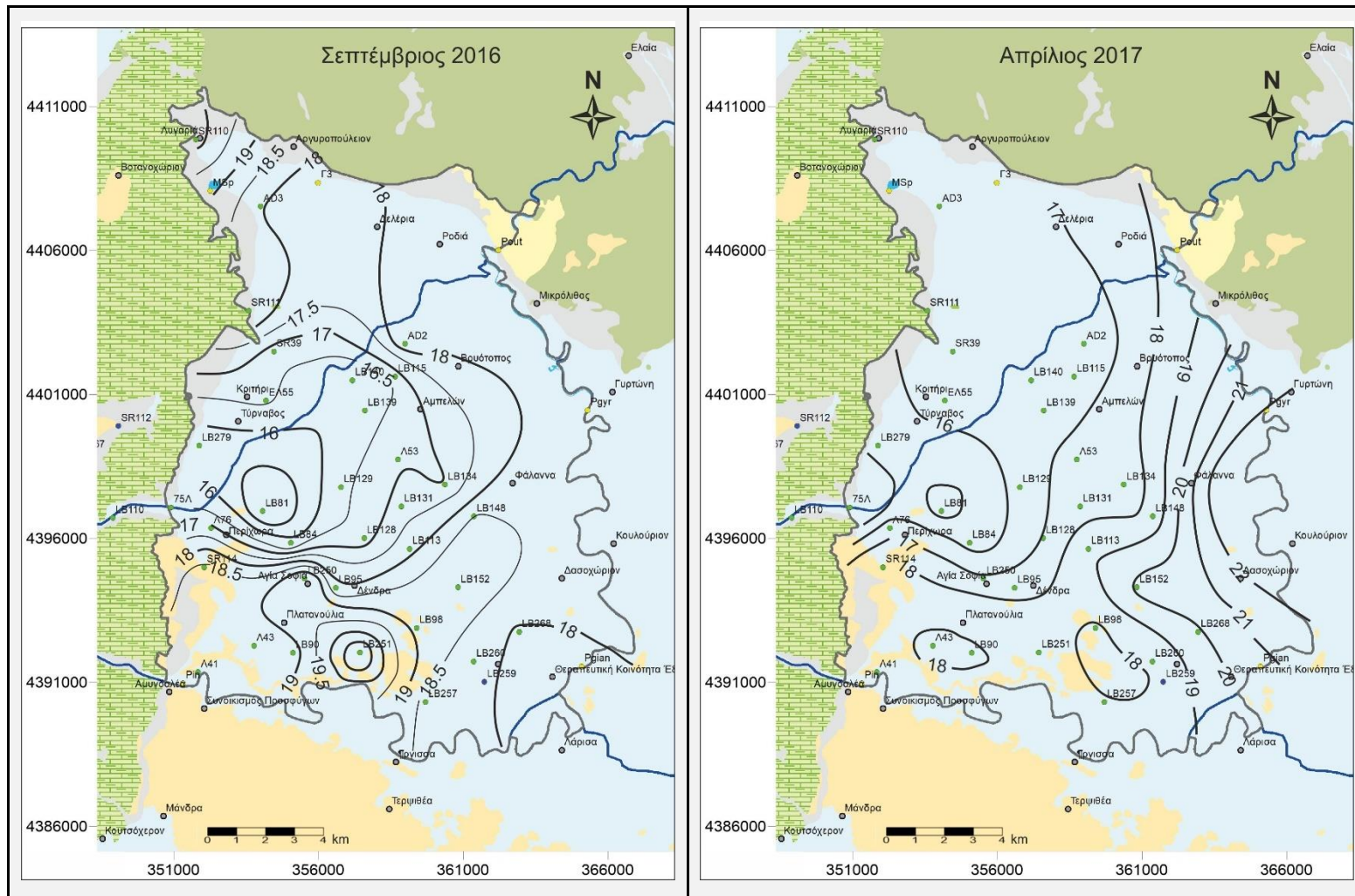
8.6 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

8.6.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ (T_w)

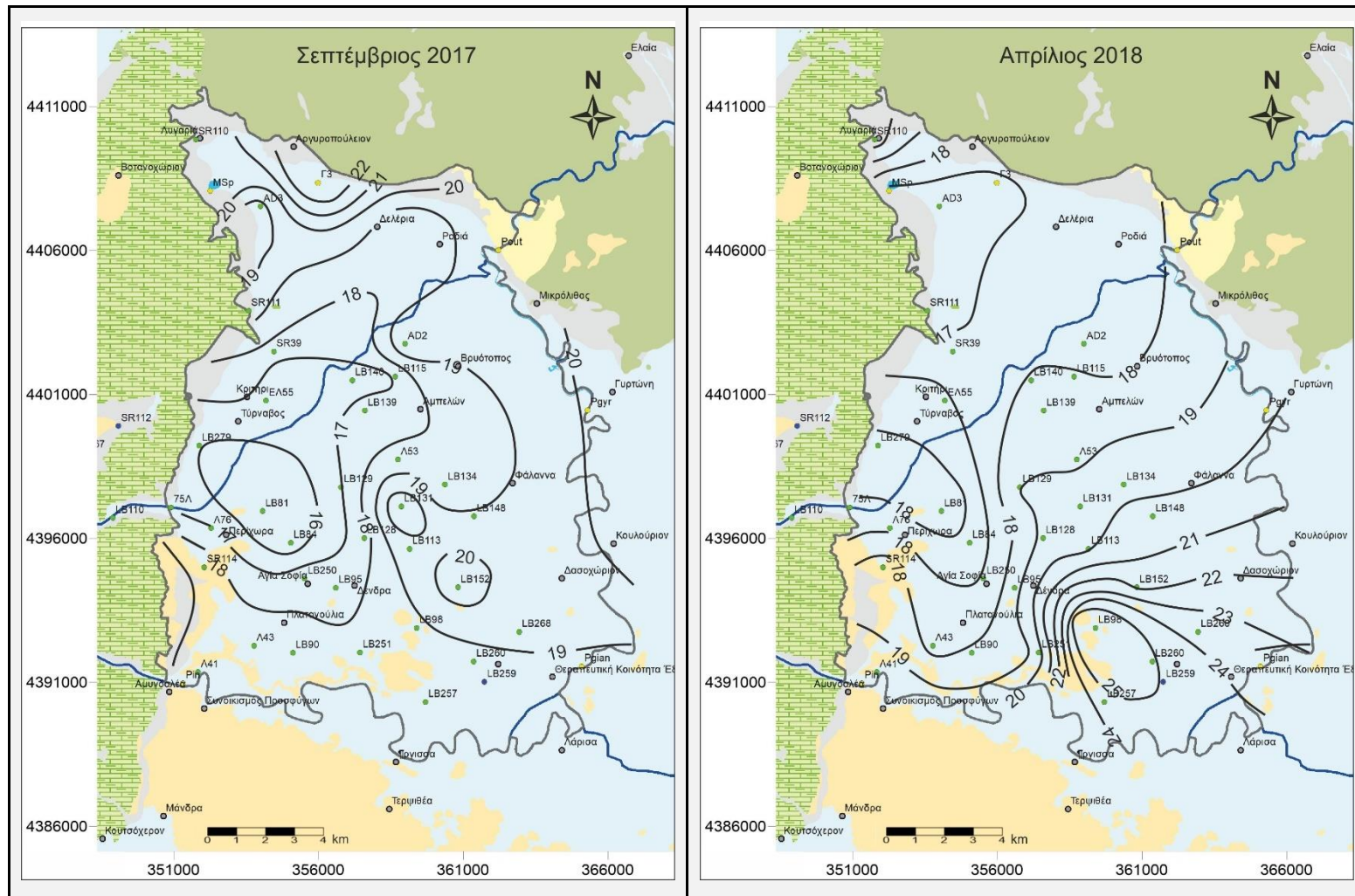
Η θερμοκρασία του υπόγειου νερού αποτελεί ένα σημαντικό οδηγό ποιότητας (Sharma et al. 2012, Menberg et al. 2014) διότι καθορίζει πολλές χημικές αντιδράσεις και φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε αυτό. Όταν η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται τότε προκαλείται μείωση της διαλυτότητας των αερίων, το οποίο έχει ως συνέπεια σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αύξηση της θερμοκρασίας νερού συνεπάγεται μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου με αποτέλεσμα να μειώνεται και η πυκνότητα του νερού και ως ελαφρύτερο εμποδίζει τη διάλυση του οξυγόνου.

Αναφορικά με το πόσιμο νερό, μια θερμοκρασία μεταξύ 7-11 °C είναι γενικά αποδεκτή, στις περιπτώσεις ωστόσο που η θερμοκρασία ξεπερνάει τους 25 °C, τότε επηρεάζεται η γεύση του και θεωρείται ανεπιθύμητο από τους καταναλωτές (Χαραλάμπους 2007). Παράλληλα, οι χωρικές μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού συνδέονται άμεσα με την υδροδυναμική λειτουργία του συστήματος αφού μπορεί να υποδεικνύουν ζώνες τροφοδοσίας ή εκφόρτισης.

Χάρτες χωρικής κατανομής της θερμοκρασίας του νερού δειγματοληψίας εξάχθηκαν και για τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας. Παρατηρώντας την κατανομή αυτή στις παρακάτω εικόνες, προκύπτει ότι οι χαμηλότερες θερμοκρασίες του υπόγειου νερού εμφανίζονται στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης ενώ μεταβαίνοντας προς το κέντρο και ανατολικά οι θερμοκρασίες αυτές σταδιακά αυξάνονται.



Εικόνα 8.3. Χωρική κατανομή θερμοκρασίας υπόγειου νερού (°C) για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).



Εικόνα 8.4. Χωρική κατανομή θερμοκρασίας υπόγειου νερού (°C) για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2017 (αριστερά) και Απριλίου 2018 (δεξιά).

Στις δύο δειγματοληψίες υγρής περιόδου (Απρίλιος 2017 και Απρίλιος 2018), οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα της υπολεκάνης, ενώ στις δειγματοληψίες ξηρής περιόδου, η κατάσταση διαφοροποιείται. Στην μεν πρώτη του Σεπτεμβρίου του 2016, η κατανομή ξεκινάει με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες στα δυτικά με σταδιακή αύξηση προς το κέντρο της υπολεκάνης και στη συνέχεια πτώση πάλι της θερμοκρασίας προς το ανατολικό τμήμα της. Στην αντίστοιχη κατανομή του Σεπτεμβρίου του 2017, η θερμοκρασία ακολουθεί την πτωτική πορεία από δυτικά προς ανατολικά, ωστόσο οι μέγιστες τιμές της, παρατηρούνται στα βόρεια κράσπεδα αυτή τη φορά.

Η γενική εικόνα αυτή της κατανομής της θερμοκρασίας του υπόγειου νερού, με τις χαμηλότερες τιμές να παρατηρούνται στα δυτικά κράσπεδα, στην επαφή των προσχωσιγενών σχηματισμών με τους καρστικούς ασβεστόλιθους, αποτελεί έναν δείκτη για τον μηχανισμό τροφοδοσίας του συστήματος. Οι χαμηλές αυτές θερμοκρασίες, στα δυτικά, υποδηλώνουν φρέσκα νερά, με μικρό χρόνο παραμονής στον υπό-πίεση υδροφόρο και ως εκ τούτου άμεση γεινίαση με την πηγή τροφοδοσίας. Τα δεδομένα αυτά συμφωνούν με όσα ειπώθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο σχετικά με την μορφή των πιεζομετρικών καμπυλών και την κίνηση του υπόγειου νερού από τα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης προς τα ανατολικά περιθώρια αυτής (από τις περιοχές υψηλότερου υδραυλικού φορτίου προς τις περιοχές μικρότερου υδραυλικού φορτίου) υποδηλώνοντας έτσι την άμεση τροφοδοσία της υπολεκάνης από τον καρστικό όγκο Δαμασίου-Τυρνάβου.

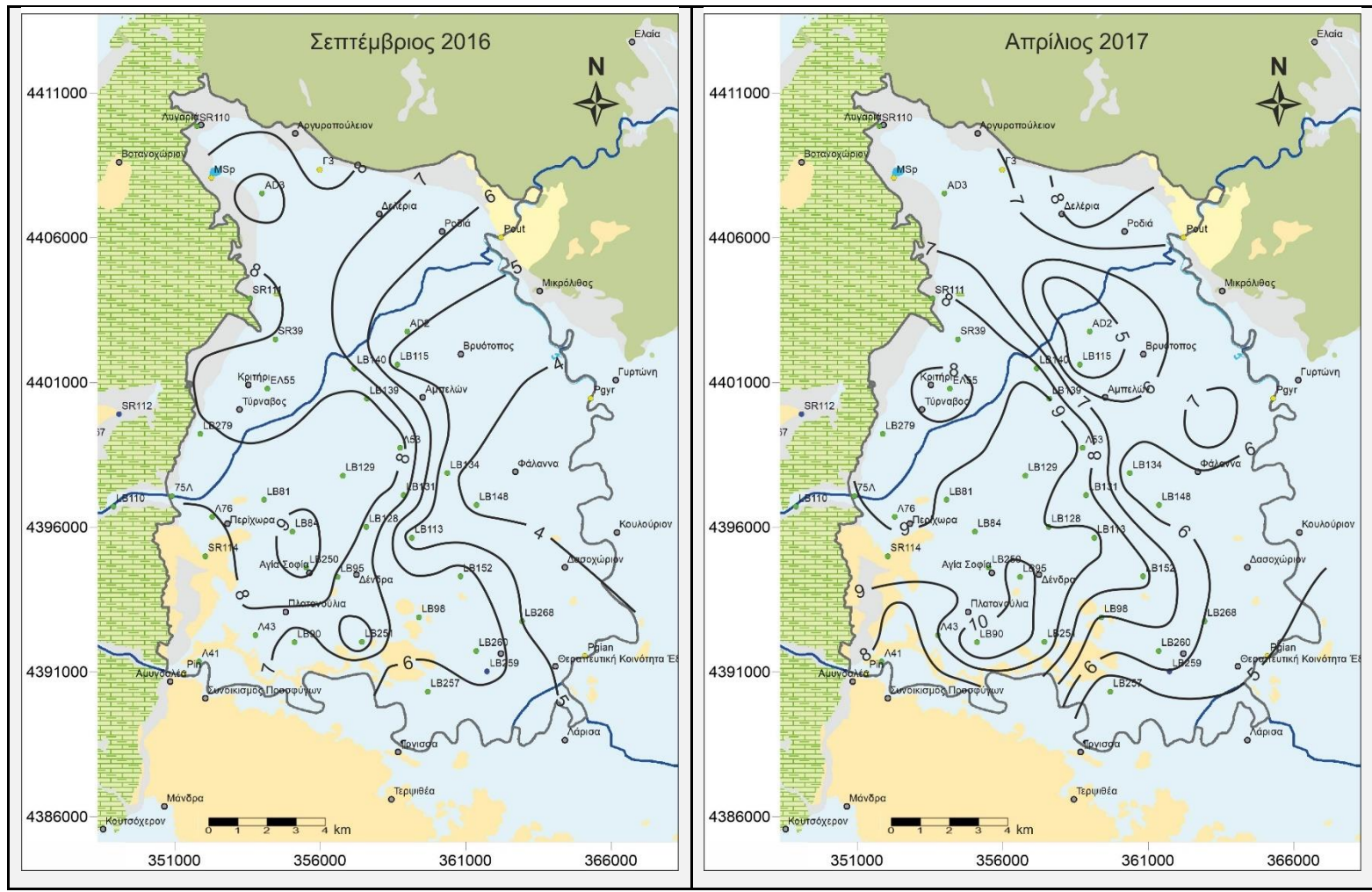
Σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες παρατηρούνται και προς το βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας, με εξαίρεση τη περίοδο του Σεπτεμβρίου του 2017. Με βάση το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τα χαμηλά βάθη υπόγειας στάθμης στην περιοχή (Εικόνα 6.10), τις τιμές του διαλυμένου οξυγόνου που θα αναφερθούν παρακάτω, αλλά και την μετέπειτα ελαφρά διαφοροποίηση της υδροχημείας, μπορεί να υποστηριχθεί η ύπαρξη μιας τοπικής επιλεκτικής και μάλλον ασθενούς υδροφορίας που αναπτύσσεται στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο και τροφοδοτεί μέσω πλευρικών μεταγίσεων το αλλουβιακό πεδίο.

8.6.2 ΔΙΑΛΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟΥ (DO)

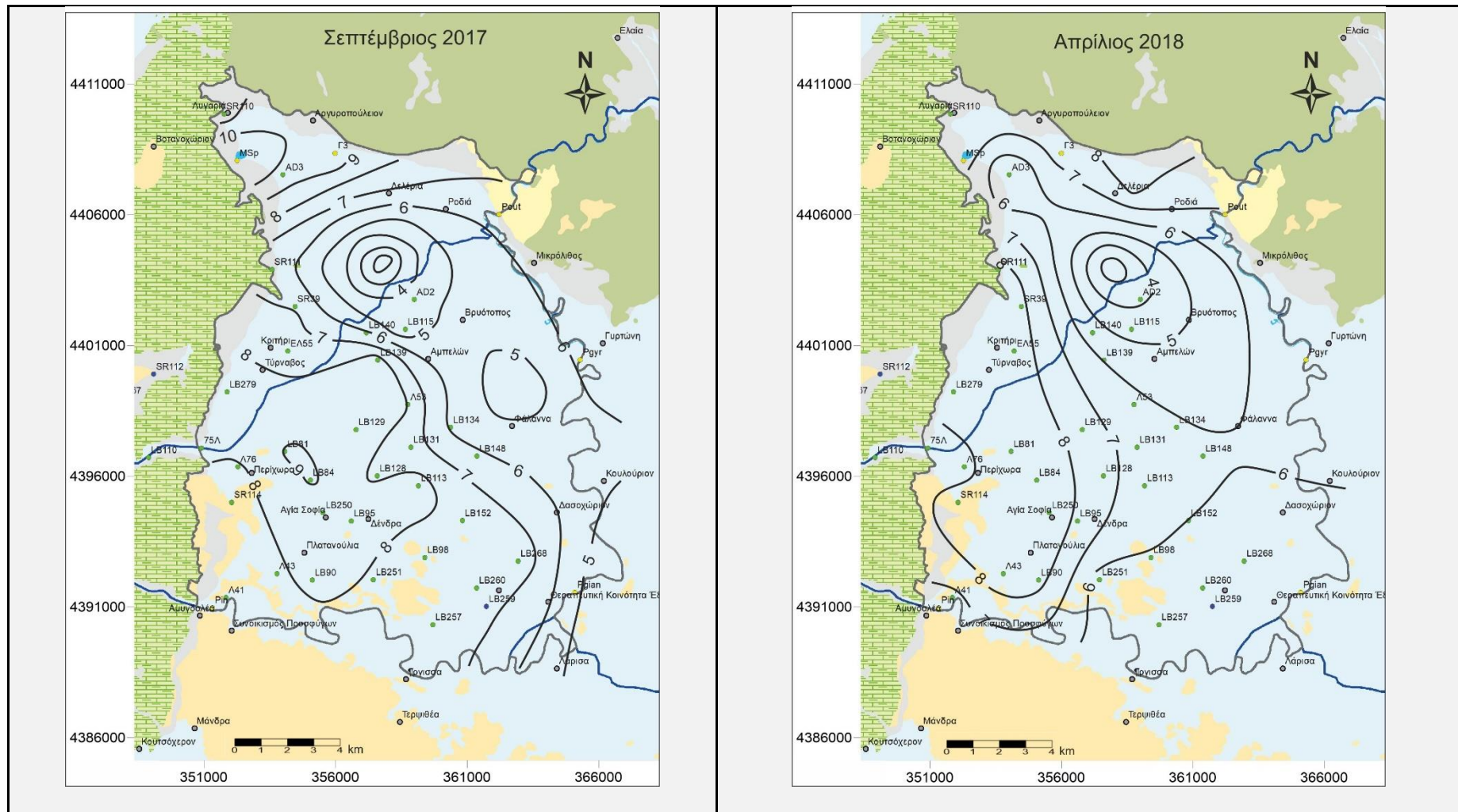
Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό σε κατάσταση ισορροπίας με τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι 8.32 mg/L στους 25°C, ενώ η μέση συγκέντρωσή του σε φυσικά νερά μη επηρεασμένα από ρύπανση, είναι 9-10 mg/L (Χαραλάμπους 2007, Γαμβρουλά 2013). Επίσης, παλαιά νερά με μεγάλο χρόνο παραμονής στον υδροφόρο, τα οποία δεν ανανεώνονται, παρουσιάζουν μικρές τιμές διαλυμένου οξυγόνου ενώ αντιθέτως φρέσκα νερά με υψηλό ρυθμό ανανέωσης παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις σε διαλυμένο οξυγόνο.

Όπως και στην περίπτωση της θερμοκρασίας του νερού δειγματοληψίας, έτσι και με τα δεδομένα των τιμών του διαλυμένου οξυγόνου, κατασκευάστηκαν χάρτες χωρικής κατανομής και για τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας.

Παρατηρώντας τους χάρτες από τις Εικόνες 8.5 και 8.6, προκύπτει σαν γενικό συμπέρασμα, ότι οι υψηλές τιμές του διαλυμένου οξυγόνου εμφανίζονται στα δυτικά και βόρεια περιθώρια της υπολεκάνης, ενώ μεταβαίνοντας προς το κέντρο και τα ανατολικά οι τιμές αυτές σταδιακά μειώνονται. Ακολουθούν δηλαδή οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου μια πορεία αντίστροφη με τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας νερού. Οι χαμηλές τιμές του διαλυμένου οξυγόνου παρατηρούνται κατά τόπους στα κεντρικά τμήματα της υπολεκάνης, καθώς και στο νοτιοανατολικό τμήμα αυτής, ενώ στο σύνολό σχεδόν των περιπτώσεων (εκτός της πρώτης δειγματοληψίας λόγω ελλιπών δεδομένων στα ανατολικά), στο κεντροανατολικό προς βορειοανατολικό τμήμα της υπολεκάνης οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές, κάτι που θα αναλυθεί αργότερα στο κεφάλαιο της ισοτοπικής υδρολογίας.



Εικόνα 8.5. Χωρική κατανομή διαλυμένου οξυγόνου (mg/L) για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).



Εικόνα 8.6. Χωρική κατανομή διαλυμένου οξυγόνου (mg/L) για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2017 (αριστερά) και Απριλίου 2018 (δεξιά).

Η χωρική αυτή κατανομή του διαλυμένου οξυγόνου έρχεται ως συνέχεια των προηγούμενων δεδομένων (υπόγειας στάθμης και κατανομής θερμοκρασίας), να ισχυροποιήσει την άποψη για τον μηχανισμό λειτουργίας του συστήματος, καθώς οι υψηλές τιμές του διαλυμένου οξυγόνου, κοντά στα 10 mg/L, στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης υποδηλώνουν φρέσκα νερά τροφοδοσίας.

Κατ' αντιστοιχία με την ανάλυση των θερμοκρασιών της προηγούμενης παραγράφου, οι υψηλές σχετικά τιμές του διαλυμένου οξυγόνου, στο βόρειο τμήμα της περιοχής, συνάδουν με την άποψη για την ύπαρξη μιας τοπικής επιλεκτικής υδροφορίας στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, η οποία τροφοδοτεί μερικώς την αλλουβιακή υπολεκάνη από τα βόρεια, όπως θα επαληθευτεί και στο επόμενο Κεφάλαιο, από την ανάλυση των υδροχημικών διαγραμμάτων.

8.6.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (EC)

Ως ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ορίζεται η ιδιότητα του ηλεκτρικού ρεύματος να διέρχεται μέσα από τα υλικά σώματα και ανάλογα με την τιμή της, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως *αγωγός*, *μονωτής* ή *ημιαγωγός*. Σ' ένα υδατικό διάλυμα, η αύξηση της περιεκτικότητας των διαλυμένων στερεών και η αύξηση της θερμοκρασίας του, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται συνήθως, σαν συνάρτηση του χρόνου παραμονής του νερού μέσα σε έναν υδροφόρο. Αποτελεί δείκτη των συνθηκών τροφοδοσίας και ανανέωσης των υπόγειων υδάτων, ενώ καθορίζει, γενικότερα, το βαθμό υποβάθμισης της ποιότητας του νερού. Συνεπώς, η ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο διάγνωσης της ποιότητας του υπόγειου νερού, αλλά και έναν γρήγορο γενικό προσδιορισμό της χημικής του σύστασης.

Τα υπόγεια νερά ταξινομούνται με βάση την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε (i) γενικά καλής ποιότητας με πολύ μικρό βαθμό ρύπανσης (τιμές μεταξύ 500-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), (ii) μέτρια έως κακής ποιότητας (τιμές μεταξύ 1000-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) και (iii) κακής ποιότητας (τιμές μεγαλύτερες από 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Στον Πίνακα 8.8 παρουσιάζονται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, για τα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας για τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας, ενώ στις Εικόνες 8.7 και 8.8 απεικονίζεται η χωρική κατανομή των τιμών αυτών για κάθε περίοδο.

Πίνακας 8.8. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τις 4 περιόδους δειγματοληψίας.

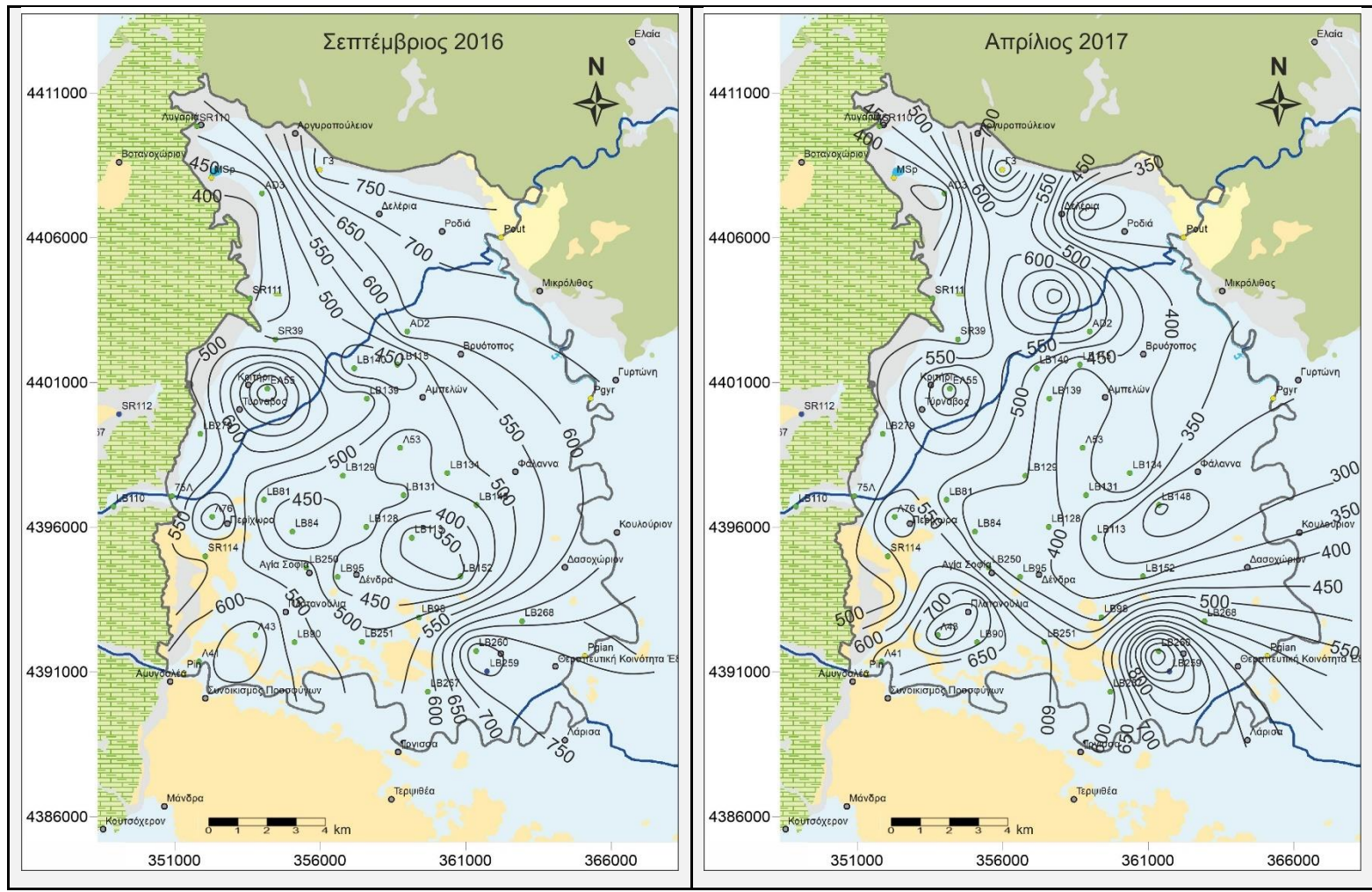
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Σεπ-16	Απρ-17	Σεπ-17	Απρ-18
Ελάχιστη	307.7	185.0	177.0	301.8
Μέγιστη	872.0	1084.0	890.0	1129.0
Μέσος όρος	521.9	512.5	508.9	567.4
Τυπική απόκλιση	139.1	183.8	158.6	172.4

Όπως παρατηρείται από τις τιμές του παραπάνω πίνακα, για τις δύο ξηρές περιόδους, η χαμηλότερη τιμή είναι 307.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για τον Σεπτέμβριο του 2016 και η υψηλότερη 872 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ενώ για τον Σεπτέμβριο του 2017 οι αντίστοιχες τιμές είναι 177 και 890 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Παρουσιάζουν δηλαδή μια κύμανση 564.3 και 713 $\mu\text{S}/\text{cm}$ αντίστοιχα. Για τις δύο υγρές περιόδους δειγματοληψίας, οι χαμηλότερες και υψηλότερες τιμές είναι 185 και 1084 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για τον Απρίλιο του 2017 ενώ για τον Απρίλιο του 2018, 301.8 και 1129 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Οι αντίστοιχες κυμάνσεις είναι 899 και 827.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Από τη χωρική κατανομή των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς, για τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας, προκύπτει ότι οι υψηλότερες τιμές αυτής εστιάζονται σε δύο τμήματα της υπολεκάνης. Το πρώτο είναι το Β-ΒΔ τμήμα της υπολεκάνης με κάτω όριο τον ποταμό Τιταρήσιο, ενώ το δεύτερο το Ν-ΝΑ τμήμα της υπολεκάνης, με εξαίρεση τον Απρίλιο του έτους 2018, όπου όμως την συγκεκριμένη περίοδο υπήρχαν αρκετές γεωτρήσεις εκτός λειτουργίας στο ΝΑ τμήμα της υπολεκάνης και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Σημειώνεται, ότι ακόμα και οι υψηλότερες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπόγειων υδάτων της περιοχής, στα σημεία που αναφέρθηκαν, βρίσκονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, αναφορικά με την καταλληλότητά τους για αρδευτικούς σκοπούς (με ελάχιστους περιορισμούς όσον αφορά τις μέγιστες τιμές αυτής για ιδιαίτερα ευαίσθητες καλλιέργειες), που ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται. Ωστόσο, βάσει της κατηγοριοποίησης που αναφέρθηκε παραπάνω, υποδεικνύουν πιθανές περιοχές ρύπανσης και υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων, και όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, ταιριάζουν απόλυτα με τις περιοχές εκείνες, όπου οι τιμές των νιτρικών ιόντων φτάνουν σε πολύ υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης.

Σημειώνεται, ότι από τη σύγκριση των τιμών μεταξύ της EC πεδίου με τις αντίστοιχες εργαστηριακές τιμές, δεν προέκυψαν αξιόλογες διαφοροποιήσεις, που να τροποποιούν τη χωρική κατανομή της όπως αυτή παρουσιάζεται στις Εικόνες 8.7 και 8.8, ούτε και τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά που θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο της στατιστικής (Κεφάλαιο 10).



Εικόνα 8.7. Χωρική κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).

8.6.4 ΕΝΕΡΓΟΣ ΟΞΥΤΗΤΑΣ (pH)

Η ενεργός οξύτητα ή pH, εκφράζει τη συγκέντρωση των κατιόντων υδροξωνίου (H_3O^+), που περιέχονται σε ένα υδατικό διάλυμα και εκφράζεται με τον αρνητικό λογάριθμο της συγκέντρωσής τους. Η τιμή της παραμέτρου αυτής είναι ενδεικτική του γεωλογικού περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται το υπόγειο νερό και από το οποίο (μεταξύ άλλων) επηρεάζεται η υδροχημική του σύσταση.

Το pH καθορίζει πολλούς παράγοντες στο νερό και για το λόγο αυτό αποτελεί σημαντικό δείκτη της ποιότητάς του. Το pH ρυθμίζει τους μηχανισμούς των αντιδράσεων, βοηθά ή παρεμποδίζει τις βιοχημικές διεργασίες και εξαρτάται άμεσα από το είδος των χημικών ουσιών που περιέχονται μέσα στο υδατικό διάλυμα. Τιμές του pH μεταξύ 6.6 και 8.5 θεωρούνται ικανοποιητικές για νερό που προορίζεται για υδρευτικούς σκοπούς (Χαραλάμπους 2007, Γαμβρουλά 2013).

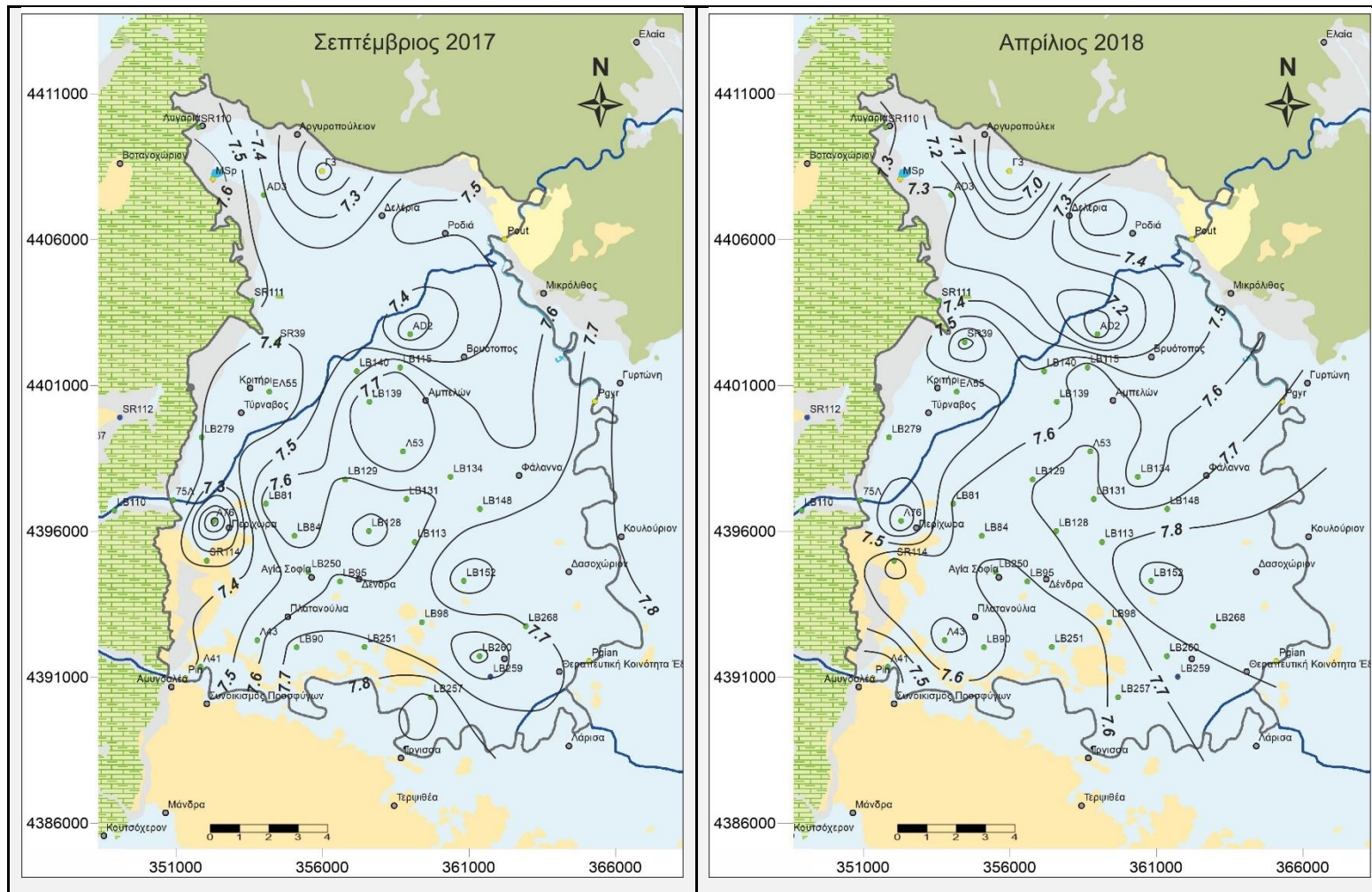
Στον Πίνακα 8.9 παρουσιάζονται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών του pH, για τα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας για τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας, ενώ στις Εικόνες 8.9 και 8.10 φαίνεται η χωρική κατανομή των τιμών αυτών για κάθε περίοδο. Από τις τιμές του pH του Πίνακα 8.8, φαίνεται ότι αυτές κυμαίνονται εντός των ορίων ποσιμότητας. Η υψηλότερη τιμή του δεν ξεπερνά το 8.0 σε καμία περίοδο δειγματοληψίας, ενώ οι χαμηλότερες τιμές βρίσκονται μεταξύ 6.7 και 7.1 αντίστοιχα.

Πίνακας 8.9. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών του pH για τις 4 περιόδους δειγματοληψίας.

pH	Σεπ-16	Απρ-17	Σεπ-17	Απρ-18
<i>Ελάχιστη</i>	7.12	6.78	6.82	6.71
<i>Μέγιστη</i>	7.99	7.94	7.95	7.96
<i>Μέσος όρος</i>	7.59	7.54	7.54	7.51
<i>Τυπική απόκλιση</i>	0.22	0.26	0.22	0.25

Αναφορικά με τη χωρική κατανομή του pH, φαίνεται ότι αυτή ακολουθεί σε γενικές γραμμές την κατανομή της θερμοκρασίας του νερού, με τις πιο μικρές τιμές να εμφανίζονται στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης ενώ μεταβαίνοντας προς τα ανατολικά οι τιμές του pH αυξάνονται σταδιακά αποκτώντας ελαφρά αλκαλικότερο χαρακτήρα. Χαρακτηριστικό επίσης είναι το γεγονός, ότι στο βόρειο τμήμα της υπολεκάνης, στην επαφή των Τεταρτογενών αποθέσεων με το κρυσταλλικό υπόβαθρο της Πελαγονικής, οι τιμές του pH αποκτούν χαμηλές για την περιοχή τιμές (γύρω στο 7).

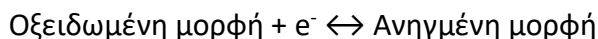
Σημειώνεται, ότι όπως και στην περίπτωση της EC που παρουσιάστηκε πιο πάνω, έτσι και για τις τιμές του pH, οι τιμές πεδίου δεν παρουσίασαν ουσιαστικές διακυμάνσεις σε σχέση με τις εργαστηριακές μετρήσεις.



Εικόνα 8.10. Χωρική κατανομή του pH για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2017 (αριστερά) και Απριλίου 2018 (δεξιά).

8.6.5 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ (Eh)

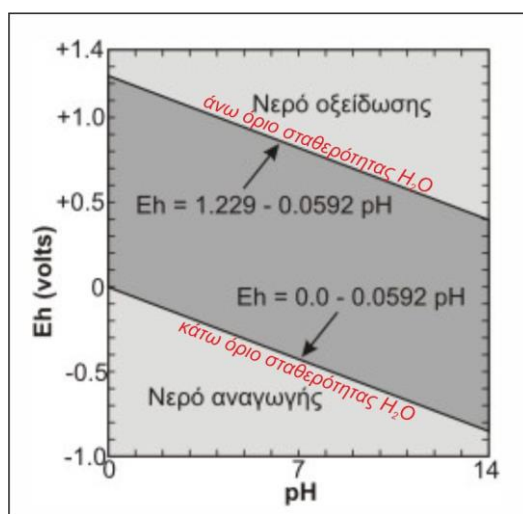
Το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Eh) ενός διαλύματος εξαρτάται από τη θέση ισορροπίας της χημικής αντίδρασης:



Η θέση ισορροπίας εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις του οξειδωτικού και του αναγωγικού μέσου. Το πιο άφθονο και ισχυρό οξειδωτικό στη φύση είναι το οξυγόνο και το ισχυρότερο αναγωγικό θεωρείται το υδρογόνο.

Η μεταβολή του pH στο περιβάλλον προκαλεί σημαντική μεταβολή της τιμής του δυναμικού οξειδοαναγωγής, λόγω της συμμετοχής των ιόντων OH^- στις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής. Μετρώντας το δυναμικό οξειδοαναγωγής σε συνάρτηση με τις τιμές του pH, είναι εφικτός ο προσδιορισμός των μορφών με τις οποίες βρίσκεται ένα χημικό στοιχείο σε ένα συγκεκριμένο φυσικό περιβάλλον (Βουδούρης 2006).

Στο Διάγραμμα 8.1 φαίνεται η σχέση Eh-pH και οι περιοχές διάκρισης, όπου το νερό οξειδώνεται σε O_2 και περιοχές όπου ανάγεται σε H_2 (όρια σταθερότητας του νερού). Η κατανομή αρκετών ενώσεων, μεταξύ των οποίων και οι H_2S , CH_4 , Fe^{2+} , καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του δυναμικού οξειδοαναγωγής.



Διάγραμμα 8.1. Διάγραμμα Eh-pH – Όρια σταθερότητας του H_2O (Βουδούρης 2006, Misra 2012).

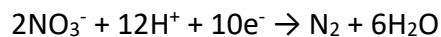
Γνωρίζοντας το Eh ενός υδάτινου περιβάλλοντος είναι δυνατόν να υπολογιστούν με ακρίβεια οι συγκεντρώσεις ιόντων ή ενώσεων στο περιβάλλον αυτό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, στην επιφάνεια της θάλασσας το Eh έχει τιμή +0.3 V (οξειδωτικό περιβάλλον), λόγω εμπλουτισμού με αέρα, ενώ κοντά στον πυθμένα η αντίστοιχη τιμή είναι -0.6 V (αναγωγικό περιβάλλον), λόγω περίσσειας οργανικού υλικού και έλλειψης οξυγόνου (Θεοδωρίκας 1997, Καλλέργης 2000, Βουδούρης 2006).

Για την περιοχή έρευνας ειδικότερα, κατασκευάστηκαν χάρτες χωρικής κατανομής του δυναμικού οξειδοαναγωγής, για τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας, οι οποίοι απεικονίζονται στις Εικόνες 8.11 και 8.12. Ένα γενικό συμπέρασμα που βγαίνει από τις

κατανομές αυτές, εξαιρώντας την τρίτη περίοδο δειγματοληψίας (Σεπτέμβριος 2017), είναι ότι στην κύρια περιοχή έρευνας επικρατούν σχεδόν καθολικά οξειδωτικές συνθήκες. Στην ξηρή περίοδο του Σεπτεμβρίου του 2016, μόνο στη θέση LB257 (νοτιότερη θέση δειγματοληψίας εντός της υπολεκάνης) η τιμή του δυναμικού οξειδοαναγωγής είναι αρνητική (-2.5 mV), επιφέροντας έτσι μια έντονη διαφοροποίηση στη μορφή των ισοπαραμετρικών καμπυλών.

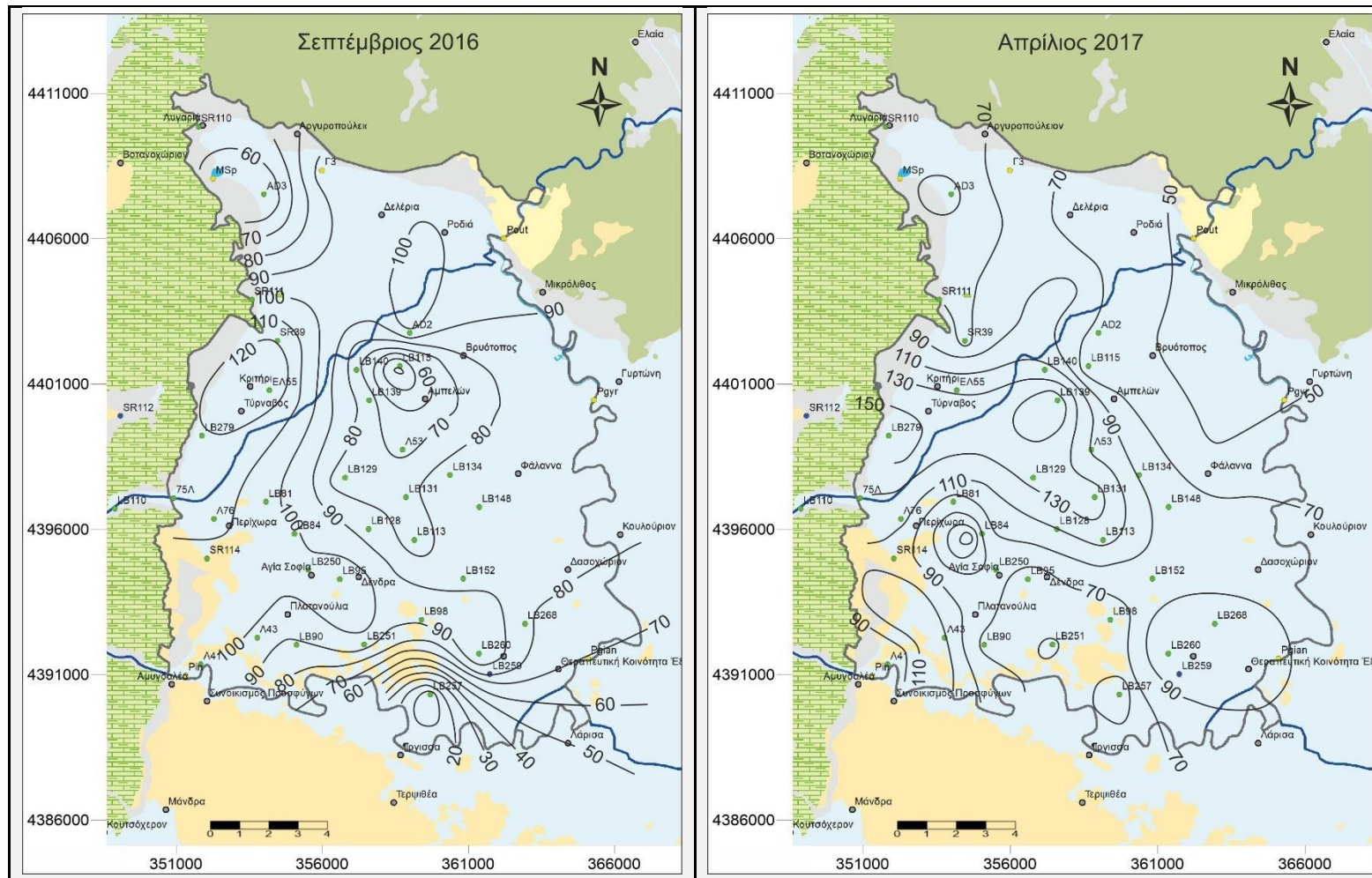
Στην περίπτωση της δειγματοληψίας της επόμενης ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος 2017), η κατάσταση στη υπολεκάνη, σχετικά με το δυναμικό οξειδοαναγωγής διαφοροποιείται σε σχέση με τις υπόλοιπες δειγματοληψίες, με την επικράτηση αναγωγικών συνθηκών σε μεγάλο τμήμα αυτής. Σε όλο το ΒΑ τμήμα πάνω από τον ποταμό Τιταρήσιο καθώς και στα ανατολικά περιθώρια της υπολεκάνης το δυναμικό οξειδοαναγωγής παρουσιάζει αρνητικές τιμές που κυμαίνονται από -62 έως -220 mV. Η επικράτηση οξειδωτικών συνθηκών στα δυτικά, σε όλες τις υπόλοιπες περιόδους, συνάδει με τις συνθήκες τροφοδοσίας, όπως υποδείχθηκε και από τη χωρική κατανομή των προηγούμενων παραμέτρων (θερμοκρασία νερού, διαλυμένο οξυγόνο). Με την απομάκρυνση από τις ζώνες τροφοδοσίας, μειώνεται η τιμή του δυναμικού οξειδοαναγωγής μεταβαίνοντας προς πιο αναγωγικές τιμές (συνθήκες). Στη συγκεκριμένη περίοδο του Σεπτεμβρίου του 2017, η εμφάνιση των αναγωγικών συνθηκών στα δυτικά περιθώρια, πιθανότατα οφείλεται στον περιορισμό της φυσικής τροφοδοσίας κατά την περίοδο αυτή. Πράγματι, σύμφωνα με τους μετεωρολογικούς σταθμούς Τυρνάβου και Λάρισας (Πίνακες Π1.3, Π1.4, του Παραρτήματος 1), οι βροχοπτώσεις κατά την θερινή περίοδο του 2017 ήταν κατά πολύ λιγότερες σε σχέση με τα προηγούμενα έτη.

Αναφορικά με τη σχέση του δυναμικού οξειδοαναγωγής με τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-), ισχύει σε θεωρητική βάση, ότι σε περιοχές με χαμηλές συγκεντρώσεις νιτρικών αναμένεται να μην επικρατούν έντονα οξειδωτικές συνθήκες. Αντίστοιχα, σε περιοχές υψηλών συγκεντρώσεων σε νιτρικά αναμένεται, χωρίς αυτό να είναι θέσφατο, να επικρατούν συνθήκες πιο έντονα οξειδωτικές (υψηλό Eh). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η κύρια διαδικασία απομάκρυνσης των νιτρικών είναι η αναγωγή τους σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

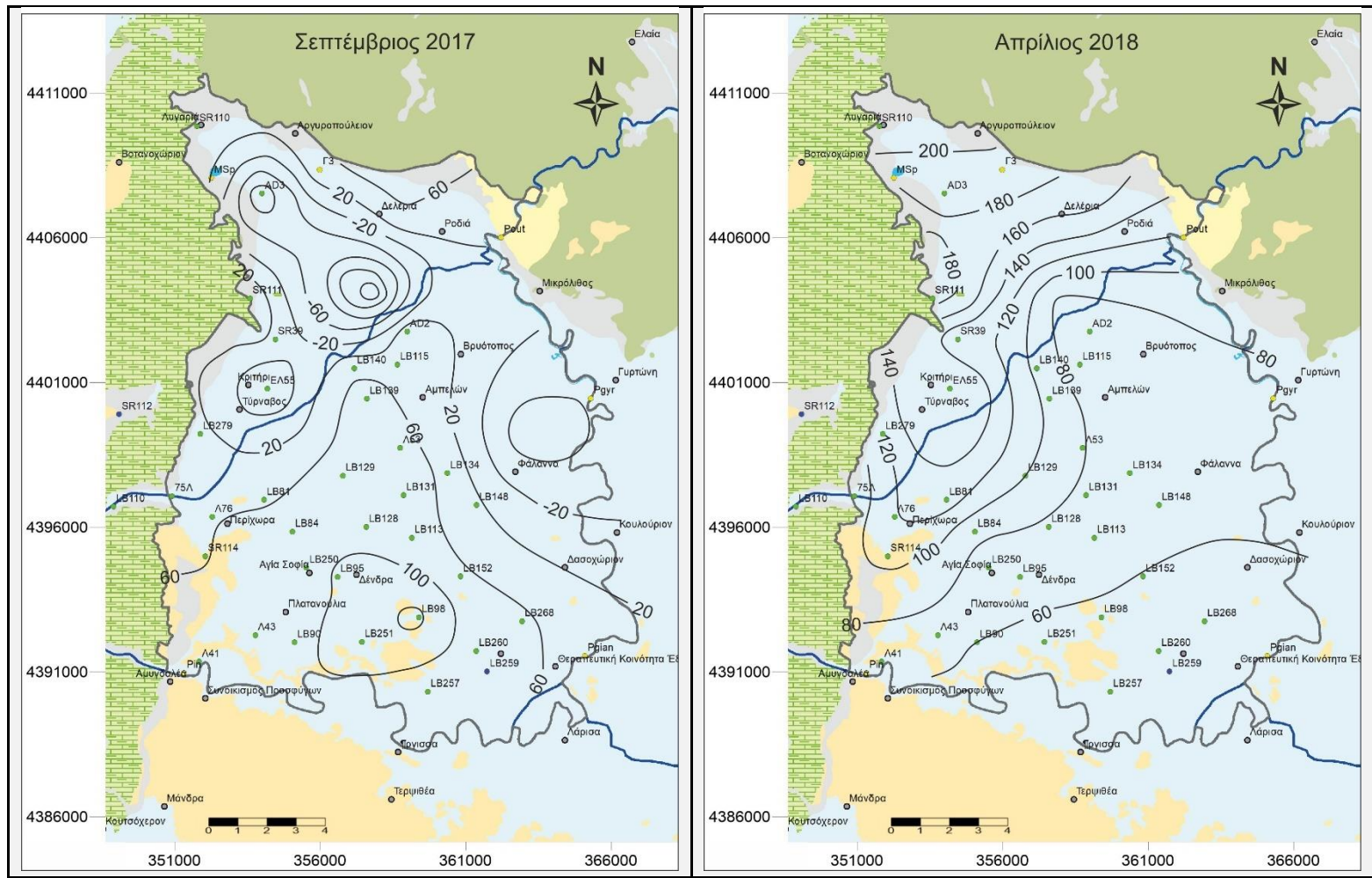


Ωστόσο, οι κύριες αναγωγικές ουσίες (H_2S , CH_4 , Fe^{2+}) βρίσκονται στο νερό σε μικρή αναλογία σε σχέση με τα νιτρικά και ως εκ τούτου καθίσταται αδύνατη η πλήρης αναγωγή τους. Έτσι, η αναγωγή των νιτρικών (ή απονίτρωση) στους υδροφόρους, επιτυγχάνεται από την οργανική ύλη, παρουσία βακτηρίων με τελικό προϊόν την αμμωνία (NH_3), σε περιοχές δηλαδή όπου επικρατούν αναγωγικές συνθήκες.

Στην περιοχή έρευνας, σε γενικές γραμμές, ισχύει η παραπάνω σχέση του δυναμικού οξειδοαναγωγής με τα νιτρικά, δηλαδή παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών σε περιοχές με σχετικά υψηλό δυναμικό οξειδοαναγωγής και αντιστρόφως. Εξαίρεση αποτελεί το ΒΑ τμήμα της υπολεκάνης, πάνω από τον Τιταρήσιο, για την περίοδο δειγματοληψίας του Σεπτεμβρίου του 2017.



Εικόνα 8.11. Χωρική κατανομή του E_h (mV) για τις δύο πρώτες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).



Εικόνα 8.12 Χωρική κατανομή του Eh (mV) για τις δύο τελευταίες περιόδους δειγματοληψίας, Σεπτεμβρίου 2016 (αριστερά) και Απριλίου 2017 (δεξιά).

8.6.6 ΟΛΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Η σκληρότητα του νερού καθορίζεται από τη συγκέντρωση των δισθενών μεταλλικών κατιόντων, κυριότερα των οποίων είναι το ασβέστιο (Ca^{2+}) και το μαγνήσιο (Mg^{2+}). Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων αυτών προέρχονται από τη διάλυση αλάτων του ασβεστίου και του μαγνησίου από το νερό. Ο ολική σκληρότητα (Total Hardness) υπολογίζεται από το άθροισμα των συγκεντρώσεων του ασβεστίου και του μαγνησίου, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση και εκφράζεται σε mg/L CaCO_3 :

$$\text{TH} = (2.5 * \text{Ca}^{2+}) + (4.1 * \text{Mg}^{2+})$$

Η σκληρότητα του νερού διαχωρίζεται στις δύο παρακάτω κατηγορίες, το άθροισμα των οποίων εκφράζει την ολική σκληρότητα:

- τη μόνιμη σκληρότητα, η οποία οφείλεται στην παρουσία στο νερό αλκαλικών γαιών, ενωμένων με ιόντα θεικών, χλωρίου και νιτρικά,
- τη παροδική σκληρότητα, η οποία οφείλεται στην παρουσία όξινων ανθρακικών αλάτων του ασβεστίου και του μαγνησίου, που προέρχονται από τη διάλυση ανθρακικών ορυκτών.

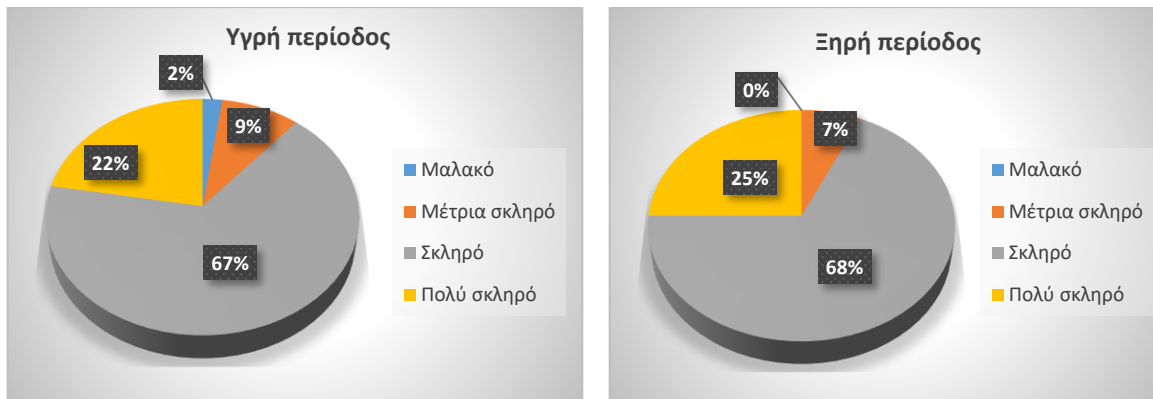
Υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις του νερού, με βάση την ολική σκληρότητα. Στον Πίνακα 8.10 παρουσιάζεται η ταξινόμηση κατά Sawyer et al. (1994), όπου το νερό διακρίνεται από μαλακό έως πολύ σκληρό.

Πίνακας 8.10. Ταξινόμηση υπόγειων υδάτων με βάση την ολική σκληρότητα (Sawyer et al. 1994).

TH (mg/L CaCO_3)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
0 - 75	Μαλακό
76 - 150	Μέτρια σκληρό
151- 300	Σκληρό
> 300	Πολύ σκληρό

Σχετικά υψηλές τιμές της της σκληρότητας δεν αποτελούν άμεσο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία ωστόσο περιπτώσεις μακροχρόνιας πόσης πολύ σκληρών νερών έχουν συσχετισθεί με καρδιακές παθήσεις.

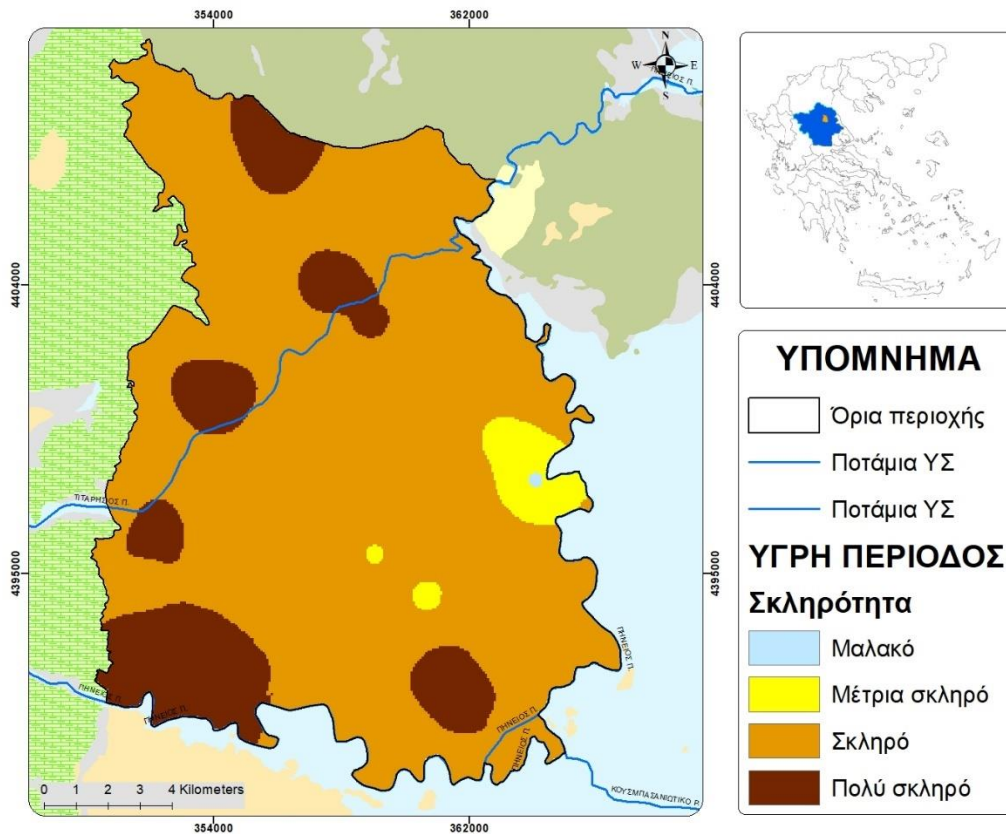
Στο Διάγραμμα 8.2 που ακολουθεί απεικονίζεται η ταξινόμηση των δειγμάτων νερού για την περιοχή έρευνας τόσο για την υγρή (μέσος όρος 2 περιόδων δειγματοληψίας) όσο και για την ξηρή περίοδο (μέσος όρος 2 περιόδων δειγματοληψίας), με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των 4 περιόδων δειγματοληψίας, τα οποία επισυνάπτονται στο Παράρτημα 1 (Πίνακες P1.17 έως P1.20).



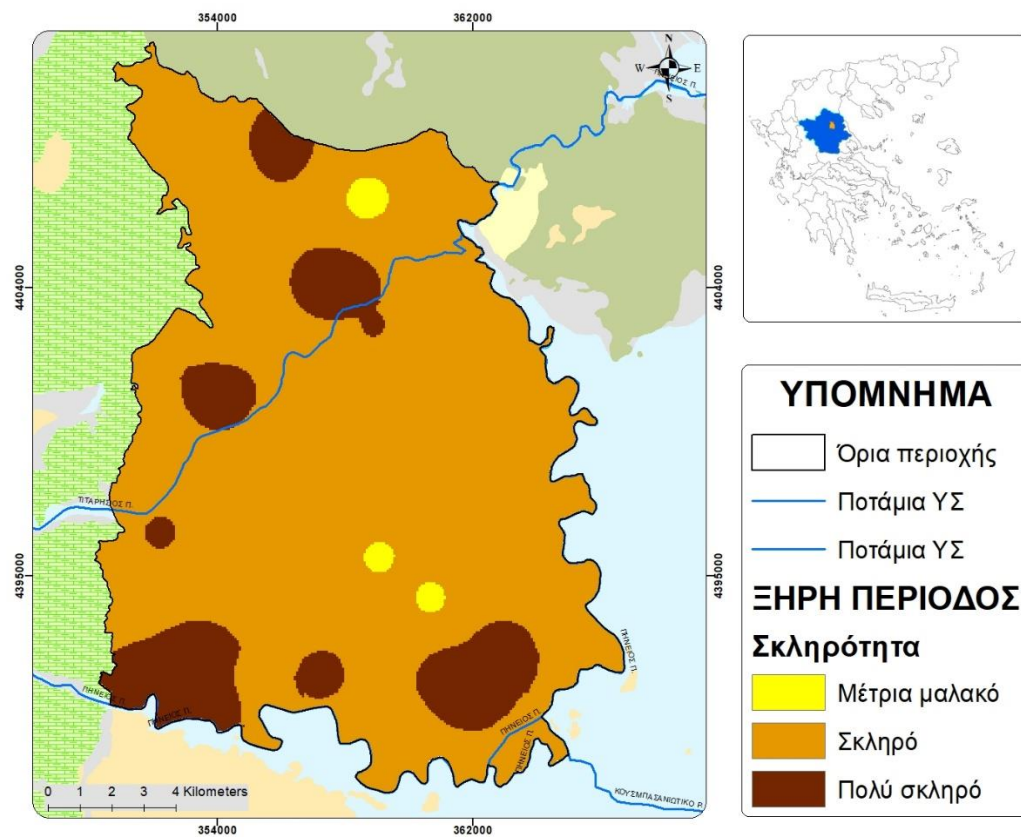
Διάγραμμα 8.2. Ταξινόμηση δειγμάτων υπόγειων υδάτων υγρής περιόδου (αριστερά) και ξηρής περιόδου (δεξιά) για την υπολεκάνη Τυρνάβου, βάση σκληρότητας κατά Sawyer et al. 1994.

Από την ταξινόμηση, δεν προκύπτουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ υγρής και ξηρής περιόδου με το μεγαλύτερο ποσοστό των δειγμάτων να κατατάσσονται στην κατηγορία του σκληρού νερού (67-68%) και την ελαφρά τάση αύξησης της τιμής της σκληρότητας κατά την ξηρή περίοδο. Ακολουθούν τα δείγματα που ανήκουν στην κατηγορία πολύ σκληρών νερών (22-25%) και ένα μικρό ποσοστό στην κατηγορία μέτριου νερού (7-9%). Τέλος, μόνο ένα 2% των συνολικών δειγμάτων ανήκει στην κατηγορία μαλακού νερού κατά την υγρή περίοδο μόνο.

Πανομοιότυπη είναι και η χωρική κατανομή των δειγμάτων για την υγρή και ξηρή περίοδο, η οποία παρουσιάζεται στις Εικόνες 8.13 και 8.14 αντίστοιχα. Με βάση την κατανομή αυτή φαίνεται ότι τα πιο σκληρά νερά εμφανίζονται κυρίως προς τη δυτική πλευρά της περιοχής και δευτερευόντως προς τα νότια. Απεναντίας, τα πιο μαλακά νερά κατανέμονται προς τα κεντρικά και ανατολικά τμήματα της υπολεκάνης. Η εικόνα αυτής της κατανομής είναι απολύτως αναμενόμενη καθώς, η κύρια πηγή ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου είναι ο καρστικός όγκος Δαμασίου-Τυρνάβου, στις δυτικές παρυφές της περιοχής. Η διάλυση που προκαλεί το νερό στα ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα του όγκου αυτού, έχουν ως αποτέλεσμα την αυξημένη σκληρότητα στα δείγματα κοντά στα πετρώματα αυτά και τη σταδιακή μείωση της σκληρότητας για τα δείγματα που βρίσκονται προς τα κεντρικά και ανατολικά τμήματα της υπολεκάνης.



Εικόνα 8.13. Χωρική κατανομή δειγμάτων νερού υγρής περιόδου με βάση την σκληρότητα τους.



Εικόνα 8.14. Χωρική κατανομή δειγμάτων νερού ξηρής περιόδου με βάση την σκληρότητα τους.

8.6.7 ΣΥΝΟΛΟ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ (TDS)

Τα συνολικά διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids) εκφράζουν τη συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων που εμπεριέχονται σε ένα δείγμα νερού. Το υπόγειο νερό κατά την κίνηση του διαμέσου των γεωλογικών σχηματισμών εμπλουτίζεται με τα διαλυτά συστατικά των πετρωμάτων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση των αλάτων του και άρα το TDS. Είναι επομένως λογικό ότι, η συγκέντρωση και το είδος των διαλυμένων στερεών να εξαρτάται από τη χημική σύσταση και την ορυκτολογία των πετρωμάτων, καθώς και από το χρόνο παραμονής του νερού στον υδροφόρο (Stamatis & Gartzos 1999).

Το TDS συνδέεται γραμμικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα σύμφωνα με τη σχέση (Taylor et al. 2018):

$$\text{TDS (mg/L)} = k_e \times \text{EC } (\mu\text{S/cm})$$

όπου k_e μια σταθερά αναλογικότητας.

Η σχέση TDS-EC επηρεάζεται από την ιοντική σύνθεση του νερού και τη συγκέντρωση των διαλυμένων σε αυτό συστατικών. Για τα περισσότερα φυσικά νερά η τιμή της σταθεράς k_e κυμαίνεται από 0.55 έως 0.85 (Walton 1989, Atekwana et al. 2004) και ο μέσος όρος των δύο αυτών ακραίων τιμών να είναι αυτός που συνήθως χρησιμοποιείται (Walton 1989).

Όπως και στην περίπτωση της σκληρότητας, υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταξινόμησης του νερού με βάση το TDS. Στον Πίνακα 8.11 παρουσιάζονται οι τιμές ταξινόμησης με βάση το TDS, κατά Davis & De Wiest (1996).

Πίνακας 8.11. Ταξινόμηση νερού βάσει τιμών του TDS κατά Davis & De Wiest 1996.

TDS (mg/L)	Χαρακτηρισμός
0 – 1,000	Γλυκό
1,000 – 10,000	Υφάλμυρο
10,000 – 100,000	Αλμυρό
>100,000	Υπεραλμυρό

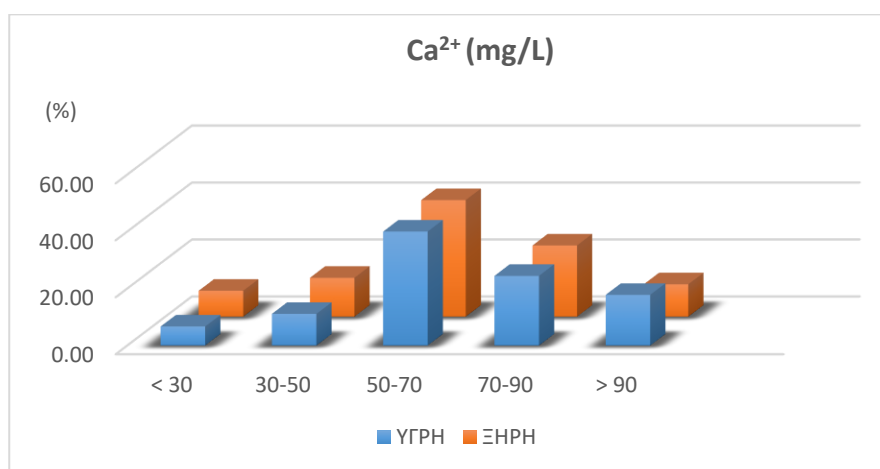
Όπως ειπώθηκε και για την ηλεκτρική αγωγιμότητα, έτσι και στην περίπτωση του TDS, λαμβάνοντας υπόψη τη γραμμική σχέση τους και $K_e < 1$, οι τιμές του TDS για την περιοχή έρευνας είναι αρκετά χαμηλές. Με βάση τα αποτελέσματα που επισυνάπτονται στο Παράρτημα 1, όλες οι τιμές του TDS των δειγμάτων των υπόγειων υδάτων της περιοχής, είναι κάτω από 1,000 mg/L. Εξάιρεση αποτελεί ένα δείγμα της ξηρής περιόδου με τιμή 1,375 mg/L, στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης. Ως εκ τούτου, όλα τα δείγματα χαρακτηρίζονται ως γλυκά με βάση την ταξινόμηση του Πίνακα 8.11, με την εξαίρεση του δείγματος που αναφέρθηκε και το οποίο χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο.

8.7 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

8.7.1 ΑΣΒΕΣΤΙΟ (Ca^{2+})

Το ασβέστιο (Ca^{2+}) αποτελεί βασικό συστατικό του υπόγειου νερού, με πηγή προέλευσής του τη διάλυση ορυκτών πλούσιων σε Ca^{2+} , όπως είναι ο ασβεστίτης, ο δολομίτης, η γύψος, τα ορυκτά της αργίλου, οι άστριοι, οι αμφίβολοι και οι πυρόξενοι. Μπορεί να προέρχεται επίσης από τη διάλυση πετρωμάτων, όπως ο ασβεστόλιθος, οι ασβεστιτικοί ψαμμίτες, τα κροκαλοπαγή, τα μάρμαρα, οι μάργες, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι κλπ. Στα φυσικά μη ρυπασμένα νερά οι φυσιολογικές τιμές της συγκέντρωσης του Ca^{2+} κυμαίνεται από 2 έως 200 mg/L, ενώ το ενδεικτικό επίπεδο για το πόσιμο νερό, σύμφωνα με την Οδηγία 80/778/EC (1980) ήταν αρχικά τα 100 mg/L. Σύμφωνα με τη νεότερη Οδηγία 98/93/ΕΚ (1998) ωστόσο, δεν ορίζεται ανώτερο όριο για τη συγκέντρωση του ασβεστίου. Μια μέση ημερήσια ανάγκη σε ασβέστιο για τον ανθρώπινο οργανισμό εκτιμάται στα 800 mg/L. Πολύ μικρότερες ποσότητες ασβεστίου από τις προτεινόμενες, συνδέονται με ανεπαρκή ανάπτυξη των οστών στα παιδιά και οστεοπόρωση στους ενήλικους. Μακροχρόνιες περιπτώσεις πρόσληψης μεγαλύτερων ποσοτήτων ασβεστίου από τις συνιστώμενες, μπορεί να προκαλέσει μείωση του μαγνησίου στον ορό του αίματος (Χαριζόπουλος 2013).

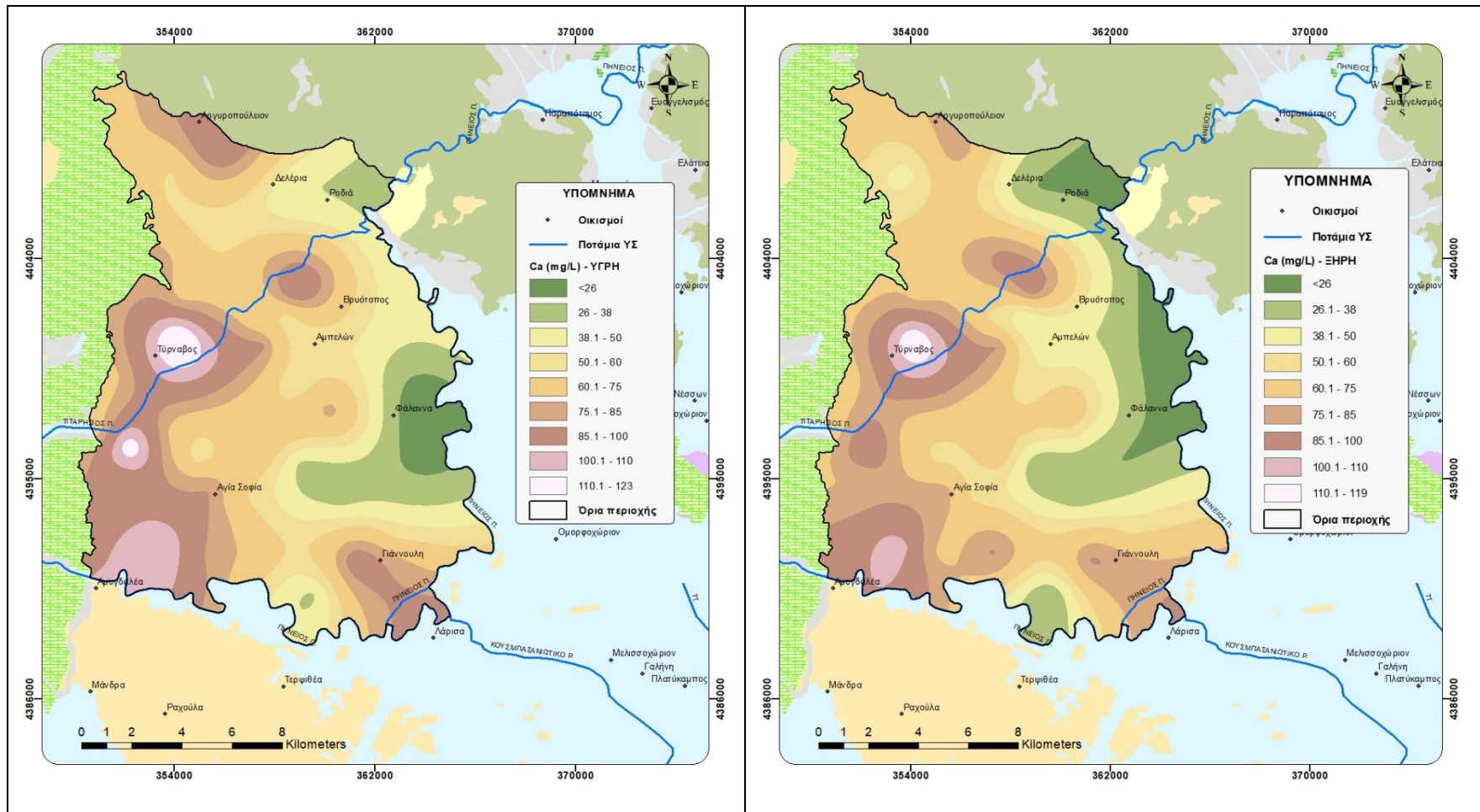
Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των δειγμάτων για τα υπόγεια νερά, οι συγκεντρώσεις του ασβεστίου κυμαίνονται από 14.66 έως 112.45 mg/L στην υγρή περίοδο (μέσος όρος των 2 υγρών περιόδων δειγματοληψίας) και από 22.41 έως 117.85 mg/L στην ξηρή περίοδο (μέσος όρος των 2 ξηρών περιόδων δειγματοληψίας). Στο Διάγραμμα 8.3 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων του ασβεστίου για την υγρή και την ξηρή περίοδο. Όπως προκύπτει από αυτό, δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των περιόδων, με την μεγαλύτερη συχνότητα τιμών (~40%) να ανήκει στην κλάση με εύρος 50-70mg/L.



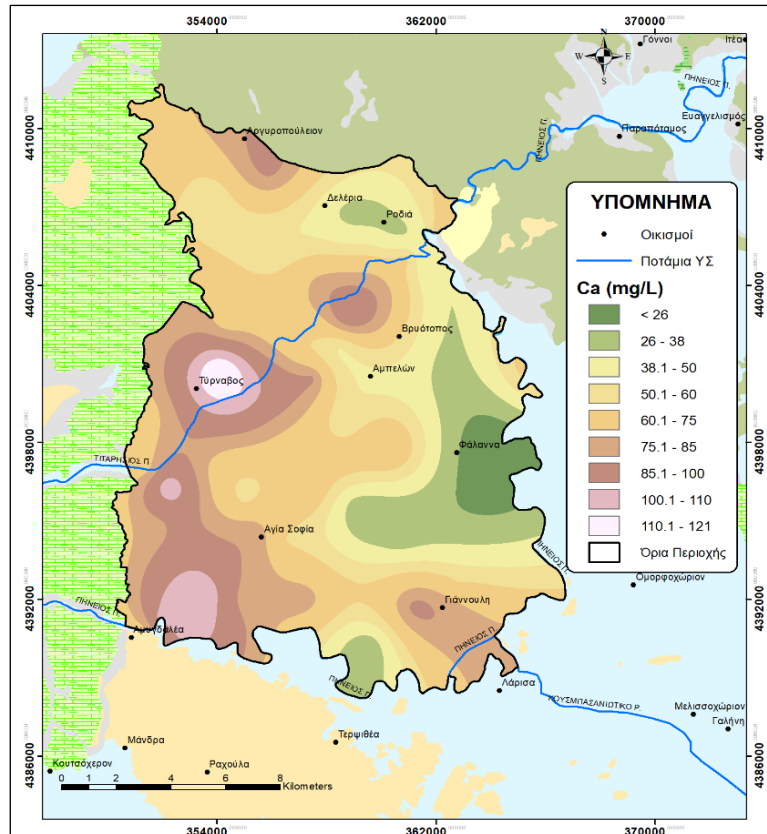
Διάγραμμα 8.3. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Ca^{2+} στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Στην Εικόνα 8.15 παρουσιάζεται ο χάρτης της χωρικής κατανομής των κατιόντων ασβεστίου, εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου για την υγρή (μέσος όρος των δύο υγρών περιόδων) και την ξηρή (μέσος όρος των δύο ξηρών περιόδων) περίοδο, ενώ στην Εικόνα 8.16 η χωρική κατανομή των μέσων τιμών των κατιόντων ασβεστίου για τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας. Οι τρεις αυτοί χάρτες παρουσιάζουν πανομοιότυπη χωρική κατανομή και όπως αναμενόταν, οι συγκεντρώσεις των κατιόντων ασβεστίου, παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές του στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης, πλησίον του καρστικού ασβεστολιθικού όγκου. Στην περιοχή αυτή λαμβάνει χώρα διαλυτοποίηση του CaCO_3 και ως εκ τούτου παράγονται επιπλέον κατιόντα ασβεστίου, αυξάνοντας σημαντικά τη συγκέντρωσή τους στο υπόγειο νερό. Απομακρυνόμενοι από τον καρστικό όγκο προς το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης, οι συγκεντρώσεις των ιόντων Ca^{2+} μειώνονται προοδευτικά και εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές τους στο ανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας. Είναι οι περιοχές όπου το υδατικό διάλυμα, κορεσμένο πλέον σε Ca^{2+} , αρχίζει να το αποθέτει υπό τη μορφή ιζήματος, μειώνοντας έτσι την περιεκτικότητά του στο νερό (σύμφωνα και με το Διάγραμμα 9.10 του επόμενου Κεφαλαίου).

Από τη χωρική κατανομή προκύπτει επίσης και μια ελαφρά διαφοροποίηση στις συγκεντρώσεις των ιόντων Ca^{2+} στα δυτικά περιθώρια. Όπως φαίνεται στις Εικόνες 8.15 και 8.16, οι συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες στην περιοχή της πόλης του Τυρνάβου και προς τα νότια (80-120 mg/L), ενώ βόρεια αυτής παρουσιάζονται μικρότερες (50-80 mg/L). Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται, όπως θα αναφερθεί αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο, στη διαφορά της έντασης τροφοδοσίας καθώς και στην κατά τόπους δολομιτίωση, που χαρακτηρίζει το ανθρακικό σύστημα (Panagorouλος 1995).



Εικόνα 8.15. Χωρική κατανομή των Ca^{2+} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



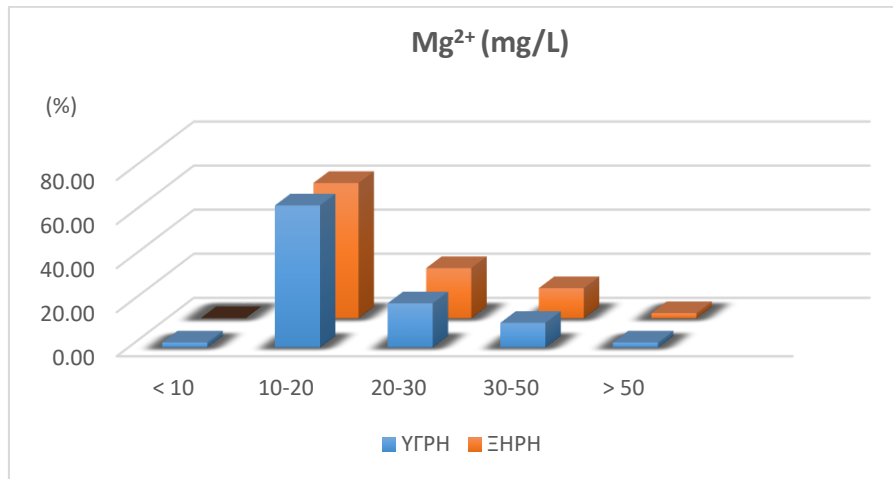
Εικόνα 8.16. Χωρική κατανομή των Ca^{2+} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.7.2 ΜΑΓΝΗΣΙΟ (Mg^{2+})

Σχετικά με το μαγνήσιο (Mg^{2+}), κύριες πηγές προέλευσης αποτελούν τα μαγνησιούχα ορυκτά, βασικότερα των οποίων είναι ο δολομίτης, ο μαγνησίτης, ο ολιβίνης, οι αμφίβολοι, οι πυρόξενοι και οι μαρμαρυγίες. Αντίστοιχα, πετρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο είναι οι δολομιτικοί ψαμμίτες και οι μαγνησιούχες μάργες. Στα φυσικά μη ρυπασμένα νερά οι φυσιολογικές τιμές της συγκέντρωσης του Mg^{2+} κυμαίνεται από 1.2 έως 48.6 mg/L (Καλλέργης 2000, Appelo & Postma 2005), ενώ το ανώτερο επίπεδο για το πόσιμο νερό, σύμφωνα με την Οδηγία 98/93/EC (1998), είναι τα 50mg/L. Το μαγνήσιο αποτελεί βασικό στοιχείο για τον ανθρώπινο οργανισμό καθώς συνδέεται με θεμελιώδεις ενζυματικές αντιδράσεις. Η συνιστώμενη ημερήσια δόση σε μαγνήσιο σχετίζεται με το φύλο και την ηλικία. Έτσι, 30mg είναι αρκετά για ένα νεογνό, ενώ έως την ηλικία των 18 η συνιστώμενη ημερήσια δόση φθάνει τα 410mg για τους άνδρες και 360mg για τις γυναίκες (National Institute of Health, <https://www.nih.gov/>). Στις μεγαλύτερες ηλικίες η ποσότητα αυτή διατηρείται περίπου σταθερή για τους άνδρες ενώ πέφτει στα 320mg για τις γυναίκες.

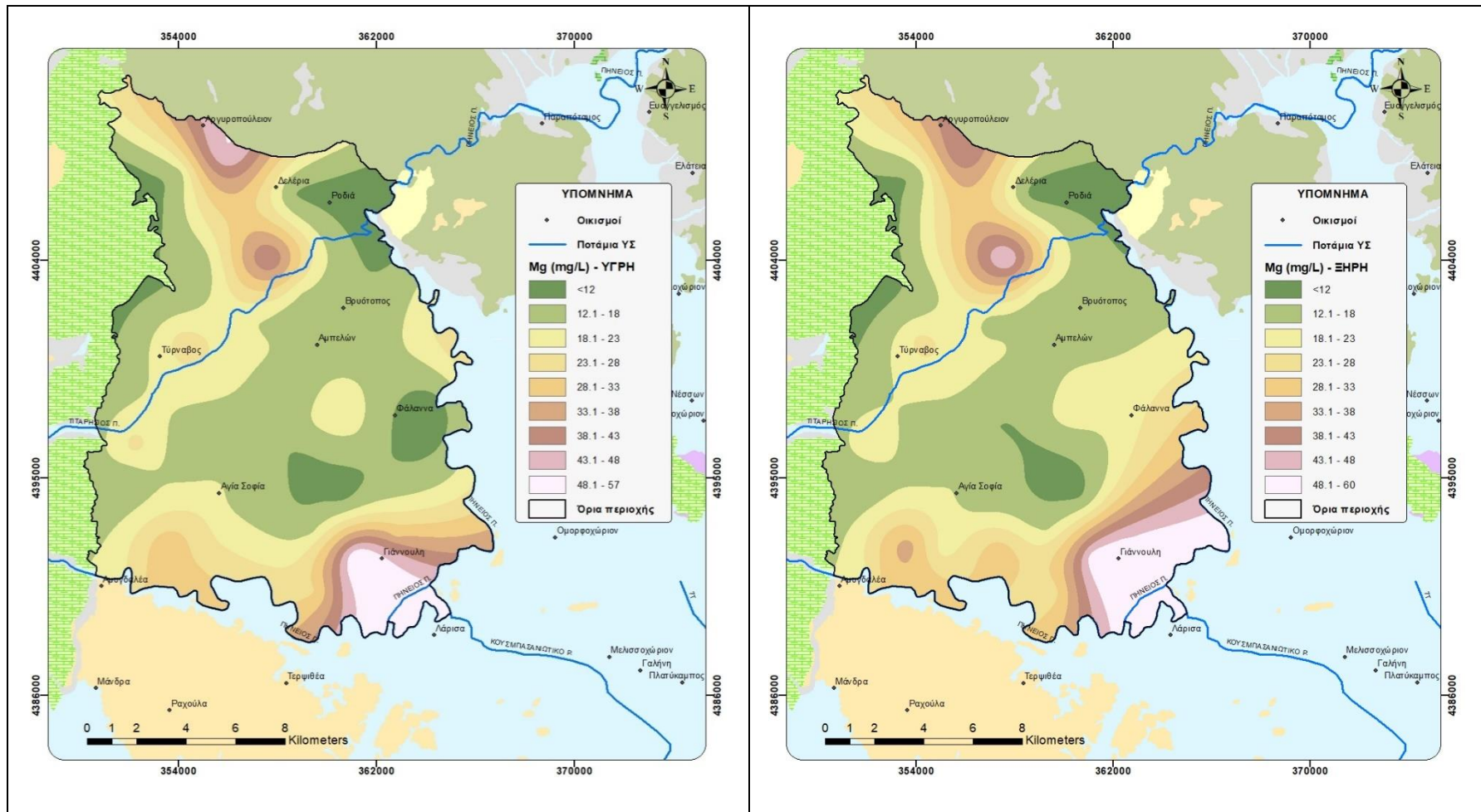
Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των δειγμάτων για τα υπόγεια νερά, οι συγκεντρώσεις του μαγνησίου κυμαίνονται από 24.18 έως 54.60 mg/L στην υγρή

περίοδο και από 23.50 έως 52.18 mg/L στην ξηρή περίοδο. Στο Διάγραμμα 8.4 φαίνεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων μαγνησίου για την υγρή και την ξηρή περίοδο. Και σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των περιόδων, με την μεγαλύτερη συχνότητα τιμών (~65%) να ανήκει στην κλάση με εύρος 10-20 mg/L.

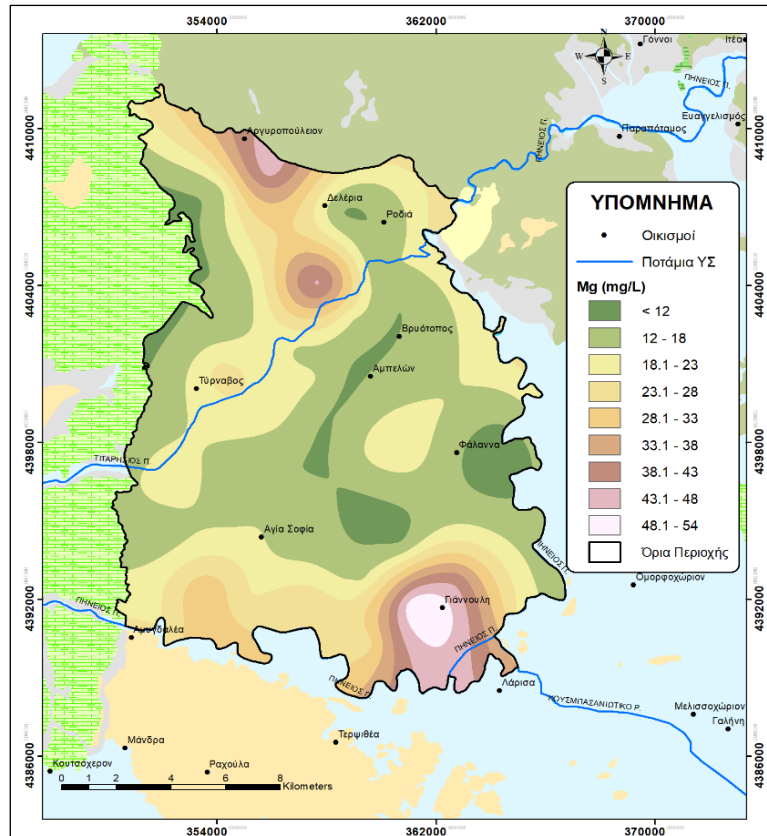


Διάγραμμα 8.4. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Mg²⁺ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Από τη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων του μαγνησίου (Εικόνες 8.17 και 8.18), προκύπτει ότι οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στο βόρειο τμήμα της υπολεκάνης, βόρεια από τον ποταμό Τιταρήσιο καθώς επίσης στην περιοχή της Γιάννουλης στα νοτιοανατολικά. Από την άλλη πλευρά, οι μικρότερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στα βορειοδυτικά κράσπεδα της περιοχής καθώς και στο κεντρικό τμήμα της, έως και τον οικισμό της Φαλλάνης. Πέραν της κύριας τροφοδοσίας από τα δυτικά, η ανάμειξη υδάτων διαφορετικής προελεύσεως, από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο στα βόρεια, από τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους (με την παρεμβολή μαργών) στα νότια αλλά και από τα ανατολικά (11^ο Κεφάλαιο), επηρεάζουν σαφώς την χωρική κατανομή του μαγνησίου. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι μεταβολές αυτές στις συγκεντρώσεις του μαγνησίου στα δυτικά και κεντρικά τμήματα, οφείλονται και στην περιοχική δολομιτίωση του ανθρακικού όγκου που βρίσκεται στα δυτικά περιθώρια της περιοχής. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις στο νότιο τμήμα της υπολεκάνης ελέγχονται κυρίως από φαινόμενα ιοντοανταλλαγής, τα οποία λαμβάνουν χώρα στη περιοχή αυτή, όπως θα ειπωθεί αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο.



Εικόνα 8.17. Χωρική κατανομή των Mg^{2+} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).

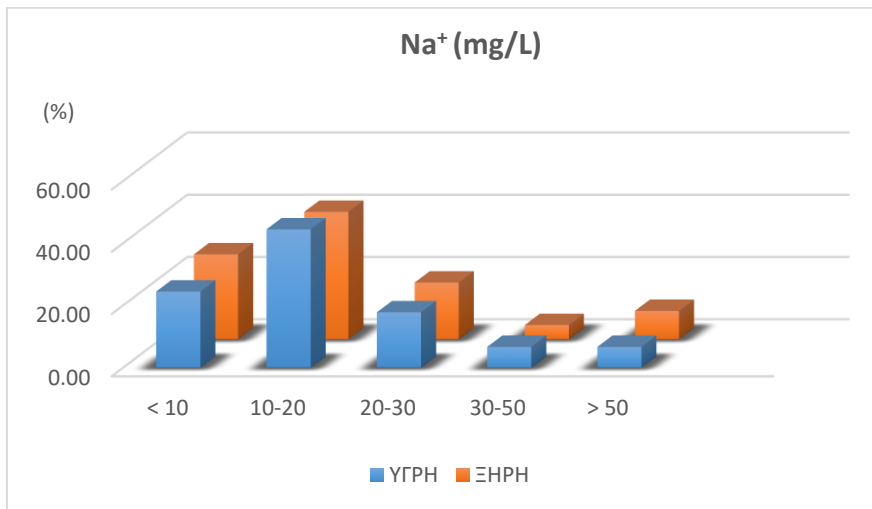


Εικόνα 8.18. Χωρική κατανομή των Mg^{2+} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.7.3 ΝΑΤΡΙΟ (Na^+)

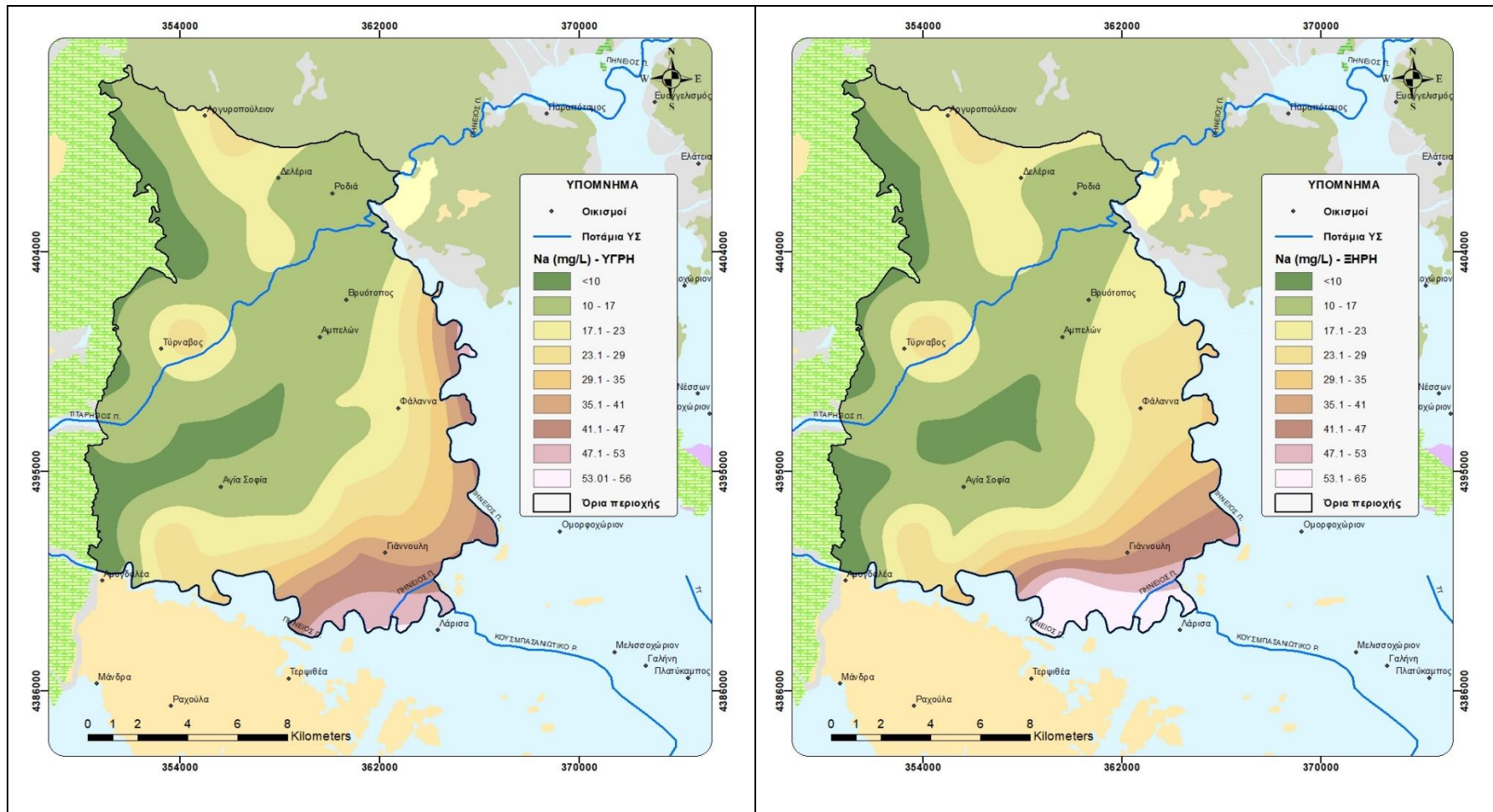
Το νάτριο (Na^+) στο υπόγειο νερό προέρχεται από τη διάλυση ορυκτών όπως οι νατριούχοι άστριοι, ο αλίτης, οι νατριούχοι αμφίβολοι και τα αργιλοπυριτικά ορυκτά του νατρίου. Από τα γνωστά πετρώματα, τα μαγματικά, οι ψαμμίτες οι άργιλοι και οι εβαπορίτες, είναι αυτά στα οποία το νάτριο απαντάται σε αφθονία. Επίσης, τα βιομηχανικά απόβλητα καθώς και η ανάμειξη του υπόγειου νερού με το θαλασσινό, λόγω διείσδυσης, αποτελούν πηγή προέλευσης του νατρίου (Αλεξιάκης 2002, Γαμβρουλά 2013). Στα φυσικά νερά (απουσία ρυπαντικού φορτίου), οι φυσιολογικές τιμές νατρίου κυμαίνονται από 2.3 έως 46 mg/L (Appelo & Postma 2005), ενώ το ενδεικτικό επίπεδο αναφοράς στα πόσιμα νερά είναι 20 mg/L, με μέγιστο επιτρεπτό τα 200 mg/L (ΦΕΚ 3282B/19-9-2017 για την Ελλάδα, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 98/83/ΕΚ). Αναφορικά με τις επιδράσεις του νατρίου στον ανθρώπινο οργανισμό αυτές είναι: (α) ρύθμιση της οσμωτικής πίεσης στα κύτταρα (σε συνδυασμό με το Κάλιο), (β) συμμετοχή στην διατήρηση της οξεο-βασικής ισορροπίας και μεταφοράς θρεπτικών στοιχείων στα κύτταρα, (γ) καθορισμός του ισοζυγίου νερού (υγρών γενικότερα) στο σώμα, (δ) υποστήριξη μυϊκών συσπάσεων και νευρικών αντιδράσεων και (ε) επηρεασμός της ισορροπίας των ιόντων του αίματος (<https://www.mednutrition.gr>).

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων για τα υπόγεια νερά προκύπτει ότι, οι συγκεντρώσεις του νατρίου κυμαίνονται από 6.89 έως 97.12 mg/L στην υγρή περίοδο και από 6.83 έως 286.69 mg/L στην ξηρή περίοδο. Στο Διάγραμμα 8.5 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων νατρίου για την υγρή και την ξηρή περίοδο, χωρίς ωστόσο να παρουσιάζονται διαφορές στην κατανομή των συχνοτήτων μεταξύ των περιόδων. Μεγαλύτερη συχνότητα τιμών (~44%) εμφανίζονται στην κλάση με εύρος 10-20 mg/L.

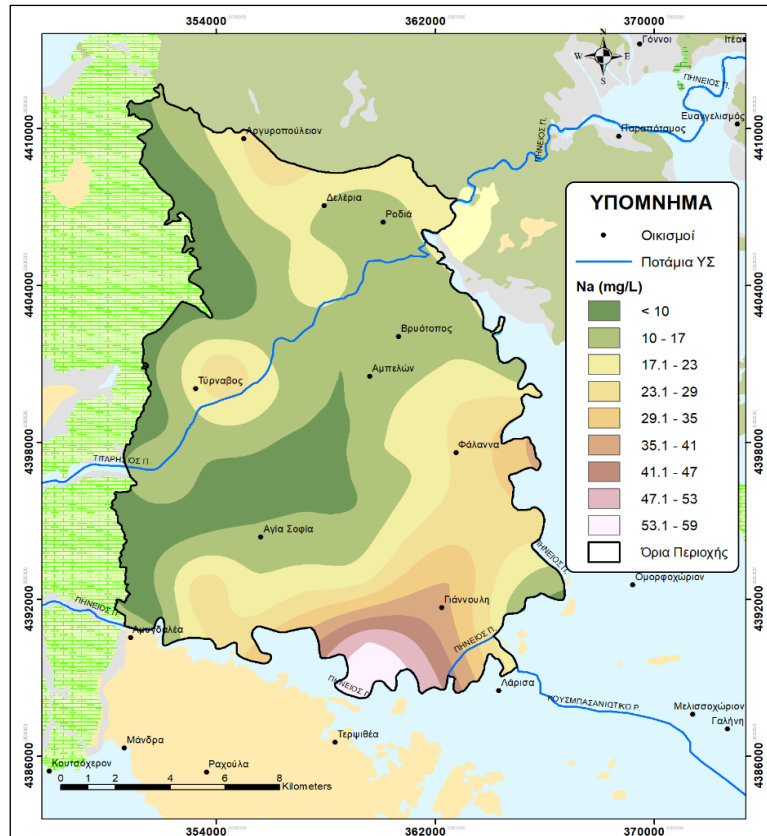


Διάγραμμα 8.5. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Na⁺ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Από τη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων του νατρίου (Εικόνες 8.19 και 8.20) παρατηρείται μια αύξηση των τιμών προς τα Α-ΝΑ της υπολεκάνης, γεγονός που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο κατά την υδροχημική ταξινόμηση των δειγμάτων του υπόγειου ύδατος. Το τμήμα αυτό με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις νατρίου, αντιπροσωπεύει μια μεταβατική κατάσταση από ζώνες έντονης τροφοδοσίας προς μια ζώνη περιορισμένης τροφοδοσίας και μεγαλύτερου χρόνου παραμονής του υπόγειου νερού στον υδροφόρο και την προοδευτική συμμετοχή μηχανισμών ιοντοανταλλαγής. Το αποτέλεσμα των αντιδράσεων αυτών είναι η αύξηση των Na⁺, εις βάρος κυρίως των Ca²⁺ (Κεφάλαιο 9, Σχέση 9.7).



Εικόνα 8.19. Χωρική κατανομή των Na^+ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



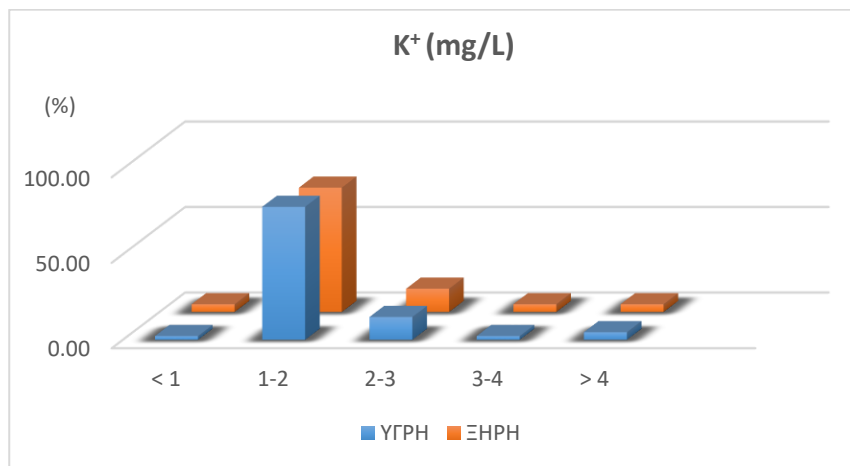
Εικόνα 8.20 Χωρική κατανομή των Na^+ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.7.4 ΚΑΛΙΟ (K^+)

Το κάλιο (K^+) στα υπόγεια νερά προέρχεται κυρίως από διάλυση καλιούχων αστρίων (ορθόκλαστου, μικροκλίνη) και του μοσχοβίτη. Τα μαγματικά πετρώματα και οι άργιλοι είναι πετρώματα με υψηλές συγκεντρώσεις καλίου (25,700 και 24,900 mg/kg, αντίστοιχα) ενώ στο θαλασσινό νερό η συγκέντρωση καλίου είναι 392 mg/kg (Matthess 1982, Χαριζόπουλος 2013). Στα φυσικά νερά, απουσία ρύπανσης, οι τιμές καλίου κυμαίνονται από 0.4 – 7.8 mg/L, με ενδεικτικό όριο ποσιμότητας τα 10 mg/L και μέγιστο επιτρεπτό τα 12 mg/L, σύμφωνα με την Οδηγία 98/93/ΕΚ (1998), του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου.

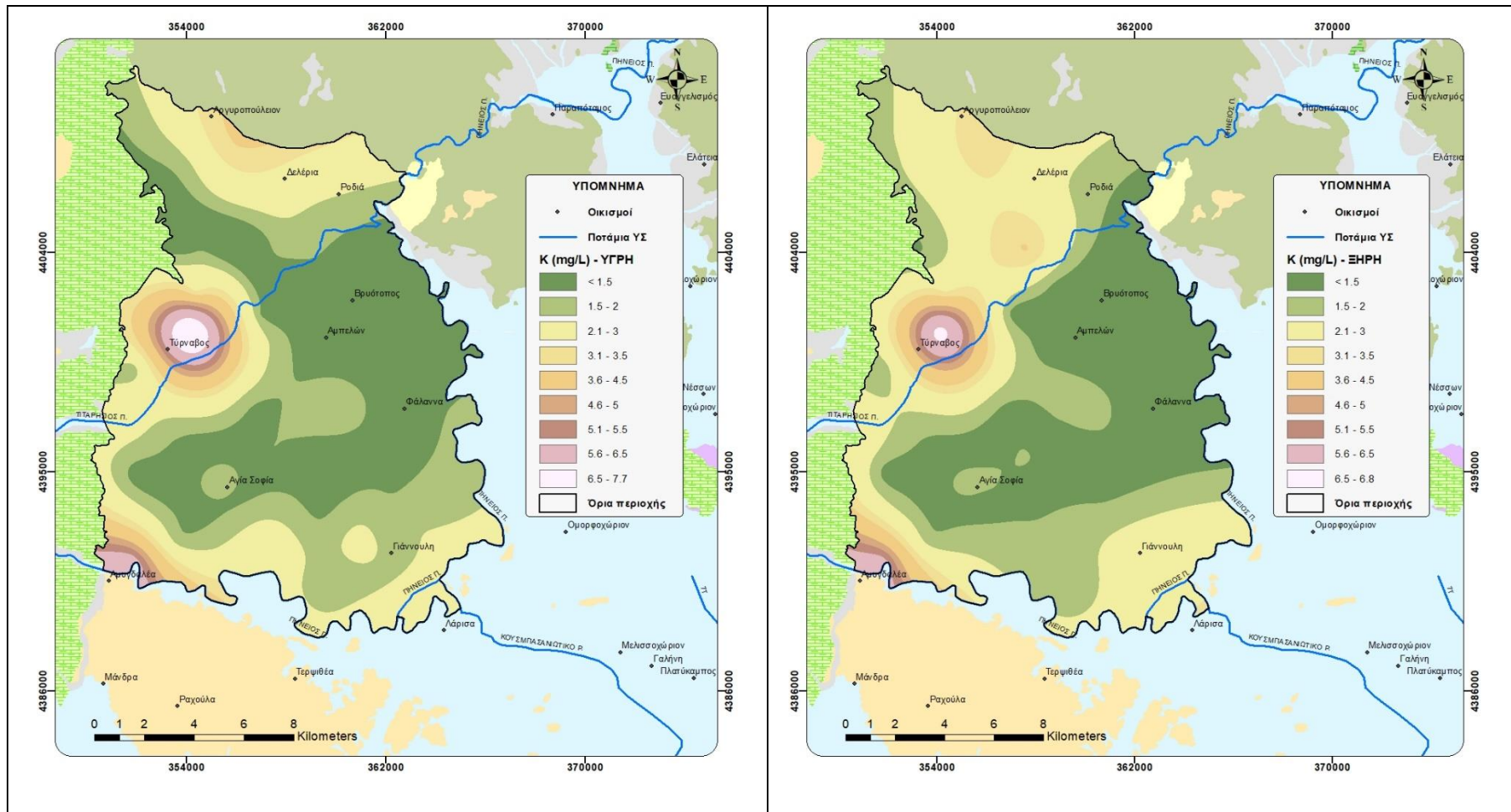
Για τον ανθρώπινο οργανισμό, το κάλιο είναι υψίστης σημασίας μεταλλικό στοιχείο και κύριο ενδοκυττάριο κατιόν. Διατηρεί στενή και ανταγωνιστική σχέση με το νάτριο και μαζί δουλεύουν ώστε να διατηρούν μια λεπτή ισορροπία ιόντων και υγρών στο σώμα. Αποτελεί θρεπτική ουσία για το σώμα και ως εκ τούτου η έλλειψή του είναι ανεπιθύμητη. Μια διατροφή ελλιπής σε κάλιο μπορεί να οδηγήσει σε συμπτώματα όπως κόπωση, μυϊκή αδυναμία, ανενεργά αντανακλαστικά, μη φυσιολογικός καρδιακός παλμός και σοβαροί πονοκέφαλοι. Τα άτομα με σοβαρή έλλειψη καλίου μπορεί επίσης να παρουσιάσουν υψηλή αρτηριακή πίεση, πόνο στα έντερα, οίδημα στους αδένες τους και διαβήτη (<https://www.itrofi.gr>).

Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των υπόγειων υδάτων της περιοχής, οι συγκεντρώσεις του καλίου κυμαίνονται από 0.95 έως 7.65 mg/L για την υγρή περίοδο και από 0.40 έως 6.76 mg/L για την ξηρή περίοδο. Στο Διάγραμμα 8.6 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων καλίου για την υγρή και την ξηρή περίοδο, χωρίς να παρουσιάζονται διαφορές στην κατανομή των συχνοτήτων μεταξύ των περιόδων. Η μεγαλύτερη συχνότητα τιμών (~75%) ανήκει στην κλάση με εύρος 1-2 mg/L.

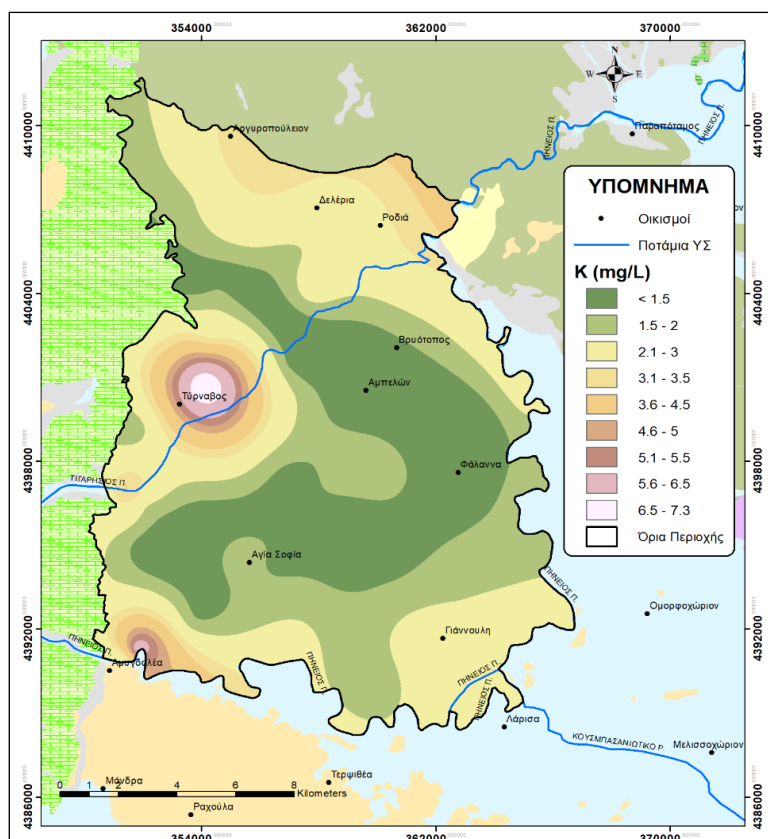


Διάγραμμα 8.6. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων K⁺ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων του καλίου (Εικόνες 8.21 και 8.22) δείχνει ότι οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στο δυτικό τμήμα της υπολεκάνης, γύρω από τις περιοχές των οικισμών Τυρνάβου και Αμυγδαλέας. Ενδιάμεσες τιμές παρουσιάζονται στο βόρειο-ΒΑ τμήμα, ενώ στο κεντρικό τμήμα της περιοχής οι συγκεντρώσεις αυτές ελαχιστοποιούνται. Αναφορικά με το ΒΑ και ΝΔ τμήμα της περιοχής, οι αυξημένες αυτές συγκεντρώσεις, μπορούν να δικαιολογηθούν, από τη διάλυση των καλιούχων ορυκτών, τα οποία υπάρχουν ως συστατικό στους γεωλογικούς σχηματισμούς πάνω και κάτω από τα αντίστοιχα τμήματα της περιοχής (σχιστόλιθοι-γενέσιοι στα βόρεια, αργιλώδεις μάργες στα νότια). Σημαντικό ρόλο έχουν επίσης τα καλιούχα λιπάσματα, τα οποία εφαρμόζονται στις δενδρώδεις καλλιέργειες και τους αμπελώνες καθώς και στις ετήσιες καλλιέργειες των δημητριακών. Ειδικά για την περιοχή του Τυρνάβου, οι μεγάλες συγκεντρώσεις του καλίου, δεν μπορούν να δικαιολογηθούν ως προϊόν διάλυσης ορυκτών γειτονικών σχηματισμών, επομένως αυτές εκτιμάται ότι οφείλονται στην ευρεία χρήση των καλιούχων λιπασμάτων, καθώς στη γύρω περιοχή επικρατούν τόσο οι δενδροκαλλιέργειες όσο και οι αμπελώνες.



Εικόνα 8.21. Χωρική κατανομή των K^+ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.22. Χωρική κατανομή των K^+ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.7.5 ΟΞΙΝΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (HCO_3^-)

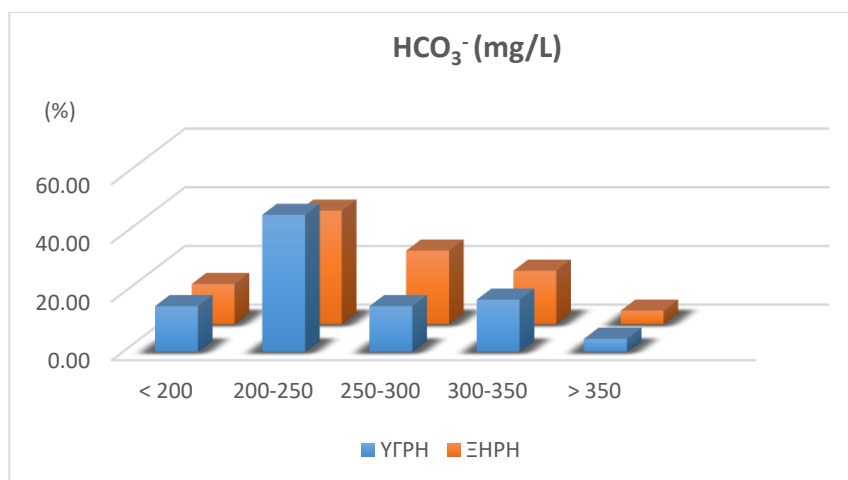
Βασική πηγή προέλευσης των όξινων ανθρακικών ιόντων (HCO_3^-), είναι η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων. Το διοξείδιο του άνθρακα τόσο στο έδαφος, προερχόμενο από τη σήψη οργανικής ύλης, όσο και στην ατμόσφαιρα, αποτελεί και αυτό βασική πηγή προέλευσης των HCO_3^- .

Αποτελούν σημαντικά ιόντα για τον ανθρώπινο οργανισμό καθώς αποτελούν ρυθμιστή του pH. Η συγκέντρωσή τους στα υπόγεια ύδατα οφείλεται κυρίως στη διάλυση του ασβεστίτη προς Ca^{2+} και HCO_3^- . Οι φυσιολογικές συγκεντρώσεις τους σε φυσικά νερά χωρίς ρυπαντικό φορτίο είναι 0 – 305 mg/L (Appelo & Postma 2005) με συνήθεις τιμές στα υπόγεια νερά ~200 mg/L και στα επιφανειακά ~58mg/L (Κελεπερτζής 2000).

Οι συγκεντρώσεις των HCO_3^- κυμαίνονται από 119.21 έως 410.66 mg/L για την υγρή περίοδο και από 118.02 έως 540.29 mg/L για την ξηρή περίοδο, σύμφωνα με τις εργαστηριακές αναλύσεις, που έγιναν στα υπόγεια νερά για την περιοχή έρευνας.

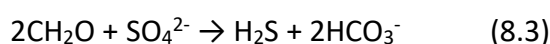
Στο Διάγραμμα 8.7 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων HCO_3^- για την υγρή και την ξηρή περίοδο, χωρίς να παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές στην

κατανομή των συχνοτήτων μεταξύ των περιόδων. Η μεγαλύτερη συχνότητα τιμών (40-45 %) ανήκει στην κλάση με εύρος 200-250 mg/L.

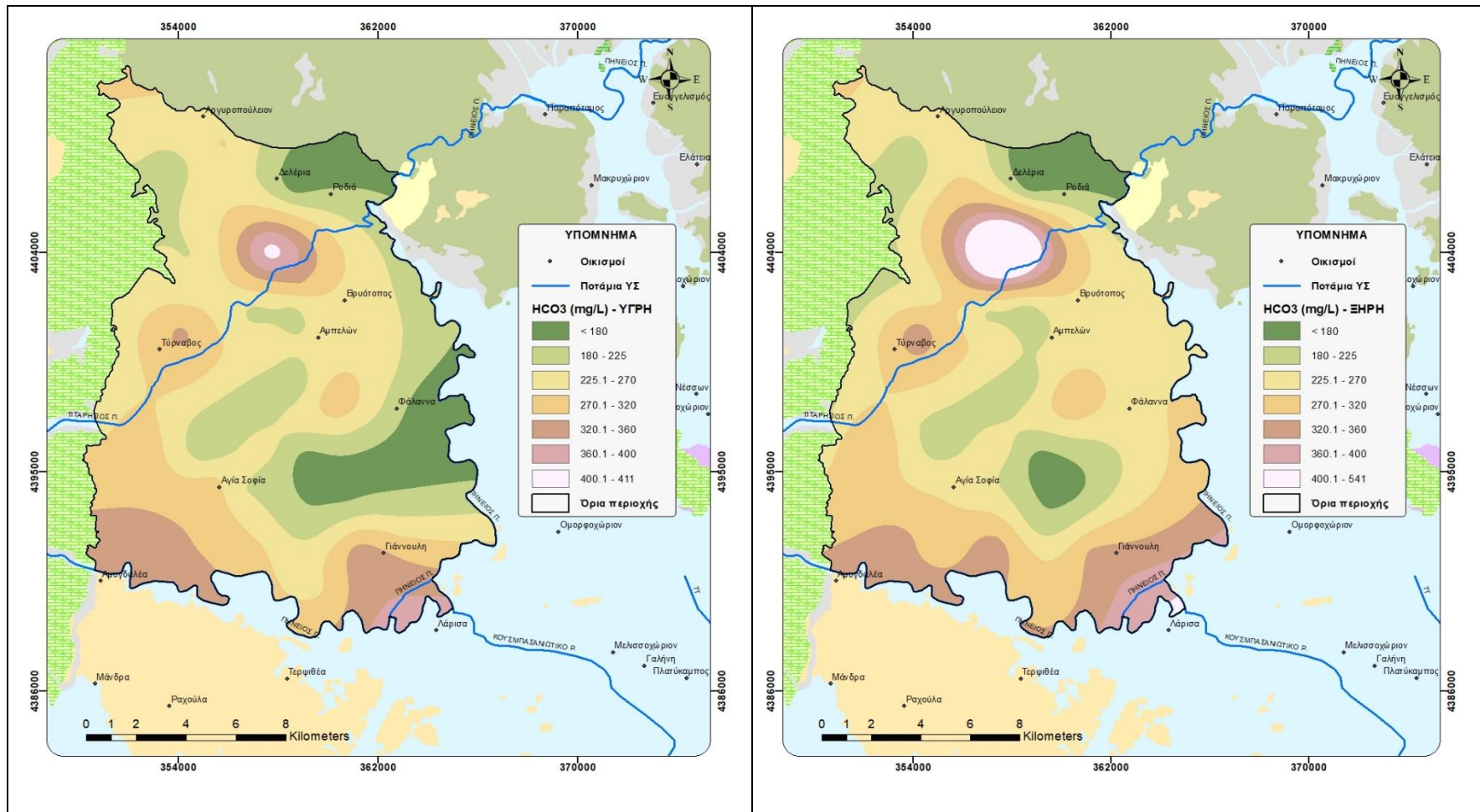


Διάγραμμα 8.7. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων HCO₃⁻ στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

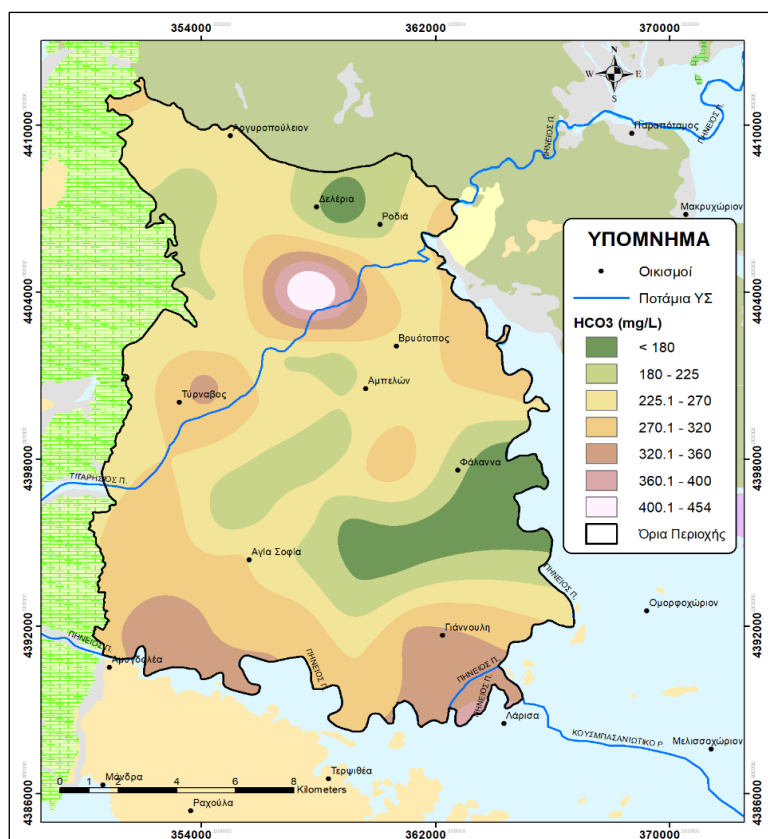
Στις Εικόνες 8.23 και 8.24 παρουσιάζονται οι χάρτες χωρικής κατανομής των ανιόντων HCO₃⁻, για την υγρή και την ξηρή περίοδο (ΜΟ των αντίστοιχων δύο περιόδων) καθώς και για το σύνολο των τεσσάρων δειγματοληψιών (μέσες τιμές). Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, η προέλευσή των ανιόντων HCO₃⁻ οφείλεται κυρίως στη διάλυση των ανθρακικών ορυκτών που κυριαρχούν στους καρστικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Ως συνέπεια αυτού, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των όξινων ανθρακικών ιόντων παρατηρούνται προς τη δυτική πλευρά της περιοχής έρευνας. Ωστόσο, υψηλές συγκεντρώσεις HCO₃⁻ εμφανίζονται και σε όλο το νότιο τμήμα της υπολεκάνης. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στην αναγωγή οργανικού υλικού από το SO₄²⁻, κατά την οποία παράγεται HCO₃⁻ σύμφωνα με την αντίδραση (Clark & Fritz 1997):



Το οργανικό υλικό υπάρχει σε αυξημένες συγκεντρώσεις στους Τεταρτογενείς σχηματισμούς (Τζιρίτης 2008), ενώ, όπως θα αναφερθεί στην επόμενη παράγραφο, τα θειικά ιόντα έχουν εντοπιστεί και αυτά σε αυξημένες συγκεντρώσεις στο νότιο τμήμα της περιοχής έρευνας.



Εικόνα 8.23. Χωρική κατανομή των HCO_3^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.24. Χωρική κατανομή των HCO_3^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

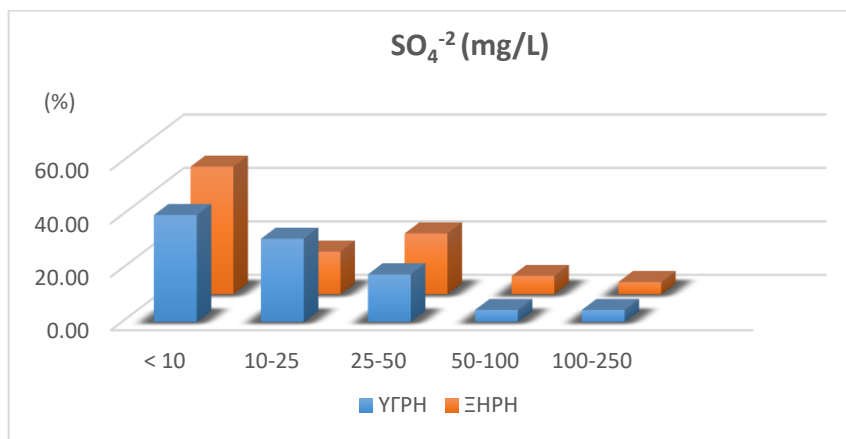
8.7.6 ΘΕΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (SO_4^{2-})

Οι βασικές πηγές προέλευσης των θειικών ιόντων (SO_4^{2-}) είναι η διάλυση θειούχων ορυκτών, όπως είναι η γύψος και ο ανυδρίτης, η οξείδωση θειούχων ενώσεων που εμφανίζονται σε αργιλικά και ηφαιστειακά πετρώματα, η οξείδωση της οργανικής ύλης των βιτουμινούχων ασβεστόλιθων κλπ. (Καλλέργης 2000, Βουδούρης 2009). Σημαντική είναι και η ανθρωπογενής επίδραση στην αύξηση των συγκεντρώσεων SO_4^{2-} στα υπόγεια νερά, με τη χρήση εντομοκτόνων, ζιζανιοκτόνων, θειικών λιπασμάτων και της ζωικής προελεύσεως οργανικής ύλης να αποτελούν τις βασικές αιτίες.

Η συγκέντρωση των θειικών ιόντων στο υπόγειο νερό δεν ξεπερνά τα 300 mg/L (Καλλέργης 2000), ενώ τιμές έως και 480 mg/L μπορούν να δικαιολογηθούν από την παρουσία γύψου ή/και ανυδρίτη (Appelo & Postma 2005). Υψηλότερες συγκεντρώσεις, θεωρείται ότι οφείλονται σε ρυπαντικά φαινόμενα. Για τα πόσιμα νερά το ενδεικτικό όριο συγκέντρωσης SO_4^{2-} είναι 25 mg/L, με ανώτατο όριο τα 250 mg/L (98/93/ΕΚ, 1998). Στον ανθρώπινο οργανισμό το θείο βρίσκεται κυρίως στις πρωτεΐνες και τα αμινοξέα αλλά υπάρχει επίσης, στα οστά, το δέρμα και τα κύτταρα. Βοηθάει τα κύτταρα να χρησιμοποιούν το οξυγόνο για την παραγωγή ενέργειας, μια κρίσιμη λειτουργία για όλες τις δραστηριότητες των κυττάρων, ενώ βοηθάει και το ανοσοποιητικό σύστημα. Μπορεί επίσης, να βοηθήσει τον

οργανισμό να καταπολεμήσει τις βακτηριακές λοιμώξεις και να συμβάλλει στον καθαρισμό από τοξίνες.

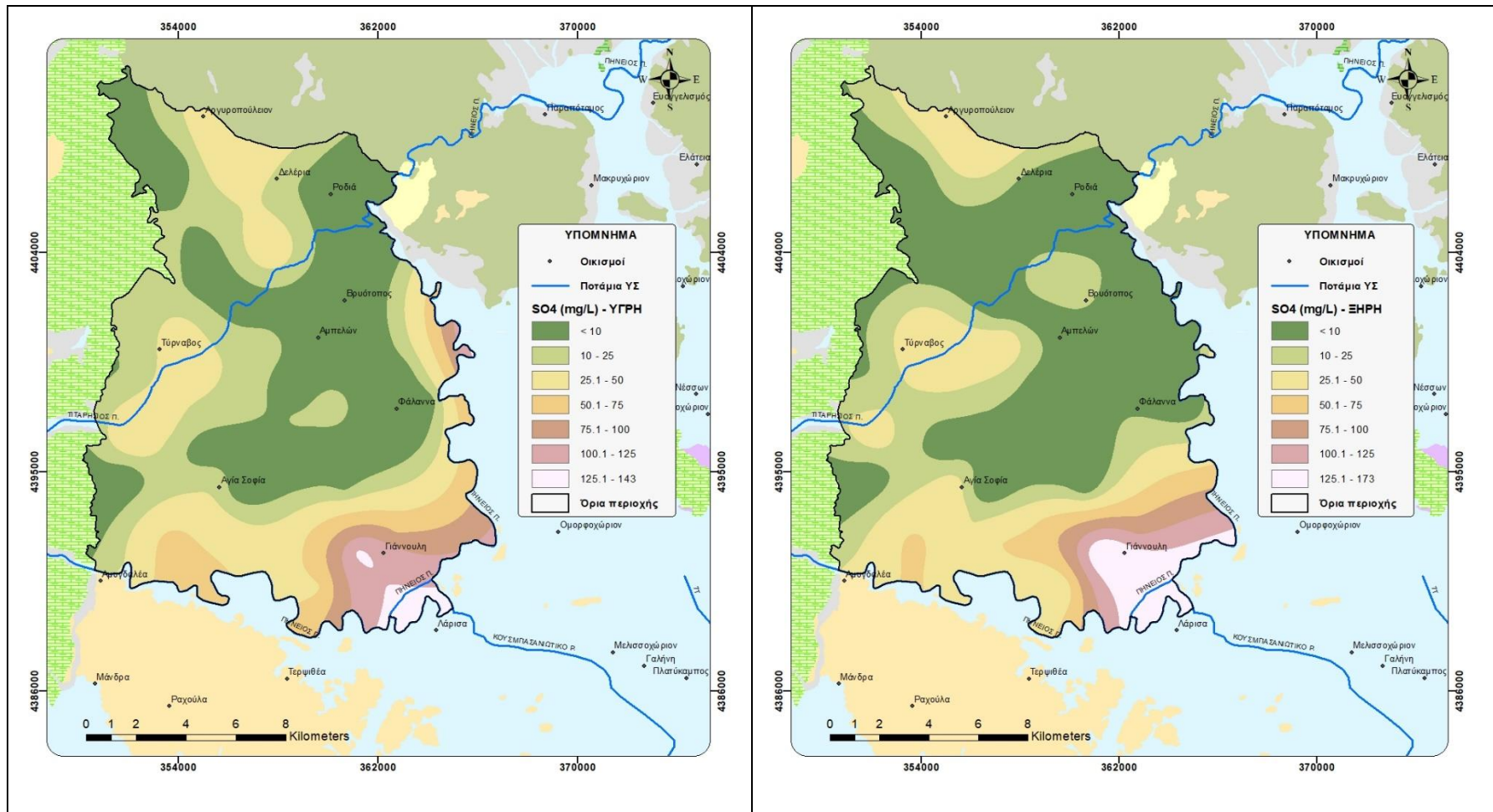
Αναφορικά με τις τιμές των συγκεντρώσεων των θειικών για την περιοχή έρευνας, κυμαίνονται από 0.11 έως 188.27 mg/L για την υγρή περίοδο και από 0.11 έως 229.53 mg/L στην ξηρή περίοδο. Στο Διάγραμμα 8.8 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων SO_4^{2-} για την υγρή και την ξηρή περίοδο. Στο σύνολό της η περιοχή έρευνας παρουσιάζει αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις θειικών. Το 40% των τιμών για την υγρή και το 47% για την ξηρή περίοδο βρίσκονται κάτω από τα 10 mg/L, ενώ μόνο 4 τιμές (2 υγρής και 2 ξηρής περιόδου) είναι μεταξύ 100-250 mg/L.



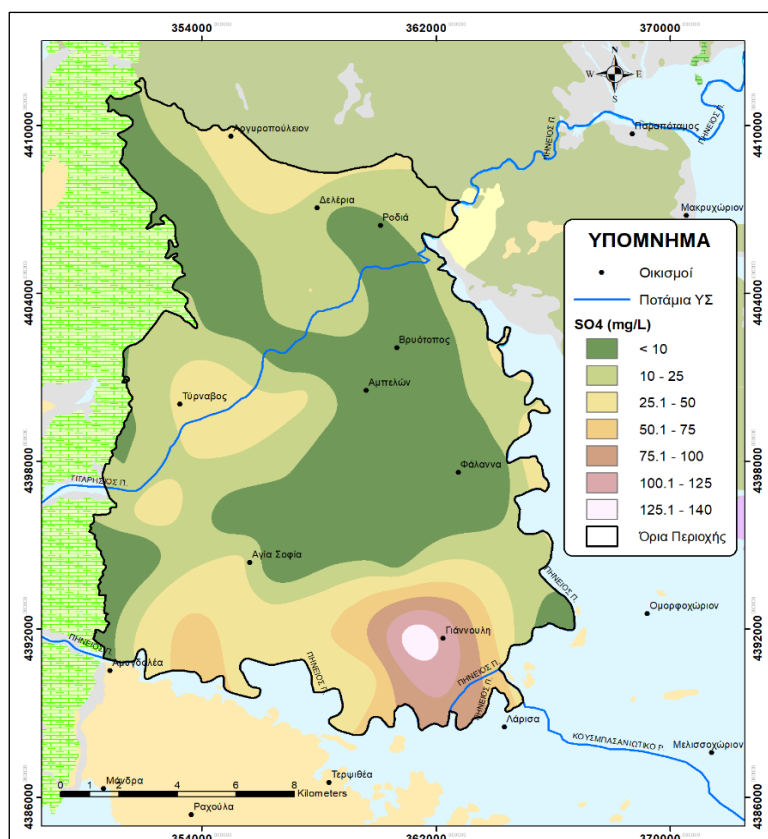
Διάγραμμα 8.8. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων SO_4^{2-} στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Από το χάρτη χωρικής κατανομής των Εικόνων 8.25 και 8.26 προκύπτει ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στο νότιο τμήμα της υπολεκάνης και πιθανότατα είναι και ο λόγος που στο τμήμα αυτό παρουσιάζονται υψηλές σχετικά συγκεντρώσεις των HCO_3^- (Αντίδραση 8.3). Στο υπόλοιπο μέρος της περιοχής έρευνας οι τιμές των θειικών ιόντων είναι χαμηλές και δεν ξεπερνούν τα 50 mg/L.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, μεταξύ των δειγμάτων που πάρθηκαν περιφερειακά της «στενής» περιοχής έρευνας, όπως αυτή οριοθετήθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο και παρουσιάζεται στους χάρτες χωρικής κατανομής, βρέθηκαν 2 περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων θειικών. Οι τιμές αυτές ήταν 306.23 mg/L στην υγρή περίοδο και 604.34 mg/L στην ξηρή περίοδο. Οι γεωτρήσεις με τις τιμές αυτές βρίσκονται ανατολικά του Πηνειού ποταμού και οι αυξημένες αυτές συγκεντρώσεις θα μπορούσαν να αποδοθούν στην αυξημένη χρήση θειούχων λιπασμάτων στην συγκεκριμένη ζώνη.



Εικόνα 8.25. Χωρική κατανομή των SO_4^{2-} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.26. Χωρική κατανομή των SO_4^{2-} (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.7.7 ΧΛΩΡΙΟ (Cl⁻)

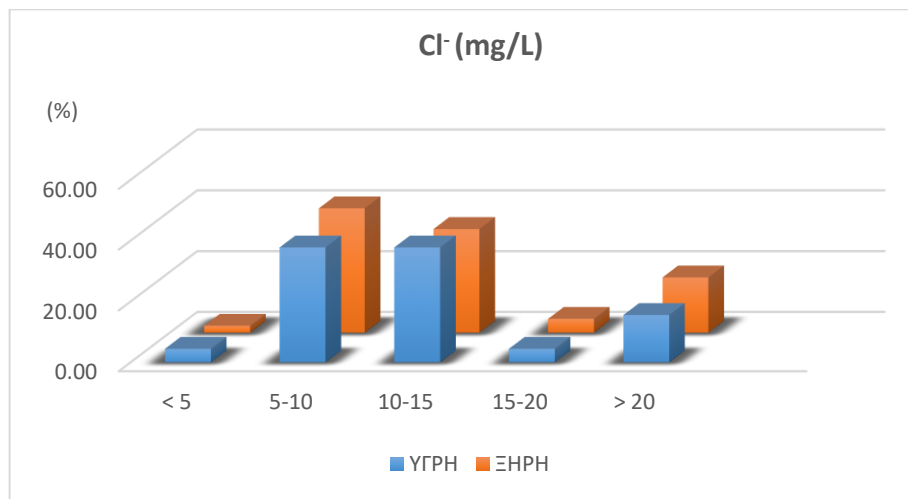
Βασικό συστατικό του νερού αποτελεί το χλώριο (Cl⁻), το οποίο έχει ως κύριες πηγές προέλευσης, τα ιζηματογενή πετρώματα αργιλικών ορυκτών θαλάσσιας προέλευσης και τους εβαπορίτες (Appelo & Postma 2005). Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης στους υδροφόρους αποτελεί και αυτό πηγή χλωρίου, όπου υφίσταται. Πηγή χλωρίου μπορεί να είναι και η διαδικασία της μεταφοράς θαλασσινού νερού στη χερσαία επιφάνεια μέσω των ανέμων και της βροχόπτωσης. Η αλατότητα του βρόχινου νερού στις νησιωτικές και παράκτιες περιοχές είναι υψηλότερη σε σύγκριση με την ενδοχώρα, καθώς οι υγρές αέριες μάζες πάνω από τη θάλασσα μεταφέρουν σταγονίδια πλούσια σε άλατα. Έτσι, η απόθεση του πλούσιου σε άλατα βρόχινου νερού επιδρά σημαντικά στο χημισμό των υπόγειων νερών στις περιοχές αυτές (Lamprakis et al. 2000, Γαμβρουλά 2013, Χαριζόπουλος 2013).

Οι τιμές των συγκεντρώσεων του χλωρίου στα νερά χωρίς ρυπαντικό φορτίο κυμαίνονται μεταξύ 1.8-71 mg/L (Appelo & Postma 2005). Το επιθυμητό όριο για το πόσιμο νερό είναι 25 mg/L ενώ ως ανώτατο όριο ποσιμότητας θεσπίστηκε αυτό των 250 mg/L (98/93/ΕΚ 1998).

Το χλώριο είναι το πρώτο σε περιεκτικότητα ανιόν του εξωκυττάριου χώρου, όπου μαζί με το νάτριο δρα ως βασικός ηλεκτρολύτης ρυθμίζοντας την οσμωτική πίεση και την

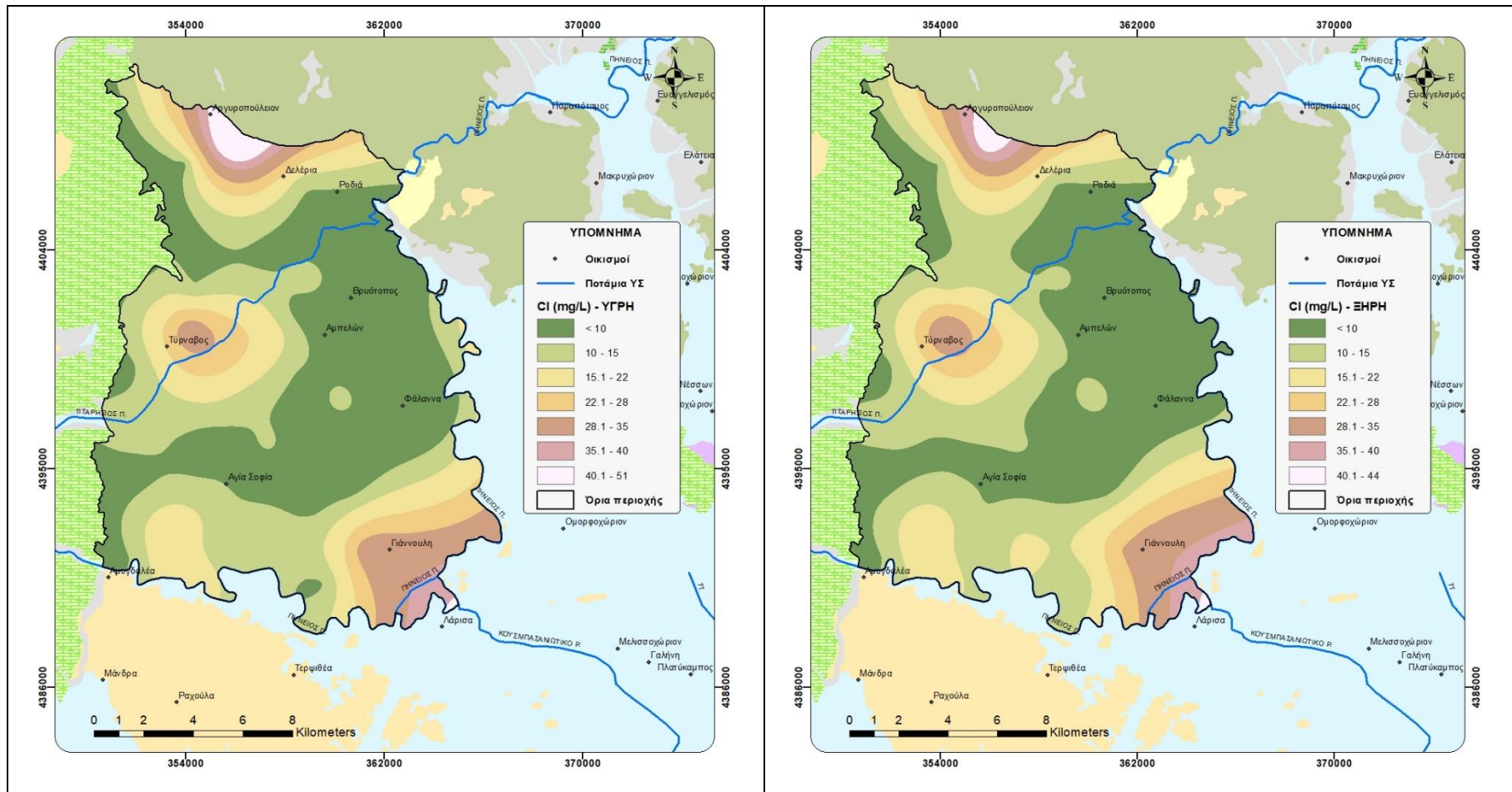
ισορροπία του νερού στο σώμα. Επίσης, το χλώριο απαιτείται για τη σύνθεση του υδροχλωρικού οξέος στο στομάχι. Είναι απαραίτητο στις περιπτώσεις δυσπεψίας και βοηθητικό σε πολλές στομαχικές διαταραχές. Σε περιπτώσεις έλλειψης χλωρίου, παρατηρείται μείωση της μυϊκής δύναμης, τα δόντια αρχίζουν να καταστρέφονται και μειώνεται η ικανότητα πέψης των τροφών του οργανισμού. Για το χλώριο η επαρκής πρόσληψη κυμαίνεται από 1,800 έως 2,300 mg την ημέρα για τις ανάγκες των υγιών ενηλίκων (<https://www.mednutrition.gr>).

Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των δειγμάτων για τα υπόγεια νερά, οι συγκεντρώσεις του χλωρίου κυμαίνονται από 4.77 έως 50.19 mg/L στην υγρή περίοδο και από 4.67 έως 43.67 mg/L στην ξηρή περίοδο. Στο Διάγραμμα 8.9 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων του χλωρίου για την υγρή και την ξηρή περίοδο. Παρόμοιες είναι οι συχνότητες των τιμών του χλωρίου μεταξύ των περιόδων, με μεγαλύτερες αυτές των κλάσεων 5-10 mg/L (~40%) και 10-15 mg/L (~35%).

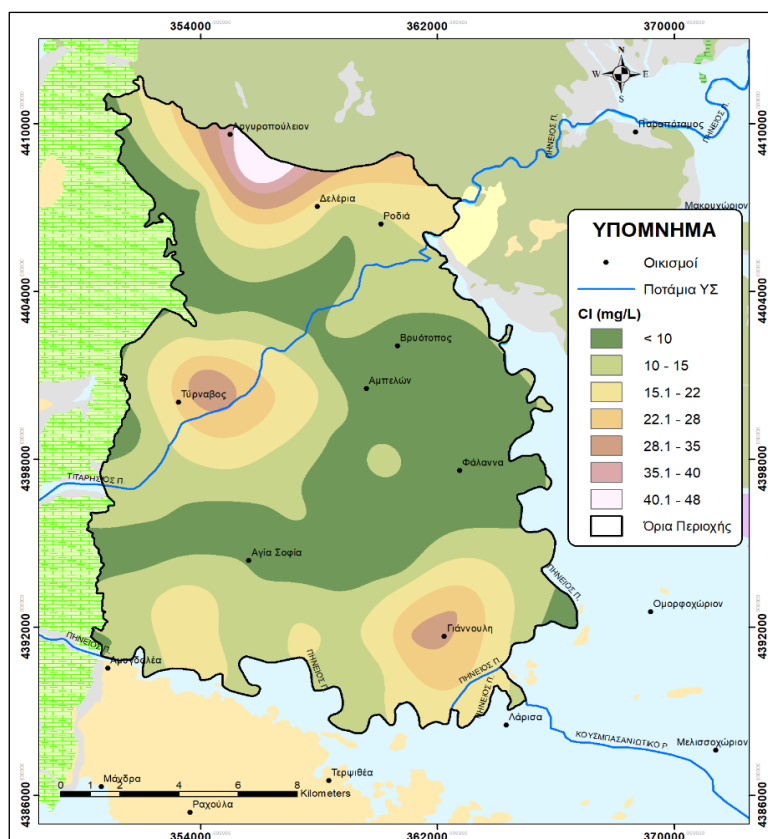


Διάγραμμα 8.9. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων SO_4^{2-} στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Από τους χάρτες χωρικής κατανομής (Εικόνες 8.27 και 8.28) προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των χλωριόντων παρατηρούνται στα βόρεια κράσπεδα της υπολεκάνης καθώς και γύρω από τους οικισμούς Τυρνάβου και Γιάννουλης. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις Cl^- όταν συνδέονται με υψηλές συγκεντρώσεις NO_3^- υποδεικνύουν συνήθως προέλευση από χημικά λιπάσματα (Wei et al. 2017). Το γεγονός ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση των Cl^- με τα NO_3^- στην περιοχή, υποδεικνύει ότι η ρύπανση ανθρωπογενούς προέλευσης, είναι η κύρια πηγή της παρουσίας των μεγαλύτερων συγκεντρώσεων των ιόντων αυτών, στα συγκεκριμένα τμήματα της περιοχής.



Εικόνα 8.27. Χωρική κατανομή των CI (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.28. Χωρική κατανομή των Cl⁻ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.7.8 ΝΙΤΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (NO₃⁻)

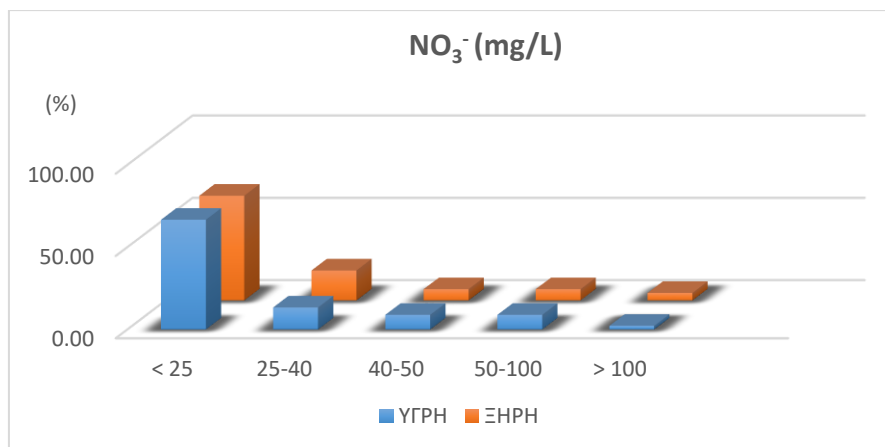
Τα νιτρικά ιόντα (NO₃⁻) αποτελούν το τελικό προϊόν της φυσικής αποσύνθεσης οργανικών αζωτούχων ενώσεων και προέρχονται από ζωικά περιττώματα, λιπάσματα ή προηγούμενη χρήση του νερού από τον άνθρωπο. Η περιεκτικότητα των υπόγειων νερών σε νιτρικά είναι συνάρτηση τόσο ανθρωπογενών όσο και φυσικών παραγόντων, όπως ο τύπος των υδροφόρων (ελεύθεροι ή υπό πίεση), οι οξειδοαναγωγικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτούς, οι ιδιότητες του πετρώματος και το πάχος της ακόρεστης ζώνης (Λάμπας 2018).

Λόγω της μεγάλης διαλυτότητάς του το άζωτο (N) σπανίζει στα πετρώματα, όμως λόγω της ευρείας χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων οι ενώσεις του αζώτου βρίσκονται σε αφθονία στα υπόγεια νερά. Τα αζωτοβακτήρια, κάτω από αερόβιες συνθήκες, μετατρέπουν το οργανικό άζωτο σε ανόργανο για να μπορέσει να αφομοιωθεί απ' τα φυτά. Η περίσσεια του ανόργανου αζώτου εμπλουτίζει τους υδροφόρους με το νερό αποστράγγισης (Καλλέργης 2000). Το άζωτο στο υπόγειο νερό γενικά προέρχεται από πηγές του αζώτου, οι οποίες βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, στην εδαφική ζώνη ή σε ρηχές υπεδαφικές ζώνες, όπου θάβονται απόβλητα πλούσια σε αυτό (Μυριούνης 2008). Οι φυσιολογικές τιμές των νιτρικών ιόντων στα φυσικά νερά, απουσία ρύπανσης, κυμαίνεται από 0.1-12.4 mg/L (Appelo & Postma 2005), ενώ ως γενικά αποδεκτό όριο συγκέντρωσης

νιτρικών ιόντων φυσικού υποβάθρου υιοθετείται από την επιστημονική κοινότητα η τιμή των 10 mg/L.

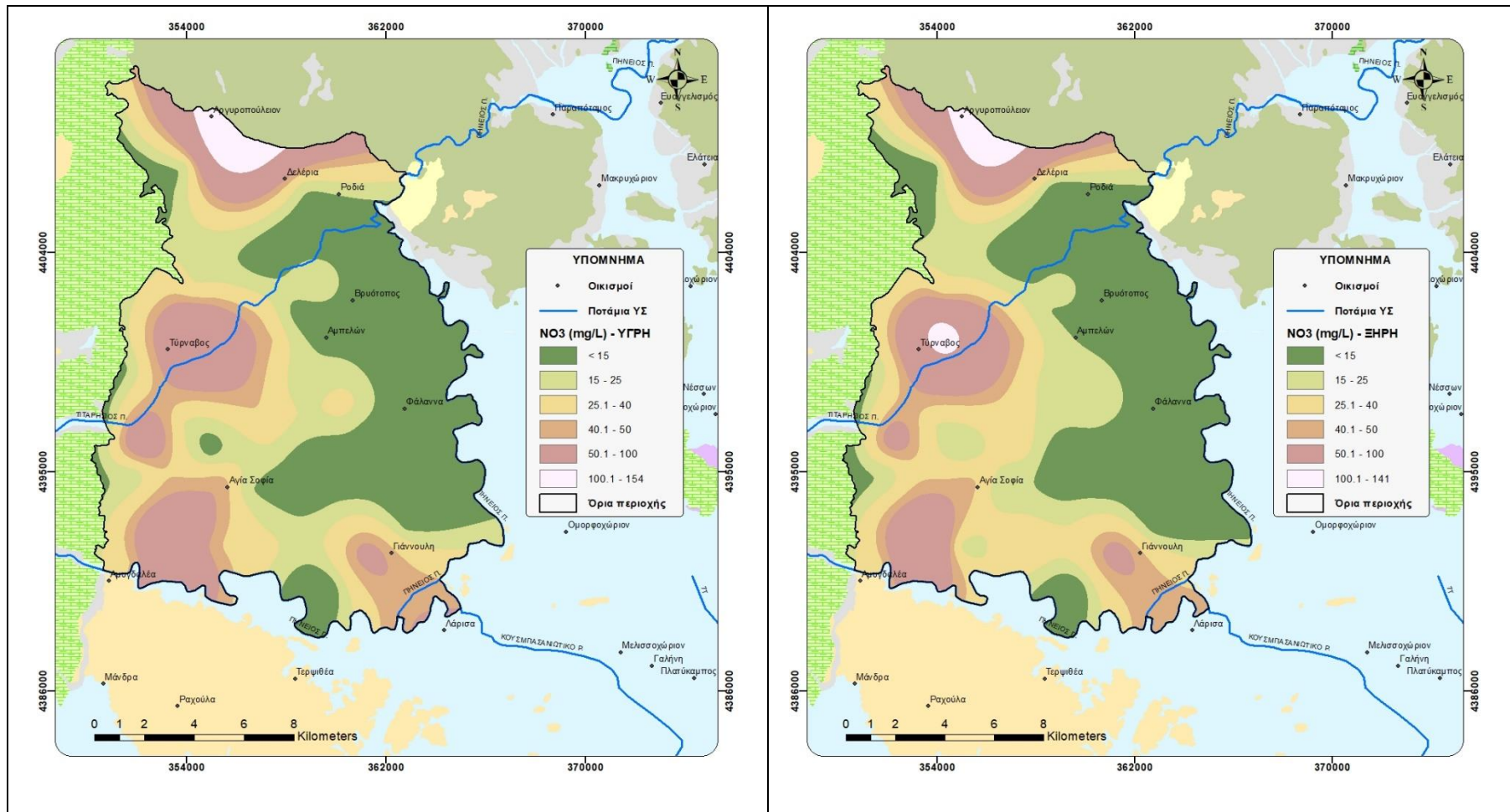
Αναφορικά με τα πόσιμα ύδατα η ανώτερη αποδεκτή συγκέντρωση νιτρικών είναι τα 50 mg/L (98/93/ΕΚ 1998). Αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών, πέραν του ορίου αυτού, στο πόσιμο νερό, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες για τον άνθρωπο, όπως ο καρκίνος. Λόγω της αναγωγής τους σε νιτρώδη είναι ιδιαίτερα επιβλαβή στα βρέφη, προκαλώντας μεθαιμοσφαιριναιμία ενώ έχουν καταγραφεί και αποβολές εγκύων γυναικών από την συστηματική κατανάλωση νερού υψηλών συγκεντρώσεων σε νιτρικά.

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των υπόγειων υδάτων της περιοχής, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων κυμαίνονται από 0.00 έως 152.48 mg/L για την υγρή περίοδο και από 0.65 έως 132.26 mg/L για την ξηρή περίοδο. Στο Διάγραμμα 8.10 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων νιτρικών για την υγρή και την ξηρή περίοδο, χωρίς να παρουσιάζονται διαφορές στην κατανομή των συχνοτήτων μεταξύ των περιόδων. Η μεγαλύτερη συχνότητα τιμών (~65%) βρίσκεται κάτω από τα 25 mg/L ωστόσο δεν απουσιάζουν και συγκεντρώσεις πάνω από το κρίσιμο όριο των 50 mg/L αλλά και κάποιες που υπερβαίνουν κατά πολύ τα 100 mg/L.

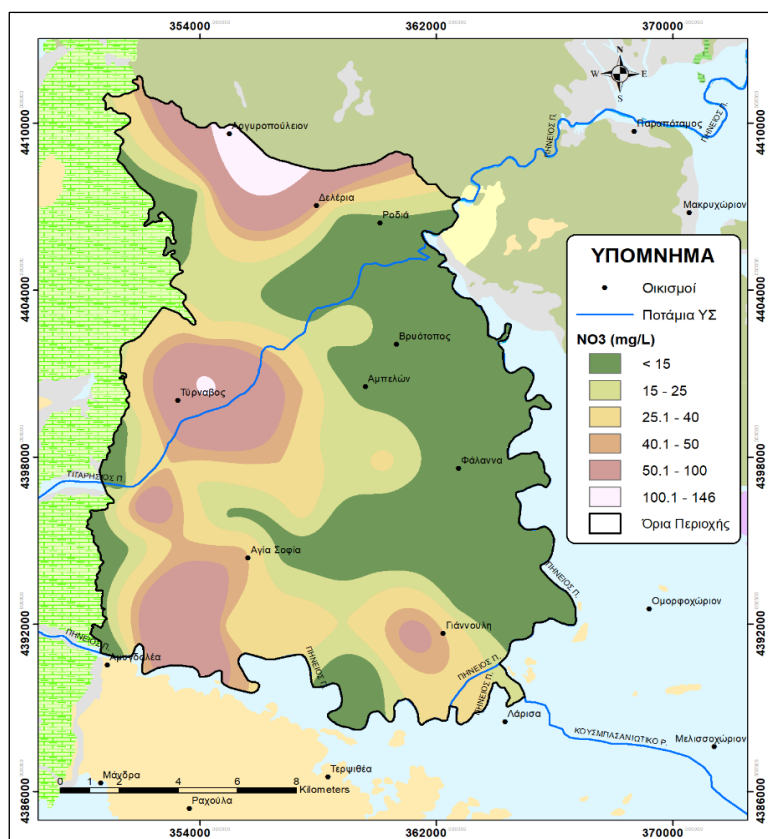


Διάγραμμα 8.10. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων NO_3^- στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Η χωρική κατανομή των γεωτρήσεων, των οποίων οι τιμές παρουσιάζουν υπερβάσεις, δημιουργεί μια κατακόρυφη ζώνη παράλληλη με τα κράσπεδα στο δυτικό τμήμα της υπολεκάνης (Εικόνες 8.29 και 8.30), ενώ στο ΝΑ τμήμα αυτής υπάρχουν γεωτρήσεις, που υπερβαίνουν το θεσπισμένο όριο των 50 mg/L. Η παρουσία των αυξημένων αυτών συγκεντρώσεων, στις συγκεκριμένες περιοχές, έχει αποδοθεί σε μία σειρά παραγόντων, οι οποίοι αναφέρονται στο Κεφάλαιο 12, όπου αναλύονται οι ασκούμενες πιέσεις στην περιοχή έρευνας.



Εικόνα 8.29. Χωρική κατανομή των NO₃⁻ (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.30. Χωρική κατανομή των NO_3^- (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.8 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

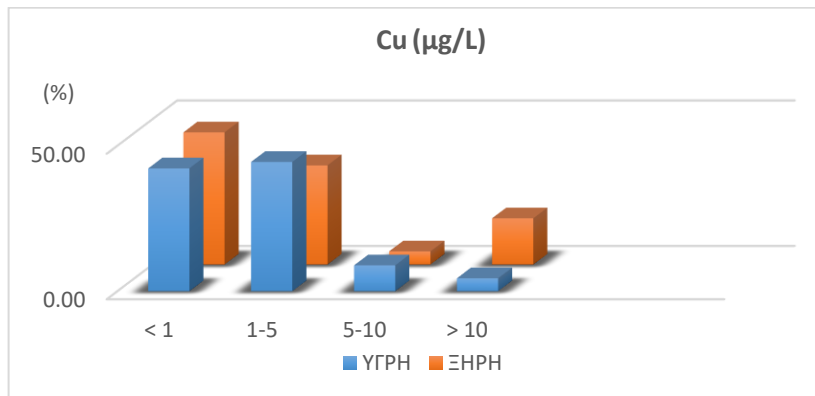
8.8.1 ΧΑΛΚΟΣ (Cu)

Γενικά, η προέλευση του χαλκού (Cu) στα υπόγεια νερά συνδέεται κατά κύριο λόγο με τα βιομηχανικά απόβλητα (π.χ. επιμεταλλωτήρια), ενώ σε πολλές περιπτώσεις σχετίζεται με τη χρήση χαλκούχων φυτοφαρμάκων στην καλλιέργεια της αμπέλου για την καταπολέμηση ασθενειών αυτής (π.χ. θειούχου χαλκού (CuSO_4) κοινώς γαλαζόπετρα) κλπ. Τα βασικότερα ορυκτά του χαλκού είναι ο χαλκοπυρίτης, ο χαλκοσίνης, ο βορνίτης, ο κυπρίτης, ο αζουρίτης και ο μαλαχίτης. Στα υπόγεια νερά, απουσία ρυπαντικού φορτίου, η συγκέντρωση του χαλκού βρίσκεται πολύ κάτω από το 1 mg/L. Για το πόσιμο νερό το ανώτερο επιτρεπτό όριο, βάσει της Οδηγίας 98/93/ΕΚ και του ΦΕΚ 3282Β/19-9-2017 για την Ελλάδα, είναι τα 2 mg/L. Σημαντικό ρόλο στην παρουσία του χαλκού στο πόσιμο νερό έχει η διάβρωση των χάλκινων σωληνώσεων του δικτύου μεταφοράς.

Στον ανθρώπινο οργανισμό, σχεδόν κάθε κύτταρο χρησιμοποιεί χαλκό, όπου μαζί με τον σίδηρο και τον ψευδάργυρο, αποτελούν τα απαραίτητα μεταλλικά στοιχεία, για την εύρωστη λειτουργία του. Η έλλειψη χαλκού θα είχε ως αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία του εγκεφάλου, του νευρικού και του καρδιαγγειακού συστήματος. Για τα βρέφη ο χαλκός είναι απαραίτητος κατά την διάρκεια της ανάπτυξης συντελώντας, στην δημιουργία

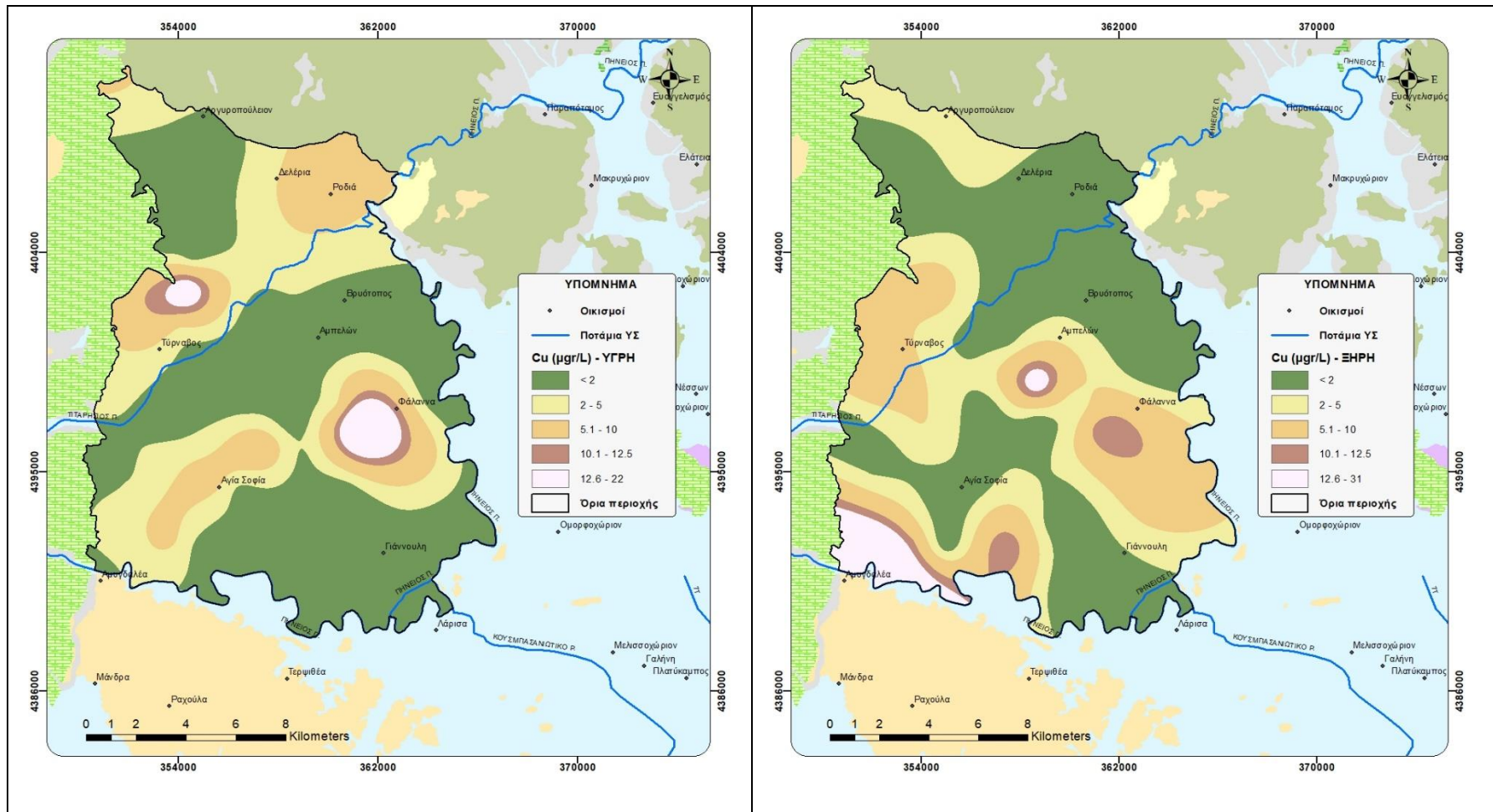
ισχυρών οστών, στην ωρίμανση των ερυθρών και των λευκών αιμοσφαιρίων, στην μεταφορά του σιδήρου και στο μεταβολισμό της χοληστερόλης και της γλυκόζης.

Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των δειγμάτων για τα υπόγεια νερά, οι συγκεντρώσεις του χαλκού κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, από 0.00 έως 20 µg/L στην υγρή περίοδο και από 0.00 έως 40 µg/L στην ξηρή περίοδο. Στο Διάγραμμα 8.11 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομής των συγκεντρώσεων χαλκού για την υγρή και την ξηρή περίοδο εκφρασμένες σε µg/L.

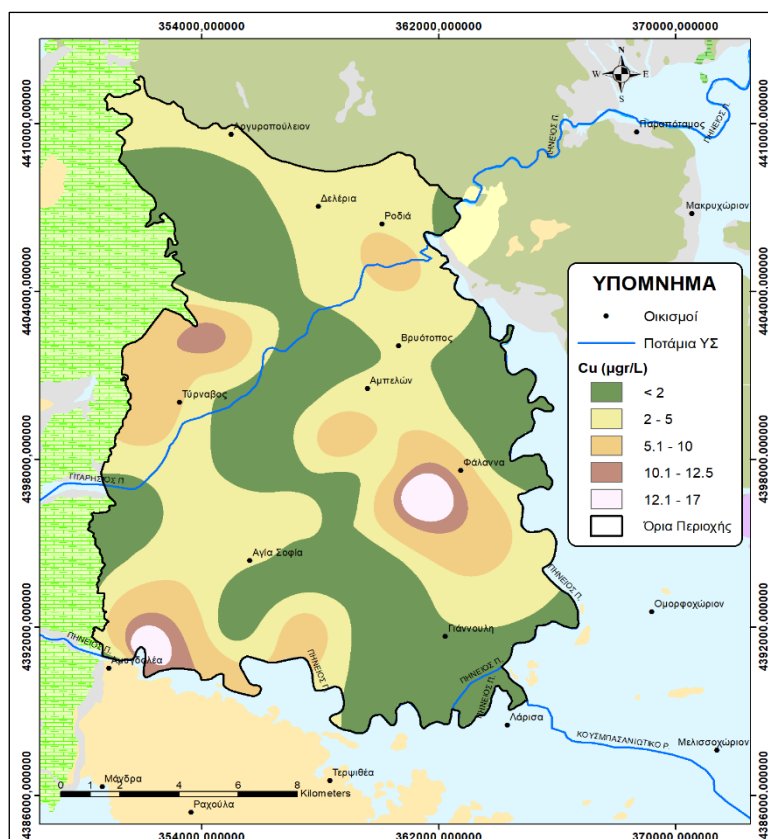


Διάγραμμα 8.11. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Cu στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Όπως ειπώθηκε, οι τιμές που εντοπίστηκαν στα δείγματα της περιοχής είναι πολύ μικρότερες του ορίου ποσιμότητας, ωστόσο επειδή παρουσίαζαν κάποια διακύμανση κατασκευάστηκε ο χάρτης της χωρικής τους κατανομής (Εικόνες 8.31 και 8.32), ως μια οπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των δεδομένων των αναλύσεων, χωρίς όμως να έχει σημασία η προσπάθεια ερμηνείας της κατανομής των συγκεντρώσεων, δεδομένου του μεγέθους των τιμών τους.



Εικόνα 8.31. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Cu ($\mu\text{g/L}$) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.32. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Cu ($\mu\text{g/L}$) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.8.2 ΣΙΔΗΡΟΣ (Fe)

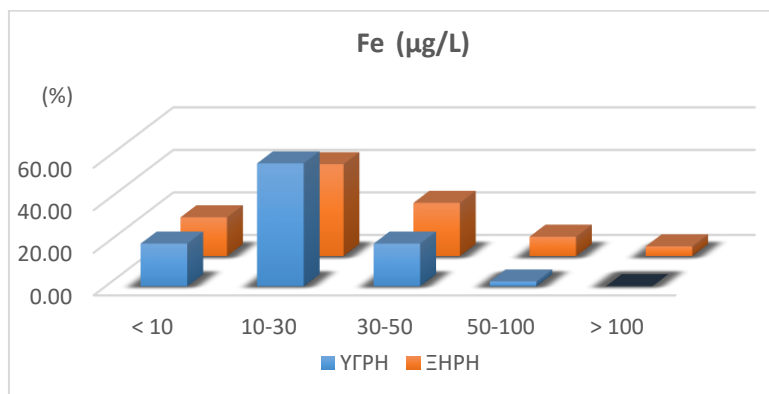
Ο σίδηρος (Fe) απαντάται κυρίως σε ορυκτά σκούρου χρώματος μερικά από τα οποία είναι οι πυρόξεντοι, οι αμφίβολοι, ο βιοτίτης, ο μαγνητίτης, ο σιδηροπυρίτης, οι γρανάτες και οι ολιβίνες. Στο νερό συναντάται με τη δισθενή και τρισθενή μορφή του. Προέρχεται από μαγματικά πετρώματα, οξείδια (αιματίτης, λειμονίτης, μαγνητίτης), σουλφίδια (σιδηροπυρίτης) και ανθρακικά ορυκτά (σιδηρίτης) (Βουδούρης 2009). Τα επιφανειακά νερά έχουν τον σίδηρο με την τρισθενή μορφή, ενώ αντίθετα μερικά υπόγεια νερά περιέχουν ιόντα δισθενούς σιδήρου, λόγω έλλειψης οξυγόνου. Όταν τα νερά αυτά οξυγονωθούν οι δισθενείς ενώσεις του σιδήρου οξειδώνονται προς τρισθενείς και κατακρημνίζονται, προσδίδοντας καφέ-κόκκινο χρώμα. Καλά οξυγονωμένα επιφανειακά νερά σε φυσιολογικές συνθήκες δεν περιέχουν σχεδόν καθόλου διαλυμένο σίδηρο.

Ο σίδηρος είναι απαραίτητο ιχνοστοιχείο για τον ανθρώπινο οργανισμό καθώς χρησιμοποιείται από το σώμα μας για να φτιάξει την ουσία αιμοσφαιρίνη μέσα στα ερυθρά αιμοσφαίρια, η οποία μεταφέρει το οξυγόνο από τους πνεύμονες στους ιστούς του σώματος, την ουσία μυοσφαιρίνη η οποία παραδίδει το οξυγόνο στους μύες. Επίσης είναι πολύ σημαντικό στοιχείο για τη υγεία των μαλλιών, του δέρματος και των νυχιών. Αποτελεί επίσης απαραίτητο συστατικό διαφόρων ενζύμων. Η ανεπάρκεια σιδήρου είναι η πιο

συχνή διατροφική διαταραχή στο κόσμο. Η έλλειψή του προκαλεί αναιμία (σιδηροπενική αναιμία) ενώ σε μεγάλες περιεκτικότητες προξενεί βλάβη στους ιστούς, λόγω της συσσώρευσής του (<https://medicalrq.gr>). Η υψηλή εμφάνιση λευχαιμίας σε μερικές περιοχές της Πολωνίας έχει συνδεθεί με την παρατηρούμενη σιδηροπενία των εδαφών. Ο καρκινογόνος παράγοντας αποδείχθηκε ότι είναι οι παραγόμενες τοξίνες από τον μικροοργανισμό *Aspergillus flavus*, ενός μύκητα που αναπτύσσεται σε έδαφος αυτής της χημικής σύστασης (Χαριζόπουλος 2013). Η λίπανση του εδάφους με ορισμένα ιχνοστοιχεία και κυρίως του ορυκτού δολομίτη έλεγξε το μύκητα και μειώθηκε η συχνότητα της λευχαιμίας (Σταμάτης 2009b).

Το ενδεικτικό επίπεδο συγκέντρωσης ολικού σιδήρου στο πόσιμο νερό είναι τα 20 $\mu\text{g/L}$ ενώ το ανώτατο επιτρεπτό όριο για τη συγκέντρωση του είναι τα 200 $\mu\text{g/L}$ (ΦΕΚ 3282B/19-9-2017). Σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 200 $\mu\text{g/L}$ καθίσταται ακατάλληλο και για πολλές βιομηχανικές χρήσεις. Ο σίδηρος είναι απαραίτητο ιχνοστοιχείο για τον άνθρωπο και η έλλειψή του προκαλεί αναιμία. Σε μεγάλες περιεκτικότητες προξενεί βλάβη στους ιστούς, λόγω της συσσώρευσής του.

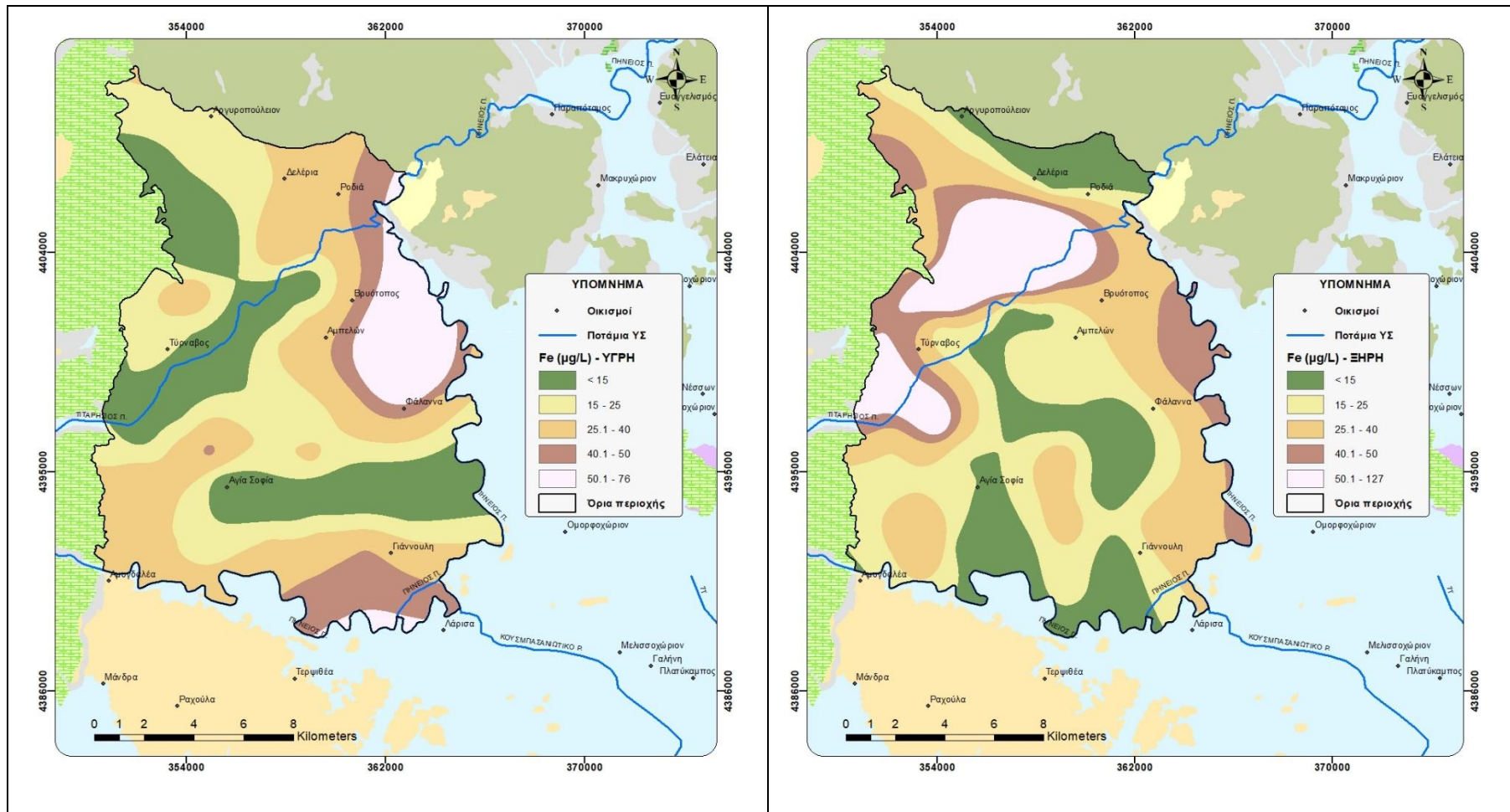
Από τις εργαστηριακές αναλύσεις των δειγμάτων των υπόγειων νερών, στην περιοχή έρευνας για την υγρή περίοδο όλες οι τιμές ήταν χαμηλότερες από 100 $\mu\text{g/L}$ ενώ για την ξηρή μόλις μία τιμή ήταν μεταξύ 100 και 200 $\mu\text{g/L}$. Οι τιμές αυτές συμφωνούν με τις αντίστοιχες τιμές που έχουν προκύψει από παλαιότερες εργασίες στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας, οι οποίες κυμαίνονται κατά μέσο όρο στα 80mg/L (Stamatis et al. 2007, Stamatis et al. 2011). Στο Διάγραμμα 8.12, παρουσιάζεται το ιστόγραμμα κατανομή των τιμών των συγκεντρώσεων του Fe, για την υγρή και την ξηρή περίοδο. Όπως ειπώθηκε οι τιμές είναι πολύ μικρές, με αυτές του εύρους 10-30 $\mu\text{g/L}$ να παρουσιάζουν την μεγαλύτερη συχνότητα κατανομής για την υγρή και την ξηρή περίοδο (58% και 43% αντίστοιχα).



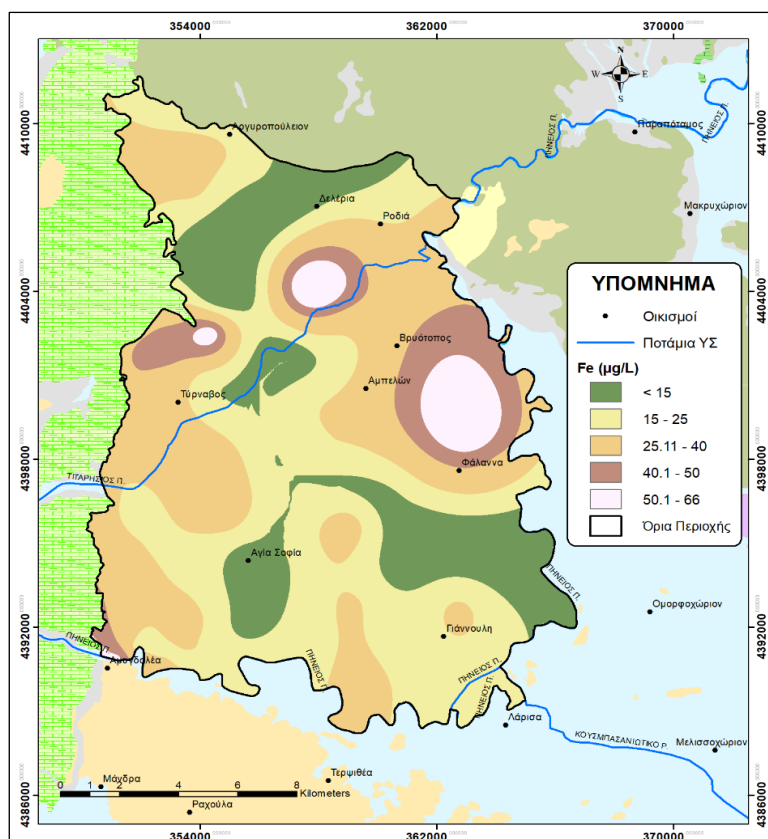
Διάγραμμα 8.12. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Fe στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Στις Εικόνες 8.33 και 8.34, φαίνονται οι χάρτες της χωρικής κατανομής των συγκεντρώσεων του σιδήρου, καθώς παρουσίασαν κάποια διακύμανση. Οι μεγάλες (σχετικά) συγκεντρώσεις που εμφανίζονται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής ενδεχομένως να σχετίζονται με τις μικρές εμφανίσεις υπερβασικών σχηματισμών στην ανατολική επέκταση

της υπολεκάνης. Στα δυτικά αντίστοιχα, οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις κατά την ξηρή περίοδο δειγματοληψίας μπορούν να αποδοθούν σε υπολείμματα αγροχημικών προϊόντων (όξινα λιπάσματα, προσθήκη οργανικής ουσίας).



Εικόνα 8.33. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Fe ($\mu\text{g/L}$) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.34. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Fe (µg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

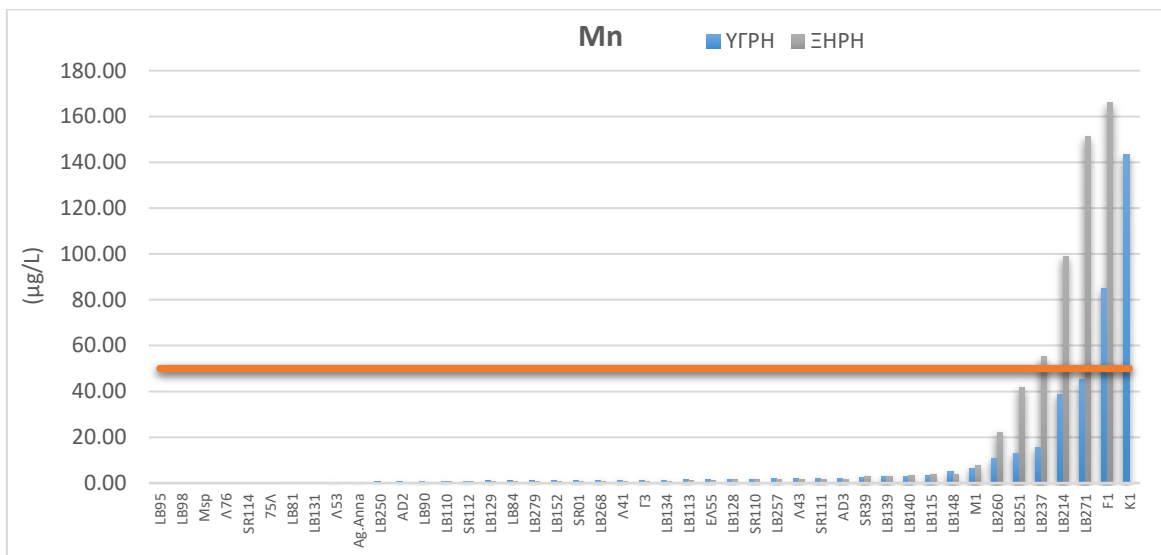
8.8.3 ΜΑΓΓΑΝΙΟ (Mn)

Το μαγγάνιο (Mn) περιέχεται σε μικρές σχετικά συγκεντρώσεις κυρίως στα μαγματικά πετρώματα, στις αργίλους, στους ψαμμίτες, στα ανθρακικά πετρώματα και στην άμμο. Στα υπόγεια νερά οι συγκεντρώσεις του μαγγανίου βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με αυτές του σιδήρου. Αυτό σχετίζεται με την γεωχημική κατανομή και ιδιαίτερα με την διαλυτότητα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις που έχουν κατά τόπους ανιχνευθεί στα υπόγεια και επιφανειακά νερά σχετίζονται κυρίως με ανθρώπινες δραστηριότητες (Καλλέργης 2000).

Το μαγγάνιο αποτελεί απαραίτητο ιχνοστοιχείο για την ανάπτυξη του ανθρώπινου οργανισμού καθώς συμβάλλει στη φυσιολογική λειτουργία των οστών και των συνδετικών ιστών. Επιπλέον, συμμετέχει στο μεταβολισμό του λίπους και των υδατανθράκων, ενώ βοηθά και στη ρύθμιση του σακχάρου. Ένας σημαντικός ρόλος του μαγγανίου αφορά την συμβολή του στην παραγωγή του ενζύμου προλιδάση, η οποία βοηθά στην παραγωγή κολλαγόνου στον οργανισμό, σημαντικό για την καλή υγεία του δέρματος. Η έλλειψη μαγγανίου μπορεί να προκαλέσει ταχυκαρδίες, αδυναμία, ατονία, υψηλή αρτηριακή πίεση, εφίδρωση και οστεοπόρωση (<https://www.pharm24.gr>).

Στα υπόγεια φυσικά νερά, οι συγκεντρώσεις μαγγανίου είναι αρκετά χαμηλές (< 0.05 mg/L) και γενικότερα δεν ξεπερνούν τα 0.2 mg/L. Με βάση το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017 για την Ελλάδα, σε συμφωνία με την Οδηγία 98/83/ΕΚ, το ενδεικτικό όριο Μn στο πόσιμο νερό είναι 20 µg/L, με ανώτατη αποδεκτή συγκέντρωση τα 50 µg/L.

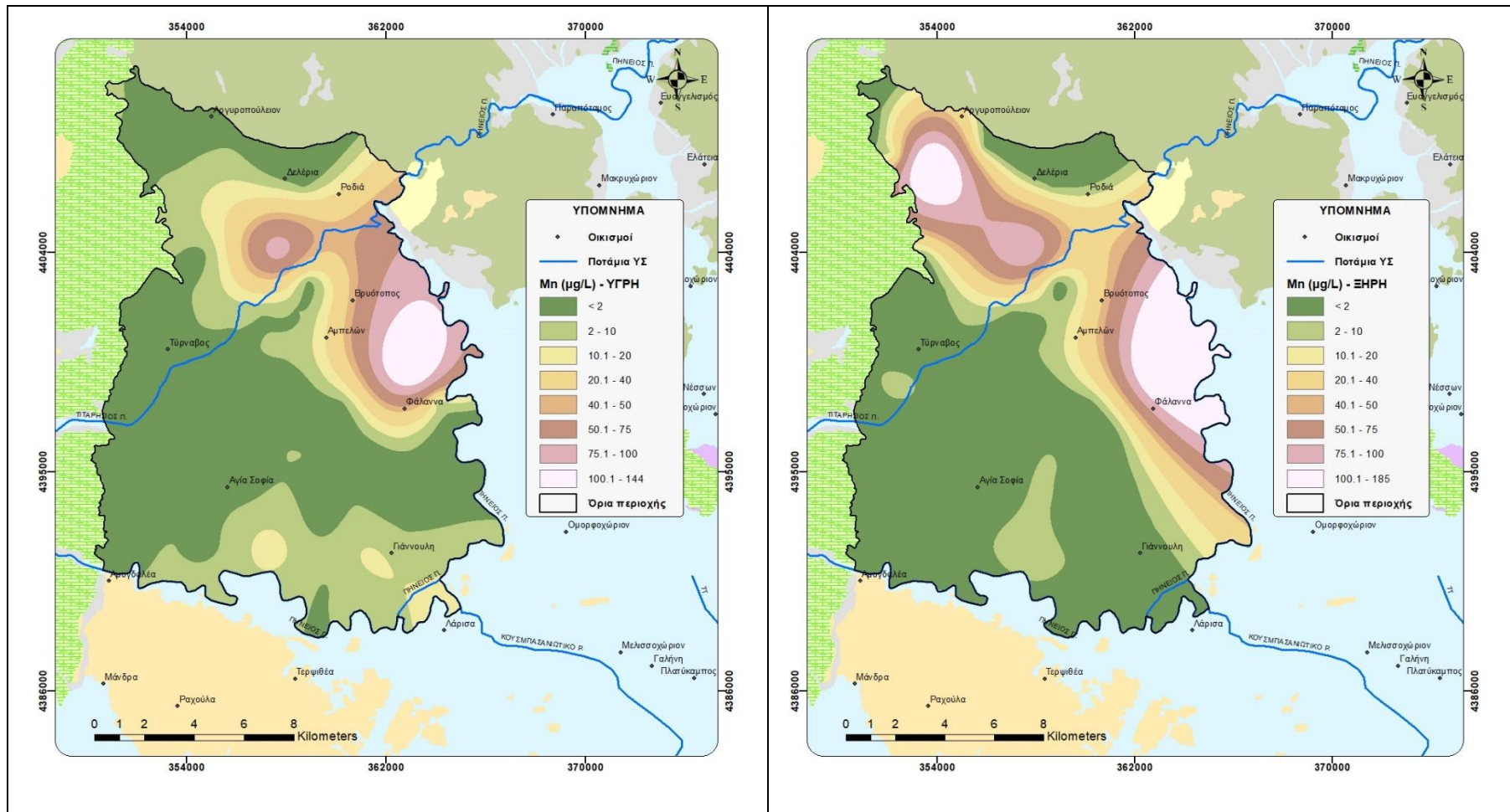
Για την περιοχή έρευνας, η συντριπτική πλειονότητα των δειγμάτων των υπόγειων υδάτων παρουσιάζει πολύ μικρές συγκεντρώσεις Μn. Το 86% αυτών παρουσιάζει συγκεντρώσεις κάτω από 10 µg/L και το 95% κάτω από το κρίσιμο όριο των 50 µg/L. Παρά τις χαμηλές αυτές συγκεντρώσεις, για το σύνολο σχεδόν των δειγμάτων, υπάρχουν και κάποιες (2 για την υγρή και 4 για την ξηρή περίοδο), οι οποίες υπερβαίνουν το όριο της ΕΕ και μάλιστα οι περισσότερες εξ αυτών κατά πολύ. Στο Διάγραμμα 8.14, παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των συγκεντρώσεων Μn για το σύνολο των δειγμάτων της περιοχής έρευνας, σε σύγκριση με το ανώτατο όριο ποσιμότητας. Απεικονίζονται οι υπερβάσεις που αναφέρθηκαν, με τη μέγιστη τιμή να αφορά στην ξηρή περίοδο και φθάνει τα 165.90 µg/L.



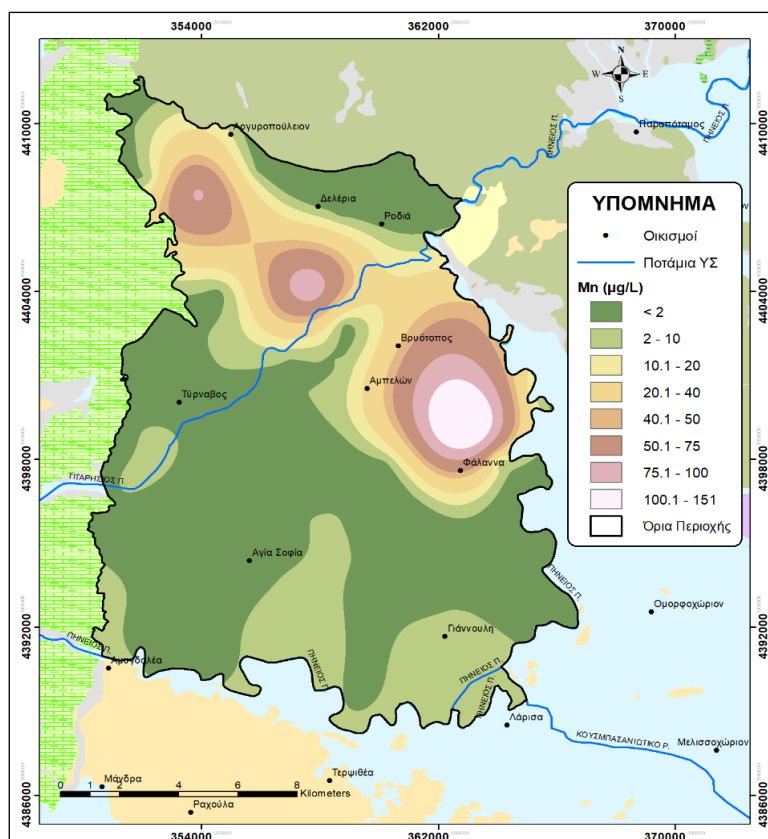
Διάγραμμα 8.13. Ιστόγραμμα συγκεντρώσεων Μn για το σύνολο των δειγμάτων της υπολεκάνης Τυρνάβου, σε σύγκριση με την ανώτατη παραμετρική τιμή (50 µg/L), βάσει ΦΕΚ 3282B/19-9-2017).

Από τη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων του Μn (Εικόνες 8.35 και 8.36) προκύπτει, ότι η παρουσία των μέγιστων συγκεντρώσεων Μn εμφανίζεται κατά μήκος μιας ζώνης ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης, ξεκινώντας από την περιοχή του Αργυροπουλίου και φθάνει μέχρι τον οικισμό της Φαλλάνης. Δεδομένου ότι προς την ανατολική επέκταση της υπολεκάνης υπάρχουν κάποιες εμφανίσεις υπερβασικών σχηματισμών, θα μπορούσε να δικαιολογηθεί η παρουσία των υψηλών συγκεντρώσεων Μn στα ανατολικά τμήματα της υπολεκάνης, ως αποτέλεσμα εξαλλοίωσης των υπερβασικών αυτών τεμαχών. Κάτι τέτοιο όμως δε δικαιολογεί τις υψηλές συγκεντρώσεις στο κεντρικό και ΒΔ τμήμα της περιοχής έρευνας. Σύμφωνα με τον Καλλέργη (2000), υψηλές συγκεντρώσεις που έχουν κατά τόπους ανιχνευθεί στα υπόγεια και επιφανειακά νερά σχετίζονται κυρίως με ανθρώπινες δραστηριότητες. Στις δραστηριότητες αυτές εντάσσονται τόσο η εφαρμογή φωσφορικών

λιπασμάτων όσο και τα λύματα που προέρχονται από μεταλλουργίες, χρώματα και γενικότερα αστικά λύματα (Siegel 2002, Χαμπίδη 2012), τα οποία μπορούν να δρουν αθροιστικά στην εμφάνιση των συγκεντρώσεων μαγγανίου στα υπόγεια νερά της περιοχής.



Εικόνα 8.35. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Mn (µg/L) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.36. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Mn (µg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.8.4 ΜΟΛΥΒΔΟΣ (Pb)

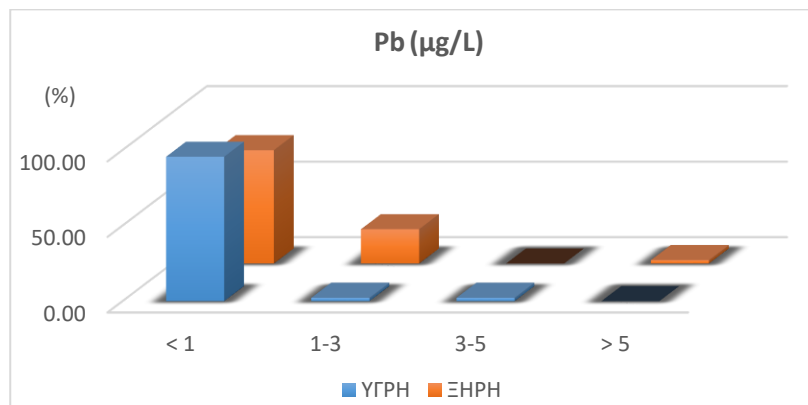
Όπως και το μαγγάνιο έτσι και ο μόλυβδος (Pb), απαντάται σε μικρές ποσότητες στα πετρώματα με κυριότερα τα μαγματικά, τους ψαμμίτες, τα αργιλικά και τα ανθρακικά. Τα πιο γνωστά ορυκτά του Pb ανήκουν στην ομάδα των μεικτών θειούχων (γαληνίτης, κερουσίτης, αγγλεσίτης).

Στα φυσικά υπόγεια νερά ο Pb σχεδόν απουσιάζει ή όταν υπάρχει εντοπίζεται σε ίχνη συγκεντρώσεων από 1-20 µg/L. Υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε μεταλλοφόρες περιοχές μέχρι 1.3 mg/L, στα θερμομεταλλικά νερά μέχρι 0.52 mg/L, καθώς και στα όξινα νερά των μεταλλείων μέχρι 1.2 mg/L (Σταμάτης 2009). Με βάση το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017 για την Ελλάδα, σε συμφωνία με την Οδηγία 98/83/ΕΚ, η ανώτατη αποδεκτή συγκέντρωση για τον Pb, στο πόσιμο νερό είναι 10 µg/L.

Ο κύριος κίνδυνος από τον Pb είναι η τοξικότητά του. Ο κατ' εξοχήν κίνδυνος για τον άνθρωπο, προέρχεται από την εισπνοή σκόνης ή καπνού του μετάλλου (βιομηχανικό περιβάλλον) ενώ οι καπνοί από τα φουγάρα των βιομηχανικών φούρνων αποτελούν πηγή ρύπανσης και για το ευρύτερο περιβάλλον. Οι οργανικές ενώσεις του μολύβδου απορροφώνται από το δέρμα και η δηλητηρίαση από μόλυβδο είναι γνωστή ως μολυβδίαση. Ωστόσο, η συστηματική πρόληψη από ιατρικής πλευράς συνετέλεσε ώστε να

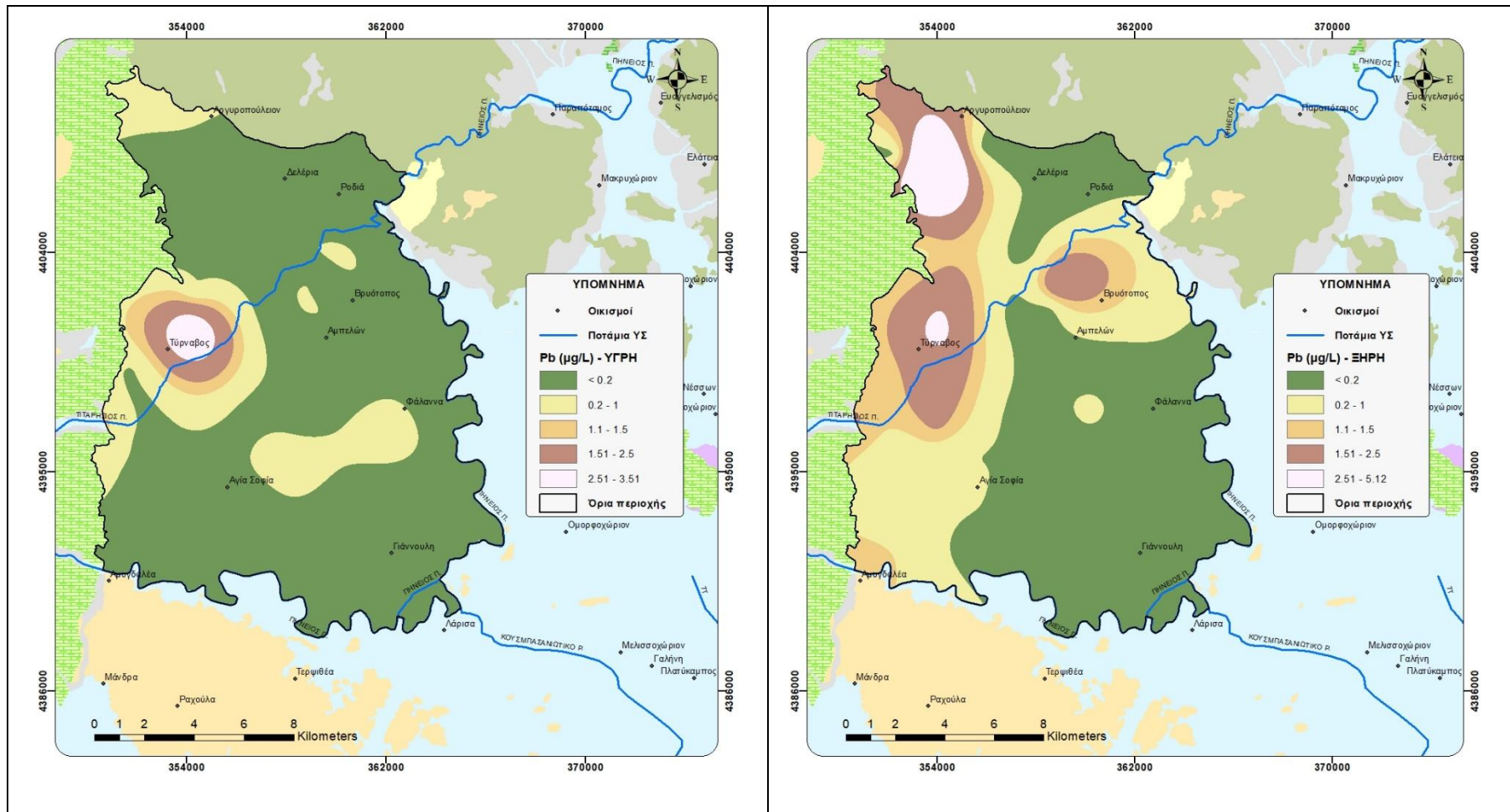
μειωθούν οι περιπτώσεις δηλητηρίασεως. Υπερεπάρκεια Pb προκαλεί νευροφυσιολογικές δυσλειτουργίες, μειωμένη ταχύτητα αγωγής των περιφερικών νεύρων, αναιμία και βλάβες στα νεφρά. Επίσης, οι πιθανές επιπτώσεις στα έμβρυα εγκύων γυναικών οδήγησε στην έκδοση χωριστών οδηγιών για την έκθεση των γυναικών κατά την παραγωγική τους (γόνιμη) ηλικία (<https://www.iatronet.gr>).

Για την περιοχή έρευνας, το σύνολο των δειγμάτων των υπόγειων υδάτων παρουσιάζει πολύ μικρές συγκεντρώσεις Pb. Στο 86% του συνόλου των δειγμάτων η συγκέντρωση του μόλυβδου είναι κάτω από 1 μg/L, ενώ το 99% αυτών κάτω από τα 5 μg/L. Η μέγιστη τιμή παρατηρούμενη τιμή μόλυβδου αφορά δείγμα της ξηρής περιόδου με τιμή 5.16 μg/L. Στο παρακάτω ιστόγραμμα (Διάγραμμα 8.14) απεικονίζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων μόλυβδου για την υγρή και ξηρή περίοδο, στα υπόγεια δείγματα της υπολεκάνης Τυρνάβου.

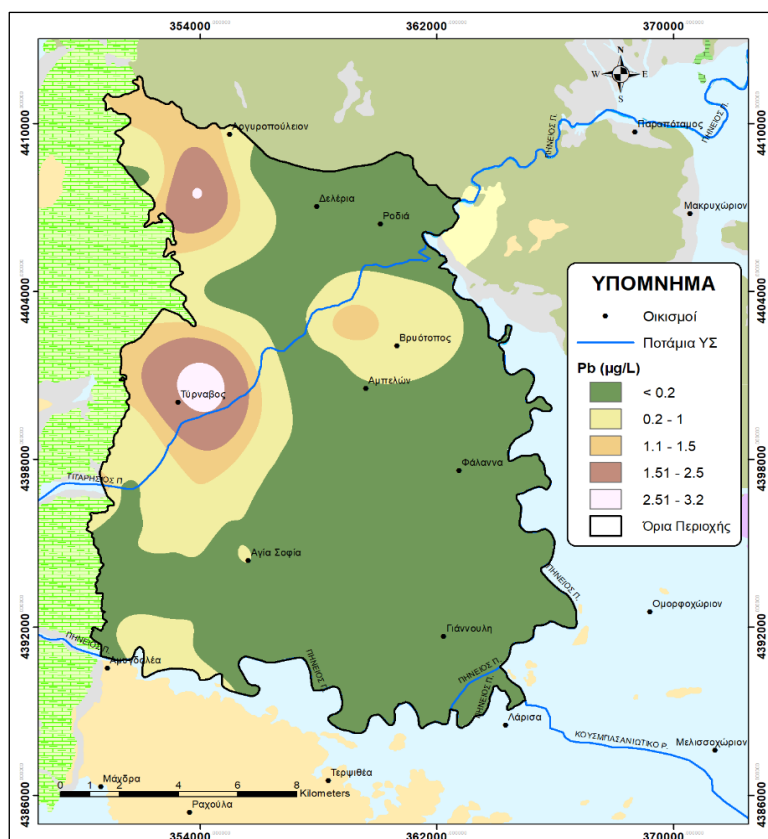


Διάγραμμα 8.14. Ιστόγραμμα κατανομής συγκεντρώσεων Pb στα δείγματα υπογείων υδάτων υγρής και ξηρής περιόδου.

Στις Εικόνες 8.37 και 8.38 φαίνεται η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Pb με τις σχετικά υψηλές τιμές να εμφανίζονται στο δυτικό και ΒΔ τμήμα της περιοχής έρευνας. Πιθανές πηγές μόλυβδου για την περιοχή θα μπορούσαν να είναι τα λιπάσματα και αστικά απόβλητα που χρησιμοποιούνται στη γεωργία (Siegel 2002) καθώς και η ρύπανση την οποία προκαλούν τα αέρια των εξατμίσεων των οχημάτων. Τέλος, σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε υπόγεια ύδατα διαφόρων περιοχών στην Ελλάδα, οι οποίες αποτελούνται από Τεταρτογενείς και Νεογενείς σχηματισμούς, η παρουσία του Pb είναι χαρακτηριστική με συγκεντρώσεις που στην πλειοψηφία τους δεν ξεπερνούν το ανώτατο όριο για τα πόσιμα ύδατα (Χαμπίδη 2012).



Εικόνα 8.37. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Pb ($\mu\text{g/L}$) εντός της περιοχής έρευνας για την υγρή περίοδο (αριστερά) και την ξηρή περίοδο (δεξιά).



Εικόνα 8.38. Χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων Pb (µg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

8.9 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα βασικά συστατικά στοιχεία και ιχνοστοιχεία τόσο στα επιφανειακά όσο και στα υπόγεια νερά προέρχονται κατά κύριο λόγο από τη διάλυση των πετρωμάτων και ορυκτών πάνω στα οποία ή διαμέσου των οποίων διέρχεται το νερό. Ο χημισμός των πετρωμάτων επηρεάζει άμεσα τη χημική σύσταση του νερού με το οποίο έρχεται σε επαφή. Τα κύρια στοιχεία που παρατηρούνται στα φυσικά υπόγεια νερά λόγω της διάλυσης των πετρωμάτων είναι τα ιόντα Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} και το SiO_2 που βρίσκεται στο υδατικό διάλυμα σε μοριακή μορφή. Υπάρχουν επίσης στοιχεία, που λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, διηθούνται με τη βοήθεια του νερού της βροχής ή του αρδευτικού νερού προς τον υδροφόρο. Οι ανθρωπογενείς αυτές επιδράσεις είναι κυρίως οι αγροτικές (γεωργία-κτηνοτροφία), οι βιομηχανικές και οι αστικές δραστηριότητες. Τα στοιχεία που διηθούνται προς τα υπόγεια νερά είναι κυρίως τα NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} όπως και πολλά βαρέα μέταλλα σε μικρότερες συγκεντρώσεις. Στις περιπτώσεις παράκτιων λεκανών σε συνδυασμό με υπερεκμετάλλευση των υδροφόρων, η πιθανή θαλάσσια διείσδυση συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση των συγκεντρώσεων των στοιχείων Na^+ , Cl^- και SO_4^{2-} , τα οποία βρίσκονται σε αφθονία στο θαλασσίνο νερό (Stamatis et al. 2011).

Χρήσιμα εργαλεία, όπως θα αναφερθεί στις επόμενες παραγράφους, για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την προέλευση των στοιχείων από συγκεκριμένα πετρώματα, αποτελούν οι ιοντικοί λόγοι μεταξύ συγκεκριμένων ιόντων (ή ομάδων ιόντων) και οι δείκτες κορεσμού, οι οποίοι παρέχουν πληροφορίες για την τάση του νερού να διαλύει, να αποθέτει ή να βρίσκεται σε ισορροπία με ένα ορυκτό.

8.9.1 ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ

Οι λόγοι των συγκεντρώσεων των ιόντων (σε meq/l) που περιέχονται μέσα σε ένα υδατικό διάλυμα μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες τόσο για την ποιότητα του ύδατος όσο και για την προέλευση των στοιχείων του, τα οποία μπορεί να προέρχονται από συγκεκριμένα πετρώματα που το φιλοξενούν ή από την επαφή κατά την κίνησή του μέσα από τους διάφορους σχηματισμούς. Πρέπει να σημειωθεί ότι, συχνά, η εξέταση των τιμών μεμονωμένων ιοντικών λόγων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα, γι' αυτό, εφόσον χρησιμοποιούνται, στην ερμηνεία τους πρέπει να αναλύονται συνδυαστικά όλα τα διαθέσιμα δεδομένα. Στη συνέχεια αναλύονται οι ιοντικοί λόγοι που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αφού πρώτα προσδιορίστηκαν, οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των δύο ξηρών και των δύο υγρών περιόδων δειγματοληψίας.

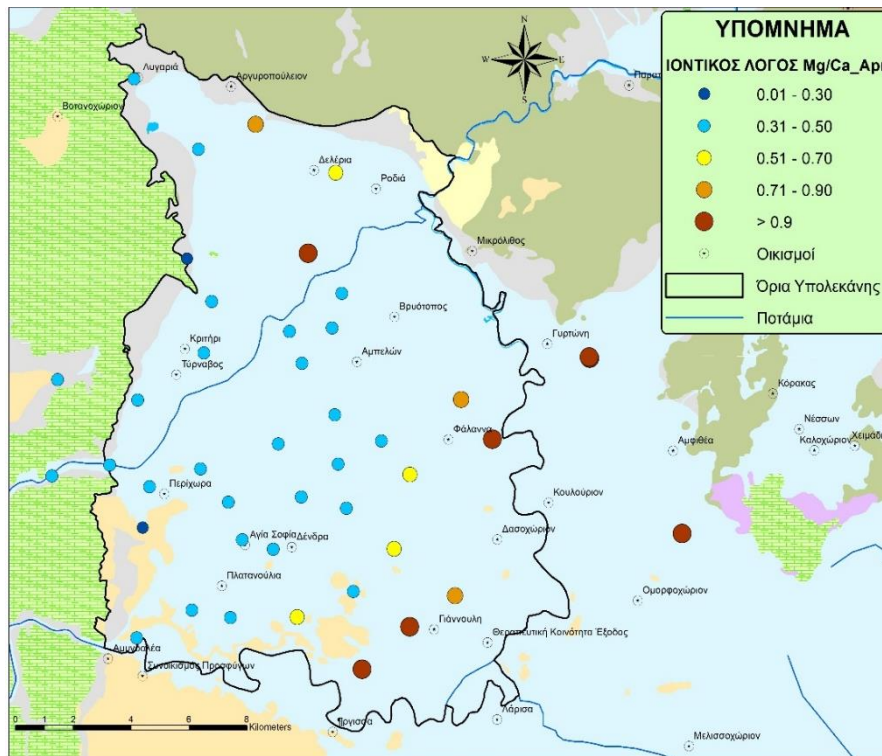
Mg²⁺/Ca²⁺ : ο λόγος αυτός αποτελεί δείκτη της προέλευσης του νερού από ασβεστολιθικά ή δολομιτικά πετρώματα ή επίδρασης υπερβασικών σχηματισμών. Πιο συγκεκριμένα:

- εάν ο λόγος Mg²⁺/Ca²⁺ = 0.5 – 0.7 υποδεικνύει ασβεστολιθική προέλευση
- εάν ο λόγος Mg²⁺/Ca²⁺ = 0.7 – 0.9 υποδεικνύει δολομιτική προέλευση
- εάν ο λόγος Mg²⁺/Ca²⁺ > 0.9 υποδεικνύει οφιολιθική προέλευση ή γενικότερα πυριτικά πετρώματα πλούσια σε Mg²⁺, αν και στα οφιολιθικά πετρώματα οι τιμές είναι συνήθως μεγαλύτερες από 1.

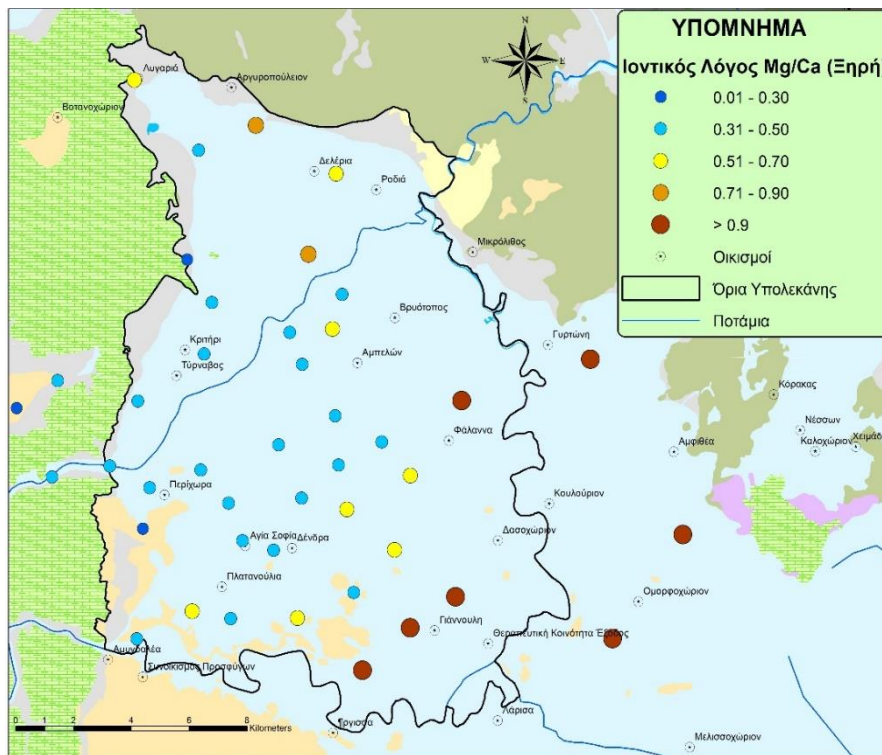
Με βάση τις τιμές του ιοντικού λόγου Mg²⁺/Ca²⁺ για την περιοχή μελέτης προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Αναφορικά με τις πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας ο ιοντικός λόγος κυμαίνεται μεταξύ 0.28 – 0.32 για την υγρή περίοδο ενώ στην ξηρή περίοδο υπήρχε μέτρηση μόνο για το Μάτι Τυρνάβου με τιμή 0.40. Οι τιμές αυτές των 2 πηγών δείχνουν σαφή ασβεστολιθική προέλευση του νερού εκφόρτισης.
- Για τα δείγματα από τον υπο-πίεση υδροφόρο ο ιοντικός λόγος κυμαίνεται μεταξύ 0.26 – 1.39 για την υγρή περίοδο και 0.25 – 1.98 για την ξηρή περίοδο.
- Κατά την ξηρή περίοδο το 79% των δειγμάτων προκύπτει ότι έχουν ασβεστολιθική προέλευση, ένα 5% δολομιτική προέλευση και το υπόλοιπο 16% προκύπτει ότι προέρχονται από υδροφόρους πλούσιους σε μαγνησιούχα ορυκτά.
- Κατά την υγρή περίοδο τα ποσοστά αυτά είναι 77%, 7% και 16% αντίστοιχα.

Στις Εικόνες 8.39 και 8.40 φαίνεται η χωρική κατανομή του ιοντικού λόγου Mg/Ca για την υγρή και την ξηρή περίοδο αντίστοιχα. Όπως προκύπτει από τα δύο αυτά σχήματα δεν υπάρχουν ουσιαστικές μεταβολές μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου. Οι τιμές του ιοντικού λόγου, όπως αναμενόταν, είναι χαμηλές στα δυτικά περιθώρια και στο μεγαλύτερο μέρος του κεντρικού τμήματος της υπολεκάνης, γεγονός που οφείλεται στην καθαρά ασβεστολιθική προέλευση των υπόγειων υδάτων στις περιοχές αυτές. Στο βόρειο τμήμα της υπολεκάνης και στις δύο περιόδους, υπάρχουν κάποιες τιμές που υποδεικνύουν δολομιτική προέλευση, κάτι που συμφωνεί με τα μέχρι τώρα δεδομένα για την κατά τόπους ύπαρξη δολομιτών μέσα στην καρστική μάζα Δαμασίου-Τυρνάβου. Στο κεντρικό-ανατολικό και νοτιοδυτικό τμήμα της υπολεκάνης, οι τιμές του ιοντικού λόγου ξεπερνούν τη μονάδα με μέγιστες τιμές 1.4 για την υγρή και 1.9 για την ξηρή περίοδο που παρατηρείται κυρίως στην περιοχή του Ομορφοχωρίου. Ουσιαστικά η περιοχή αυτή φαίνεται να επηρεάζεται από την ύπαρξη των οφιολιθικών μαζών και των σερπεντινιτών (οι μωβ σχηματισμοί στα σχήματα), που αναπτύσσονται σε μικρή απόσταση προς τα ανατολικά και οι οποίοι ανήκουν στο προ-ανωκρητιδικό τεκτονικό κάλυμμα.



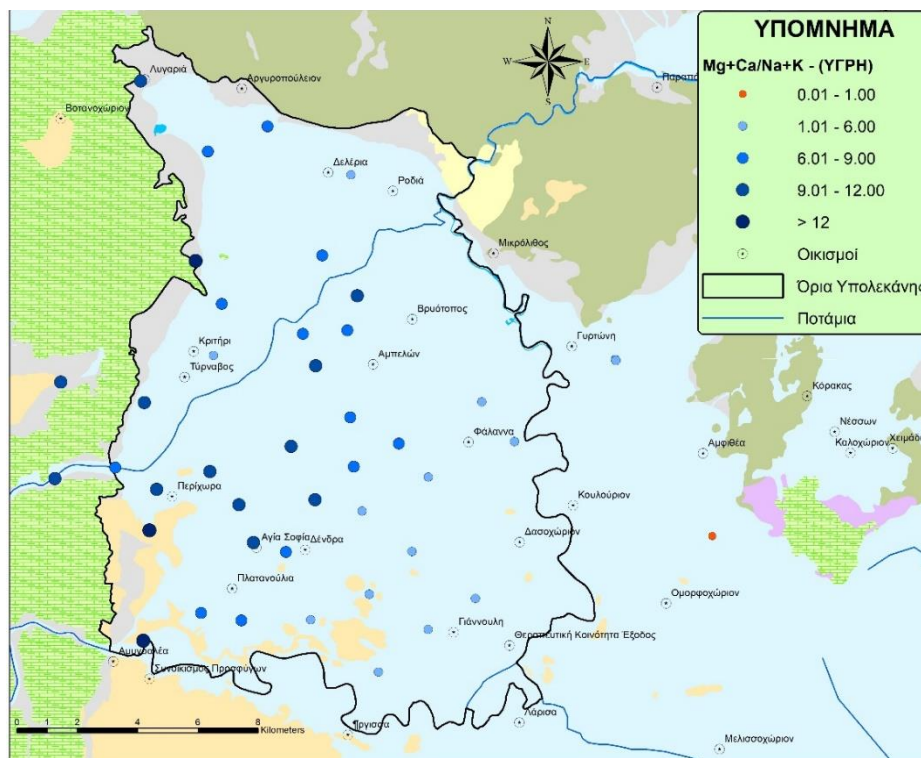
Εικόνα 8.39. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου Mg^{2+}/Ca^{2+} , υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.



Εικόνα 8.40. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου Mg^{2+}/Ca^{2+} , υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.

$(Mg^{2+}+Ca^{2+}) / (Na^{+}+K^{+})$: ο λόγος αυτός σχετίζεται με την τροφοδοσία του υπόγειου νερού και δίνει πληροφορίες για τις περιοχές όπου γίνεται εμπλουτισμός των υδροφόρων (Καλλέργης 2001). Ο συνήθης διαχωρισμός που υπάρχει για τον ιοντικό λόγο αυτό είναι ότι, σε περιοχές έντονου εμπλουτισμού των υδροφόρων παίρνει τιμές μεγαλύτερες από την μονάδα ενώ σε περιοχές χαμηλού εμπλουτισμού λαμβάνει τιμές μικρότερες από τη μονάδα. Όσο μεγαλύτερες ή μικρότερες είναι οι τιμές αυτές από τη μονάδα τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της τροφοδοσίας ή τόσο πιο παλιό είναι το νερό του υδροφόρου (τόσο πιο απομακρυσμένες είναι οι ζώνες υδροφορίας από τις περιοχές τροφοδοσίας).

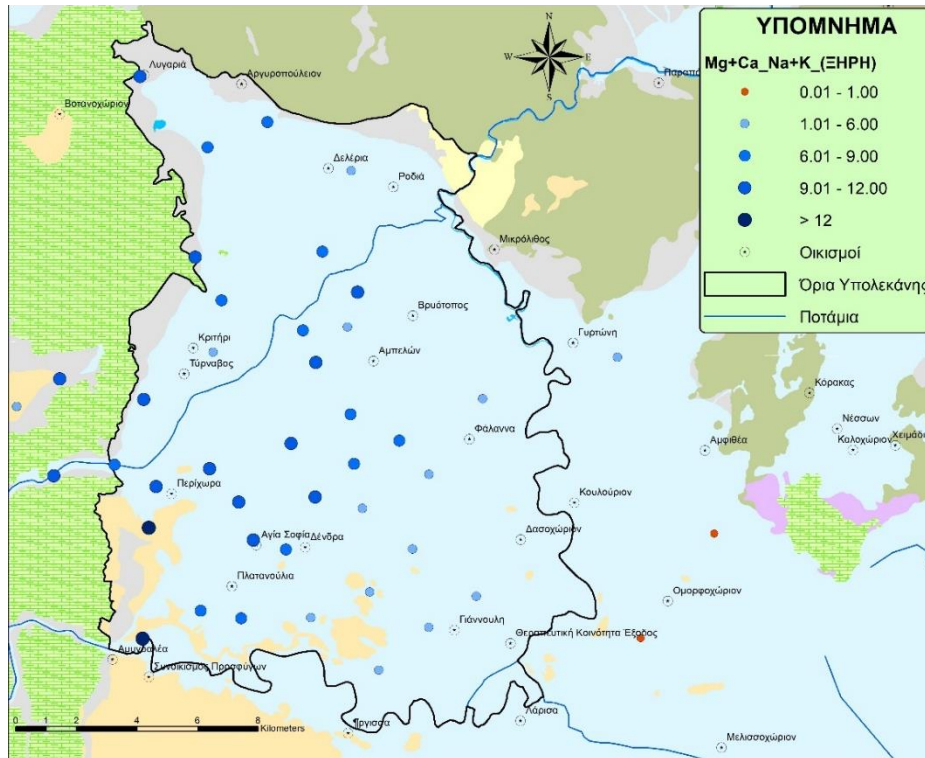
Όπως προκύπτει από τις παρακάτω Εικόνες χωρικής κατανομής 8.41 και 8.42, οι τιμές του ιοντικού αυτού λόγου είναι μεγαλύτερες από την μονάδα σε όλη την έκταση της υπολεκάνης και για τις δύο περιόδους. Μόνο στη λεκάνη του Ομορφοχωρίου η τιμή του λόγου πέφτει κάτω από τη μονάδα με μικρότερη την 0.48 την υγρή περίοδο και 0.53 την ξηρή. Οι υψηλότερες τιμές του λόγου, και άρα οι ευνοϊκότερες συνθήκες τροφοδοσίας και εμπλουτισμού, παρουσιάζονται στα δυτικά, με σταδιακή μείωσή τους προς το ανατολικό τμήμα της υπολεκάνης. Μεταξύ των δύο περιόδων η διαφορά που υπάρχει είναι ότι κατά την υγρή περίοδο οι τιμές του λόγου είναι μεγαλύτερες από στις αντίστοιχες θέσεις του δυτικού περιθωρίου και στις περισσότερες θέσεις στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης.



Εικόνα 8.41. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $Mg^{2+}+Ca^{2+}/Na^{+}+K^{+}$, υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.

Όπως και στην περίπτωση του ιοντικού λόγου Mg^{2+}/Ca^{2+} , η κατανομή αυτή υποδεικνύει μια σαφή τροφοδοσία από τα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης, όπου δεσπόζει το

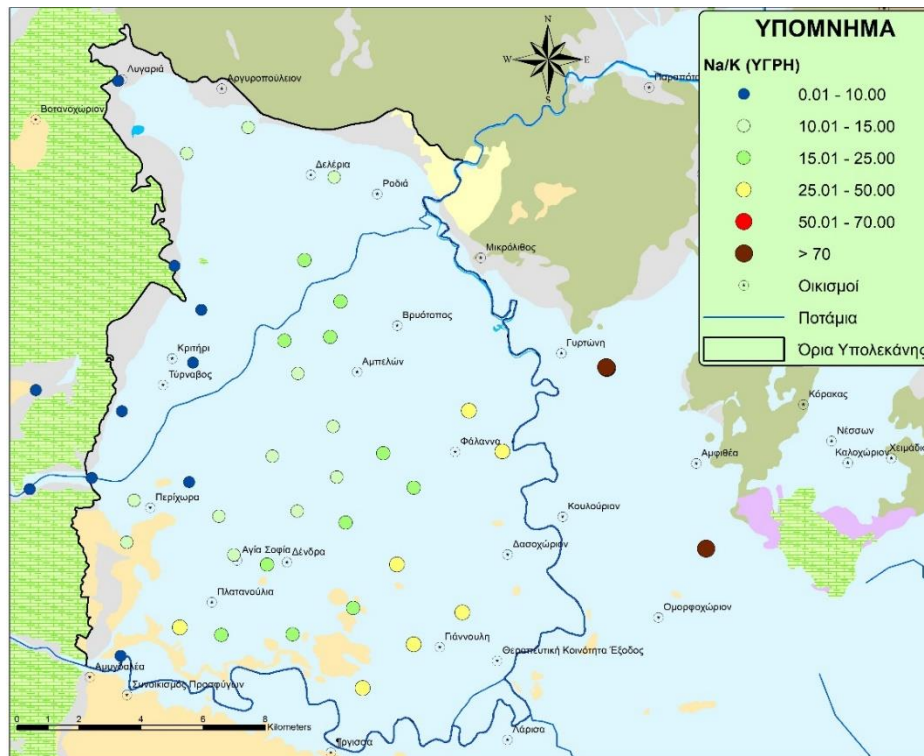
καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου, καθώς επίσης και τις ευνοϊκότερες περιοχές εμπλουτισμού των υπόγειων υδάτων με τις συνθήκες να είναι ιδανικότερες στα δυτικά.



Εικόνα 8.42. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $Mg^{2+}+Ca^{2+}/Na^{+}+K^{+}$, υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.

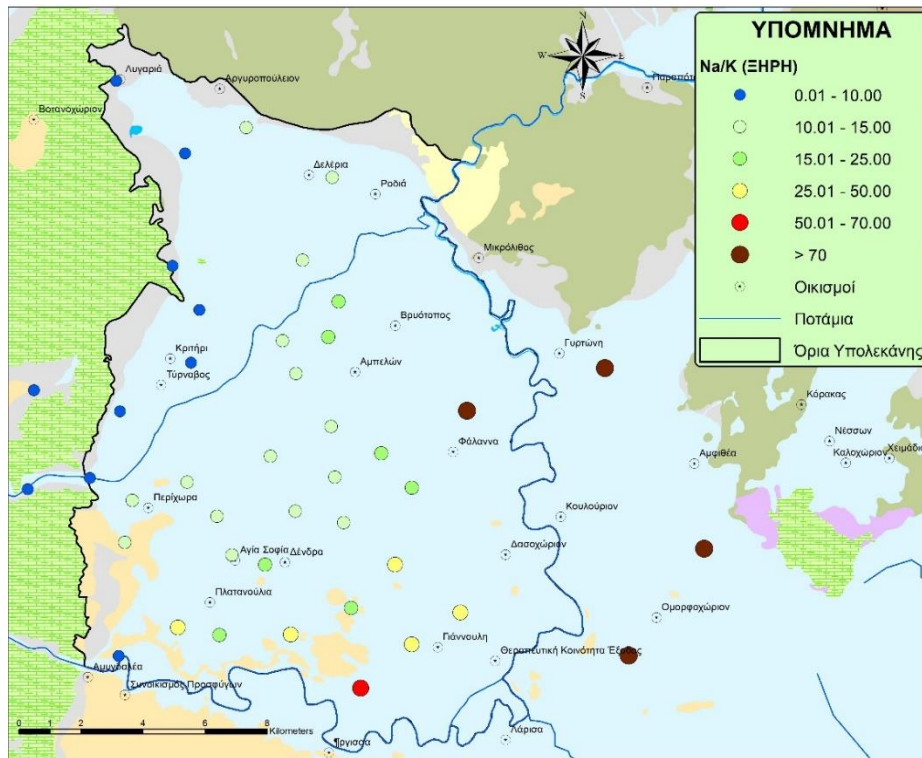
Na⁺/K⁺: Ο λόγος των ιόντων Na⁺ προς τα ιόντα K⁺, υποδεικνύει κατά το πόσο ένα υδροφόρο στρώμα δέχεται συνεχή τροφοδοσία (τιμές μεταξύ 15-25) ή περιέχει νερό μεγάλης ηλικίας (τιμές μεταξύ 50-70), που θα μπορούσε να υποδεικνύει καταληκτικές ζώνες νερού (μακριά από περιοχές τροφοδοσίας ή/και απολιθωμένα νερά). Τιμές του λόγου αυτού μικρότερες του 10 μαρτυρούν μετεωρική προέλευση του νερού, ενώ τιμές κοντά στο 47 υποδηλώνουν θαλάσσια προέλευση του νερού (χαρακτηριστικό παράκτιων περιοχών με θαλάσσια διείσδυση) (Καλλέργης 2001).

Για την περιοχή μελέτης η χωρική κατανομή του ιοντικού λόγου Na⁺/K⁺ απεικονίζεται στις Εικόνες 8.43 και 8.44 για την υγρή και την ξηρή περίοδο αντίστοιχα. Η χαμηλότερη και η μεγαλύτερη τιμή του λόγου για την υγρή περίοδο είναι 2.67 και 127.1, ενώ για την ξηρή περίοδο 2.61 και 441.34 αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν, όπως αναμενόταν, τιμές κοντά στο 47 που να υποδεικνύουν θαλάσσια διείσδυση.



Εικόνα 8.43. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου Na^+/K^+ , υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.

Αναφορικά με τις τιμές κάτω του 10, οι οποίες υποδηλώνουν μετεωρική προέλευση του υπόγειου νερού, αυτές εμφανίζονται και στις δύο περιόδους, κατά μήκος του δυτικού περιθωρίου της υπολεκάνης ως απόρροια της γειτνίασης με τα ασβεστολιθικά πετρώματα. Τιμές λόγου μεταξύ 15-25, που υποδεικνύουν συνεχή τροφοδοσία, εμφανίζονται κατά μήκος του κεντρικού άξονα της υπολεκάνης. Τιμή λόγου μεταξύ 50 και 70, που χαρακτηρίζουν την ύπαρξη παλαιού νερού, εμφανίζεται μόνο κατά την ξηρή περίοδο στη θέση LB257, η οποία και αποτελεί τη νοτιότερη θέση δειγματοληψίας υπόγειου νερού, της υπολεκάνης. Τιμές μεγαλύτερες του 70 παρατηρούνται κατά κύριο λόγο στην επέκταση της υπολεκάνης ανατολικά του Πηνειού (περιοχή Ομορφοχωρίου) και αυτό ερμηνεύεται από τα έντονα φαινόμενα κατιοντοανταλλαγής, τα οποία λαμβάνουν χώρα στην περιοχή, λόγω του μεγάλου χρόνου παραμονής του υπόγειου νερού στον υδροφόρο.

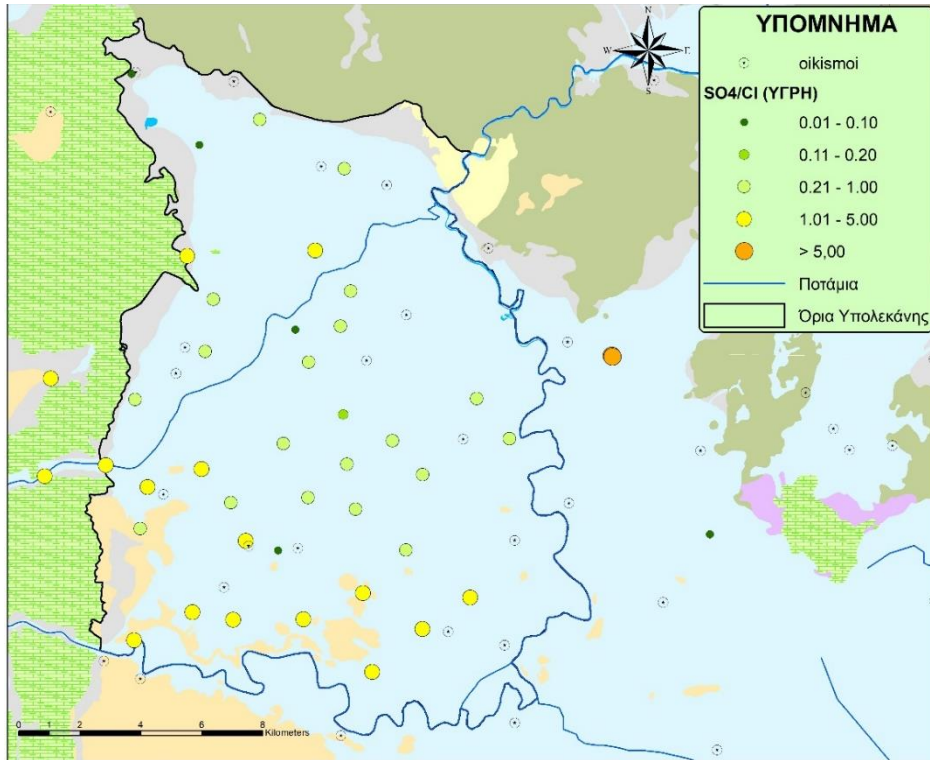


Εικόνα 8.44. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου Na^+/K^+ , υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.

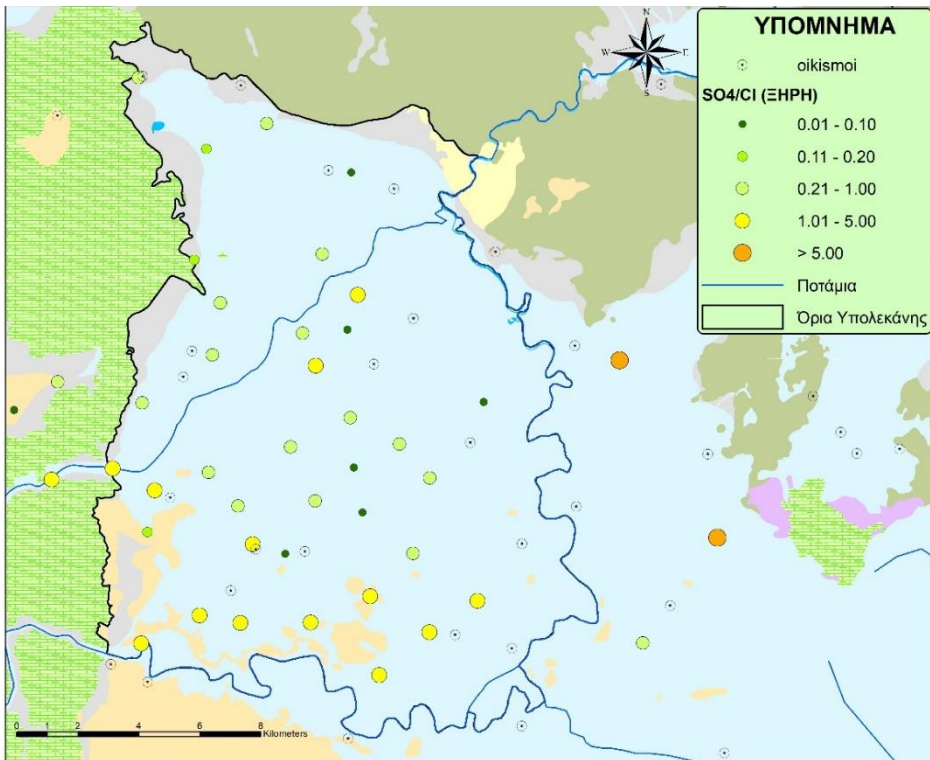
SO_4^{2-}/Cl^- : Με βάση τον ιοντικό λόγο SO_4^{2-}/Cl^- μπορεί να παρακολουθηθεί κανείς την εξέλιξη της αλατότητας καθώς η τιμή της μειώνεται κατά τη διεύθυνση ροής και μεταφοράς των αλάτων. Ο λόγος αυτός επίσης επηρεάζεται από τη δευτερογενή ρύπανση και την υφαλμύριση. Τιμές του λόγου μικρότερες από 0.1 υποδεικνύουν θαλάσσια προέλευση, ενώ για τιμές μεταξύ 0.1 και 0.2 το νερό χαρακτηρίζεται ως χλωριούχο. Μεταξύ του 0.2 και της μονάδας το νερό χαρακτηρίζεται ως χλωροθειούχο, ενώ από 1 έως 5 ως θειοχλωριούχο. Τέλος στην περίπτωση που οι τιμές του λόγου ξεπερνούν το 5, τότε το νερό χαρακτηρίζεται ως θειούχο. Για την περιοχή μελέτης, για την ξηρή περίοδο, η χαμηλότερη τιμή του λόγου είναι 0.01, η υψηλότερη 7.3 και η μέση 1.19. Οι αντίστοιχες τιμές για την υγρή περίοδο είναι 0.01, 6.77 και 1.22 αντίστοιχα.

Στις Εικόνες 8.45 και 8.46 απεικονίζεται η χωρική κατανομή του ιοντικού λόγου SO_4^{2-}/Cl^- για την υγρή και την ξηρή περίοδο αντίστοιχα. Από την κατανομή αυτή προκύπτει και για τις δύο περιόδους, ότι στο νότιο τμήμα της υπολεκάνης αλλά και στην περιοχή εισόδου του ποταμού Τιταρήσιου στην υπολεκάνη, επικρατούν τα θειοχλωριούχα νερά, ενώ στο δυτικό και κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης επικρατούν τα χλωροθειούχα νερά. Θειούχα νερά εμφανίζονται ανατολικά του Πηνειού ποταμού στην επέκταση της υπολεκάνης, ενώ υπάρχουν και κάποιες θέσεις, κυρίως στα κεντρικά, οι οποίες παρουσιάζουν πολύ χαμηλή τιμή του ιοντικού λόγου. Οι συγκεντρώσεις των SO_4^{2-} στις θέσεις αυτές είναι πάρα πολύ χαμηλές, γεγονός στο οποίο οφείλεται και η μικρή τιμή του ιοντικού λόγου. Αντίστοιχα οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων είναι σχετικά μικρές ώστε να δικαιολογούν θαλάσσια προέλευση του υπόγειου νερού, γεγονός που δεν προκύπτει από κανένα μέχρι τώρα

δεδομένο. Επιπλέον, από τον Πίνακα 8.12, όπου παρουσιάζονται οι τιμές του ιοντικού λόγου Na^+/Cl^- , ο οποίος χρησιμοποιείται σε παράκτιες περιοχές σαν δείκτης θαλάσσιας διείσδυσης, δεν προκύπτουν τιμές μικρότερες τις μονάδες (εξάιρεση αποτελεί θέση Γ3), οι οποίες θα υποδείκνυαν θαλάσσια προέλευση.



Εικόνα 8.45. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $\text{SO}_4^{2-}/\text{K}^+$, υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.

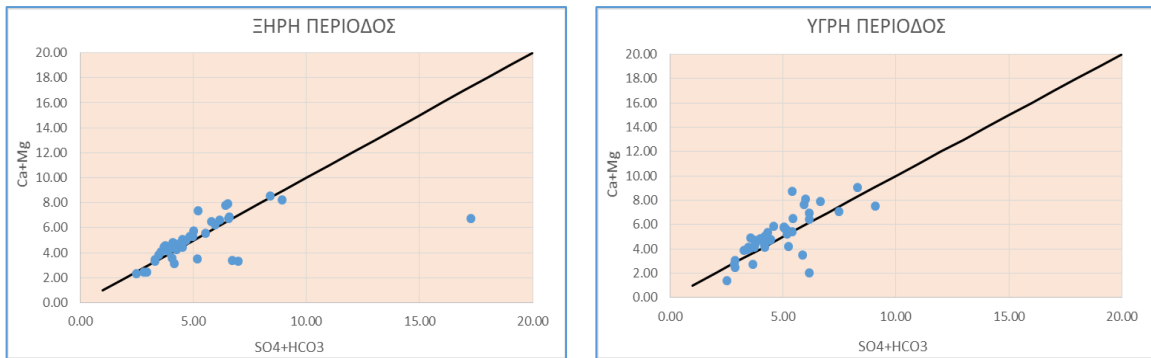


Εικόνα 8.46. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $\text{SO}_4^{2-}/\text{K}^+$, υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.

Πίνακας 8.12. Τιμές Ιοντικού λόγου Na⁺/Cl⁻ των θέσεων δειγματοληψίας του υπόγειου νερού για τις δύο περιόδους

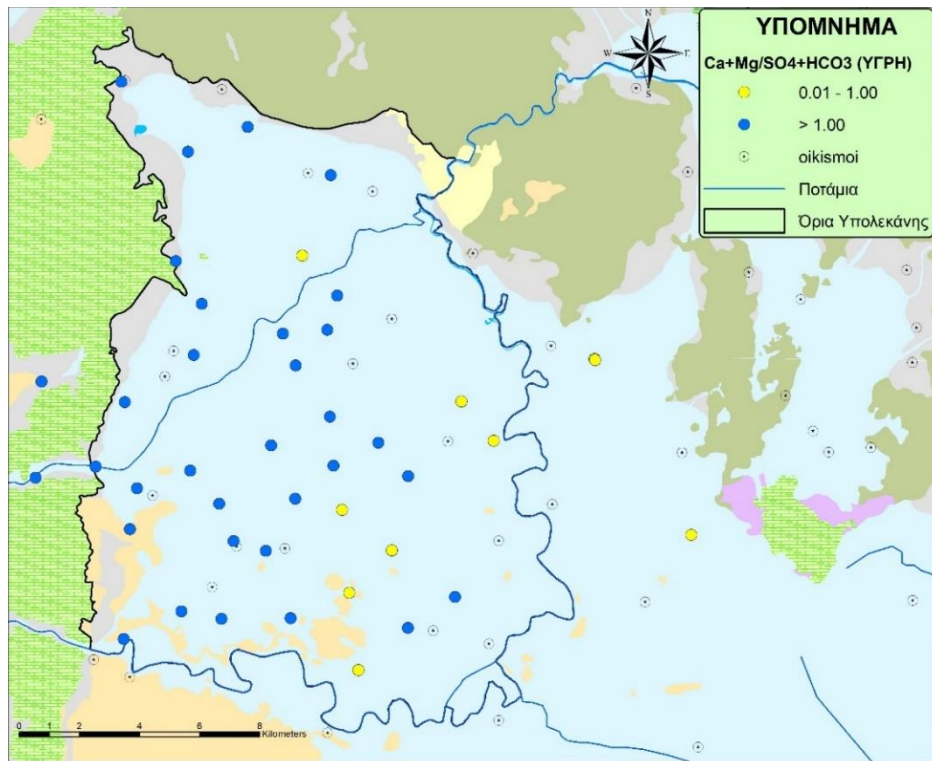
ΞΗΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ				ΥΓΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ			
Γεώτρηση	Na/Cl (meq/Lt)	Γεώτρηση	Na/Cl (meq/Lt)	Γεώτρηση	Na/Cl (meq/Lt)	Γεώτρηση	Na/Cl (meq/Lt)
75Λ	1.60	LB271	4.72	75Λ	1.53	LB268	1.87
AD2	2.02	LB279	1.50	AD2	1.77	LB271	4.46
AD3	1.68	LB81	1.35	AD3	1.98	LB279	1.46
FAKAS-1	3.68	LB84	1.43	FAKAS-1	3.53	LB81	1.32
KARAIKOS-1	8.36	LB90	2.31	KARAIKOS-1	7.28	LB84	1.85
LB110	1.57	LB95	2.27	LB110	1.53	LB90	2.45
LB113	2.66	LB98	2.52	LB113	2.94	LB95	2.28
LB115	2.24	SR01	2.21	LB115	2.21	LB98	2.72
LB128	1.60	SR110	1.38	LB128	1.53	ΜΠΑΚΡΑΤΣΑΣ	9.31
LB129	1.17	SR111	1.38	LB129	1.26	SR01	1.79
LB131	2.00	SR112	1.59	LB131	2.03	SR110	1.43
LB134	2.42	SR114	1.50	LB134	2.43	SR111	1.24
LB139	1.12	SR39	1.45	LB139	1.10	SR112	1.60
LB140	1.23	SR67	3.69	LB140	1.18	SR114	1.50
LB148	3.67	Γ3	0.90	LB148	3.29	SR39	1.58
LB152	4.27	ΕΛ47	4.31	LB152	4.76	Γ3	0.75
LB213	4.99	ΕΛ55	1.32	LB214	11.26	ΕΛ55	1.31
LB250	1.94	Λ41	1.32	LB237	4.26	Λ41	1.43
LB251	2.64	Λ43	1.99	LB250	1.78	Λ43	2.02
LB257	7.87	Λ53	1.62	LB251	2.40	Λ53	1.83
LB260	2.10	Λ76	1.92	LB257	6.38	Λ76	1.88
LB268	1.95			LB260	2.02		

(Ca²⁺+Mg²⁺) / (SO₄²⁻+HCO₃⁻): Ο ιοντικός αυτός λόγος των κατιόντων Ca²⁺ και Mg²⁺ προς τα ανιόντα SO₄²⁻ και HCO₃⁻, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης διάλυσης πυριτικών ορυκτών. Γενικά, αν ο ιοντικός αυτός λόγος είναι μικρότερος της μονάδας ($[SO_4^{2-}+HCO_3^-] > [Ca^{2+}+Mg^{2+}]$), τότε υπάρχει ένδειξη για διάλυση πυριτικών ορυκτών. Στο Διάγραμμα 8.15 απεικονίζεται η προβολή των ανιόντων του ιοντικού λόγου προς τα κατιόντα για τις δύο περιόδους (Ξηρή-Υγρή), στο οποίο έχει ενσωματωθεί η γραμμή αναλογίας 1 προς 1 (μαύρη γραμμή τάσης). Σε αυτή την περίπτωση, όποιες θέσεις βρίσκονται κάτω από τη γραμμή αυτή έχουν άθροισμα ανιόντων μεγαλύτερο από το άθροισμα των κατιόντων, δηλαδή έχουν ιοντικό λόγο μικρότερο από τη μονάδα και άρα συνθήκες διάλυσης πυριτικών ορυκτών. Στην αντίθετη περίπτωση, στις θέσεις που βρίσκονται πάνω από τη γραμμή επικρατεί η διάλυση ανθρακικών ορυκτών.

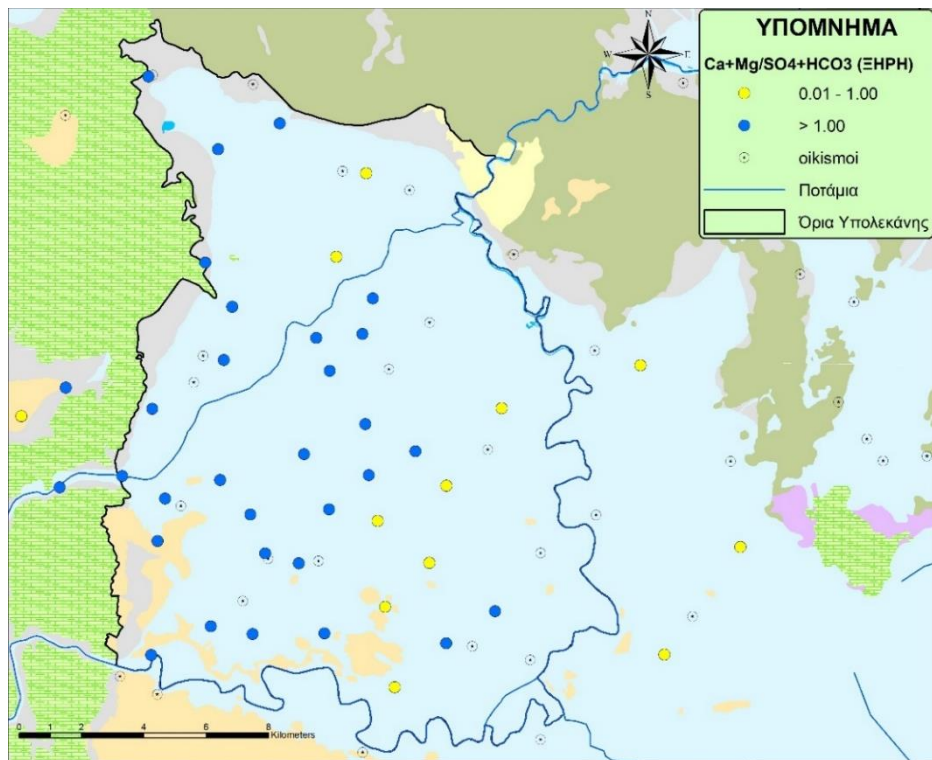


Διάγραμμα 8.15. Συσχέτιση των συγκεντρώσεων των κατιόντων $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ (meq/l) με τις συγκεντρώσεις των ανιόντων $SO_4^{2-}+HCO_3^-$ για την ξηρή (αριστερά) και την υγρή (δεξιά) περίοδο.

Όπως προκύπτει και για τις δύο περιόδους στις περισσότερες θέσεις επικρατεί η διάλυση των ανθρακικών έναντι των πυριτικών ορυκτών. Η χωρική κατανομή του ιοντικού λόγου αυτού φαίνεται στις ακόλουθες Εικόνες 8.47 και 8.48. Από την σύγκριση των δυο περιόδων δεν παρουσιάζονται ουσιαστικές αλλαγές στην χωρική κατανομή του ιοντικού λόγου. Οι επικρατούσες θέσεις, όπου συμβαίνει διάλυση ανθρακικών ορυκτών, κατανέμονται στο δυτικό και κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης, ενώ οι θέσεις όπου επικρατούν συνθήκες διάλυσης πυριτικών ορυκτών κατανέμονται στο νοτιοανατολικό κυρίως τμήμα καθώς και στα ανατολικά του Πηνειού ποταμού στην επέκταση της κύριας περιοχής έρευνας.



Εικόνα 8.47. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $(Ca^{2+}+Mg^{2+}) / (SO_4^{2-}+HCO_3^-)$, υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο.



Εικόνα 8.48. Χωρική κατανομή ιοντικού λόγου $(Ca^{2+}+Mg^{2+}) / (SO_4^{2-}+HCO_3^-)$, υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο.

Συντελεστής Revelle (R): Ο συντελεστής Revelle (Revelle 1946), αποτελεί ένα κριτήριο εκτίμησης της ποιοτικής υποβάθμισης του υπόγειου νερού. Ο υπολογισμός του συντελεστή αυτού από τον ιοντικό λόγο $\frac{Cl}{(CO_3 + HCO_3)}$ σε meq/L. Η αρχική χρήση του συντελεστή Revelle είχε ως σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης θαλάσσιας διείσδυσης σε υδροφόρους. Ωστόσο, επειδή η συγκέντρωση των ιόντων Cl μπορεί να αυξηθεί και λόγω ανθρωπογενών επιδράσεων, μπορεί να θεωρηθεί ως γενικότερο κριτήριο εκτίμησης της ρύπανσης, λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής (Τζιρίτης 2008). Στον Πίνακα 8.13 παρουσιάζονται τα όρια ρύπανσης του υπόγειου νερού όπως προτάθηκαν από τον Revelle (1946).

Πίνακας 8.13. Διαβαθμίσεις στην ποιότητα του νερού με βάση το συντελεστή Revelle (Revelle 1946).

Συντελεστής Revelle (R)	Χαρακτηρισμός νερού
<1	Νερό καλής ποιότητας
1-2	Ελαφρώς ρυπασμένο
2-6	Μέτρια ρυπασμένο
6-10	Σοβαρά ρυπασμένο
10-150	Επικίνδυνα ρυπασμένο
>150	Θαλασσινό νερό

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 8.14 όλα τα δείγματα του υπόγειου νερού, τόσο για την ξηρή περίοδο (μέσος όρος των δύο ξηρών περιόδων) όσο και για την υγρή (μέσος όρος των δύο υγρών περιόδων), παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές του συντελεστή Revelle ($R < 1$), υποδηλώνοντας έτσι ότι πρόκειται για νερά καλής ποιότητας. Η κατάταξη αυτή βέβαια έχει γίνει με βάση τον εμπλουτισμό ή μη σε Cl^- και δεν λαμβάνει υπόψη άλλους πιθανούς ρύπους. Συνεπώς η εκτίμηση της ποιότητας του νερού, από το συγκεκριμένο ποιοτικό δείκτη, γίνεται με βάση την ενδεχόμενη υφαλμύριση που προκύπτει λόγω θαλάσσιας διείσδυσης ή άλλες δραστηριότητες που μπορεί να αυξήσουν τη συγκέντρωση των χλωριόντων (π.χ. διάθεση αστικών λυμάτων).

Με βάση τις τιμές του Πίνακα 8.14 μια χωρική κατανομή του συντελεστή Revelle δεν θα είχε πρακτική σημασία καθώς πρόκειται για πολύ χαμηλές τιμές που ανήκουν στην ίδια τάξη διαβάθμισης. Η εφαρμογή του συντελεστή Revelle ουσιαστικά δείχνει ότι τα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας είναι απαλλαγμένα από σημαντική ρύπανση που μπορεί να οφείλεται στα ιόντα χλωρίου.

Πίνακας 8.14. Συντελεστής Revelle για τα υπόγεια νερά ξηρής και υγρής περιόδου για την περιοχή έρευνας.

ΞΗΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ R	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΥΓΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ R	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
75Λ	0.08	Καλής ποιότητας	75Λ	0.08	Καλής ποιότητας
AD2	0.05	Καλής ποιότητας	AD2	0.06	Καλής ποιότητας
AD3	0.08	Καλής ποιότητας	AD3	0.07	Καλής ποιότητας
F-1	0.03	Καλής ποιότητας	F-1	0.04	Καλής ποιότητας
K-1	0.03	Καλής ποιότητας	K-1	0.04	Καλής ποιότητας
LB110	0.07	Καλής ποιότητας	LB110	0.07	Καλής ποιότητας
LB113	0.06	Καλής ποιότητας	LB113	0.06	Καλής ποιότητας
LB115	0.07	Καλής ποιότητας	LB115	0.07	Καλής ποιότητας
LB128	0.07	Καλής ποιότητας	LB128	0.07	Καλής ποιότητας
LB129	0.10	Καλής ποιότητας	LB129	0.10	Καλής ποιότητας
LB131	0.06	Καλής ποιότητας	LB131	0.06	Καλής ποιότητας
LB134	0.06	Καλής ποιότητας	LB134	0.06	Καλής ποιότητας
LB139	0.12	Καλής ποιότητας	LB139	0.13	Καλής ποιότητας
LB140	0.12	Καλής ποιότητας	LB140	0.13	Καλής ποιότητας
LB148	0.05	Καλής ποιότητας	LB148	0.06	Καλής ποιότητας
LB152	0.07	Καλής ποιότητας	LB152	0.08	Καλής ποιότητας
LB213	0.53	Καλής ποιότητας	LB214	0.06	Καλής ποιότητας
LB250	0.06	Καλής ποιότητας	LB237	0.35	Καλής ποιότητας
LB251	0.08	Καλής ποιότητας	LB250	0.06	Καλής ποιότητας
LB257	0.07	Καλής ποιότητας	LB251	0.09	Καλής ποιότητας
LB260	0.14	Καλής ποιότητας	LB257	0.07	Καλής ποιότητας
LB268	0.17	Καλής ποιότητας	LB260	0.16	Καλής ποιότητας
LB271	0.34	Καλής ποιότητας	LB268	0.17	Καλής ποιότητας
LB279	0.06	Καλής ποιότητας	LB271	0.35	Καλής ποιότητας
LB81	0.08	Καλής ποιότητας	LB279	0.06	Καλής ποιότητας
LB84	0.08	Καλής ποιότητας	LB81	0.08	Καλής ποιότητας
LB90	0.07	Καλής ποιότητας	LB84	0.06	Καλής ποιότητας
LB95	0.07	Καλής ποιότητας	LB90	0.07	Καλής ποιότητας
LB98	0.11	Καλής ποιότητας	LB95	0.06	Καλής ποιότητας
SR01	0.12	Καλής ποιότητας	LB98	0.09	Καλής ποιότητας
SR110	0.07	Καλής ποιότητας	M-1	0.05	Καλής ποιότητας
SR111	0.07	Καλής ποιότητας	SR01	0.13	Καλής ποιότητας
SR112	0.06	Καλής ποιότητας	SR110	0.07	Καλής ποιότητας
SR114	0.05	Καλής ποιότητας	SR111	0.07	Καλής ποιότητας
SR39	0.10	Καλής ποιότητας	SR112	0.06	Καλής ποιότητας
SR67	0.04	Καλής ποιότητας	SR114	0.05	Καλής ποιότητας
Γ3	0.29	Καλής ποιότητας	SR39	0.08	Καλής ποιότητας
ΕΛ47	0.17	Καλής ποιότητας	Γ3	0.32	Καλής ποιότητας
ΕΛ55	0.17	Καλής ποιότητας	ΕΛ55	0.17	Καλής ποιότητας
Λ41	0.05	Καλής ποιότητας	Λ41	0.05	Καλής ποιότητας
Λ43	0.11	Καλής ποιότητας	Λ43	0.11	Καλής ποιότητας
Λ53	0.08	Καλής ποιότητας	Λ53	0.08	Καλής ποιότητας
Λ76	0.06	Καλής ποιότητας	Λ76	0.07	Καλής ποιότητας
Msp	0.04	Καλής ποιότητας	Msp	0.05	Καλής ποιότητας
			Ag.Anna	0.07	Καλής ποιότητας

8.9.2 ΔΕΙΚΤΕΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Μέσα σε ένα υδατικό διάλυμα η διάλυση ενός στερεού συστατικού λαμβάνει χώρα μέχρις ότου το διάλυμα αυτό κορεστεί ως προς το συστατικό αυτό. Στο σημείο αυτό έχει επέλθει χημική ισορροπία στο υδατικό διάλυμα, ενώ στην περίπτωση που η διάλυση συνεχιστεί, τότε δημιουργείται περίσσεια του συστατικού αυτού, η οποία τείνει να εξαλειφθεί με την απόθεση ιζήματος. Στο υπόγειο νερό ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία με τα εν διαλύσει ορυκτολογικά συστατικά και ο βαθμός της χημικής ισορροπίας ανάμεσα στο νερό και σε ένα συστατικό περιγράφεται με τον δείκτη κορεσμού ή δείκτη Langelier (Saturation Index), ο οποίος εκφράζεται από τον δεκαδικό λογάριθμο του λόγου IAP/K, όπου IAP το γινόμενο ιοντικής δραστηριότητας στο δείγμα νερού και K το γινόμενο της διαλυτότητας του ορυκτού σε ισορροπία (Appelo & Postma 2005):

$$SI = \log \left(\frac{IAP}{K} \right) \quad (8.4)$$

Θετικές τιμές του δείκτη κορεσμού υποδηλώνουν την τάση του νερού για απόθεση του ορυκτού συστατικού (υπερκορεσμένο διάλυμα), ενώ αρνητικές τιμές υποδηλώνουν την τάση για περαιτέρω διάλυση του ορυκτού συστατικού (ακόρεστο διάλυμα). Στην ειδική περίπτωση που $SI=0$, τότε έχει επέλθει χημική ισορροπία μεταξύ του νερού και του ορυκτού συστατικού, γεγονός που σπάνια επιτυγχάνεται (Appelo & Postma 2005). Η χρήση του δείκτη κορεσμού περιορίζεται σε ευδιάλυτες ενώσεις (π.χ. ανθρακικά ορυκτά) και στον προσδιορισμό των παραμέτρων που συμβάλλουν στη διάβρωση ή την απόθεση ασβεστίτη ή δολομίτη ή γύψου (Τζιρίτης 2008, Λάππας 2018). Σημειώνεται ότι ο βαθμός κορεσμού μεταβάλλεται και ως συνάρτηση των φυσικών χαρακτηριστικών που επικρατούν στο υπό μελέτη σύστημα (πίεση, θερμοκρασία κλπ).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή για τον υπολογισμό του δείκτη κορεσμού των κύριων ορυκτών συστατικών χρησιμοποιήθηκε ο γεωχημικός κώδικας PHREEQC (Parkhurst & Appelo 2004) μέσω του λογισμικού πακέτου AquaChem. Και στην περίπτωση αυτή τα δείγματα διαχωρίστηκαν σε υγρής και ξηρής περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη για κάθε μία από αυτές των μέσο όρο των συγκεντρώσεων των τεσσάρων συνολικά (2 υγρών και 2 ξηρών) περιόδων δειγματοληψίας. Στους Πίνακες 8.15 και 8.16, φαίνονται αναλυτικά οι τιμές του δείκτη κορεσμού των κυριότερων ορυκτών των γεωτρήσεων για την υγρή και την ξηρή περίοδο αντίστοιχα, ενώ στο Διάγραμμα 8.16, που ακολουθεί, απεικονίζονται τα ιστογράμματα συχνότητων των τιμών του δείκτη κορεσμού για κάθε ορυκτό ανά περίοδο.

Πίνακας 8.15. Τιμές δεικτών κορεσμού για τα κυριότερα ορυκτά των γεωτρήσεων της υγρής περιόδου.

ΥΓΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ							
	Ανυδρίτης	Αραγωνίτης	Ασβεσίτης	Δολομίτης	Σιδηρίτης	Αλίτης	Γύψος
Κωδικός Γεώτρησης	CaSO ₄	CaCO ₃	CaCO ₃	CaMg(CO ₃) ₂	FeCO ₃	NaCl	CaSO ₄ ·2H ₂ O
75A	-2.78	0.91	1.06	1.80	-1.32	-8.48	-2.54
AD2	-3.11	0.66	0.81	1.21	-1.47	-8.47	-2.87
AD3	-4.60	0.64	0.79	1.23	-1.13	-8.61	-4.37
Fakas-1	-2.59	0.65	0.80	1.64	-0.79	-8.40	-2.35
Karaiskos-1	-3.70	0.51	0.65	1.31	-0.70	-8.54	-3.46
LB110	-2.93	0.79	0.94	1.53	-2.25	-8.60	-2.69
LB113	-3.95	0.71	0.86	1.48	-1.28	-8.78	-3.71
LB115	-3.66	0.90	1.05	1.81	-1.12	-8.58	-3.42
LB128	-3.50	1.03	1.18	2.02	-1.01	-8.61	-3.26
LB129	-2.88	1.02	1.16	1.97	-1.18	-8.56	-2.64
LB131	-3.04	1.01	1.16	1.97	-1.12	-8.65	-2.80
LB134	-2.91	0.91	1.06	1.86	-0.76	-8.36	-2.67
LB139	-2.80	1.07	1.22	2.07	-0.91	-8.22	-2.56
LB140	-3.75	1.21	1.36	2.45	-1.86	-8.31	-3.52
LB148	-3.56	0.69	0.83	1.47	-0.83	-8.52	-3.32
LB152	-3.26	0.81	0.95	1.73	-2.24	-8.34	-3.03
LB214	-4.44	0.45	0.60	1.43	-1.70	-7.47	-4.21
LB237	-1.77	0.89	1.04	2.21	-1.69	-7.17	-1.53
LB250	-2.74	1.15	1.29	2.25	-1.41	-8.59	-2.50
LB251	-2.54	0.85	1.00	1.77	-0.82	-8.09	-2.30
LB257	-2.64	0.72	0.87	1.90	-0.80	-7.98	-2.40
LB260	-2.06	1.07	1.22	2.51	-0.56	-7.56	-1.82
LB268	-2.38	0.87	1.01	2.05	-1.03	-7.75	-2.14
LB271	-2.12	0.64	0.79	1.74	-1.20	-7.38	-1.88
LB279	-2.99	0.97	1.11	1.79	-1.13	-8.72	-2.75
LB81	-2.68	1.02	1.17	2.00	-1.13	-8.58	-2.44
LB84	-3.65	0.90	1.05	1.74	-0.84	-8.76	-3.41
LB90	-2.37	1.09	1.23	2.22	-0.95	-8.20	-2.14
LB95	-4.39	0.97	1.12	1.90	-1.55	-8.58	-4.15
LB98	-2.49	0.78	0.93	1.63	-1.03	-8.29	-2.25
Mpakratsas	-4.09	0.20	0.35	0.73	-1.58	-8.43	-3.85
SR01	-3.13	0.57	0.72	1.22	-0.99	-8.37	-2.89
SR110	-4.24	0.78	0.92	1.62	-0.94	-8.62	-4.01
SR111	-2.70	0.71	0.85	1.20	-1.24	-8.75	-2.46
SR112	-2.73	0.83	0.97	1.56	-1.68	-8.72	-2.49
SR114	-3.50	0.99	1.14	1.77	-0.77	-8.83	-3.27
SR39	-3.05	1.03	1.18	1.97	-0.89	-8.55	-2.82
Γ3	-2.45	0.31	0.46	0.89	-1.41	-7.57	-2.21
ΕΛ55	-2.49	0.99	1.14	1.87	-1.04	-7.73	-2.25
Λ41	-2.62	0.98	1.13	1.90	-0.79	-8.65	-2.38
Λ43	-2.30	1.21	1.36	2.49	-0.81	-7.87	-2.07
Λ53	-3.88	0.87	1.02	1.72	-1.04	-8.63	-3.65
Λ76	-2.37	0.76	0.91	1.42	-1.31	-8.39	-2.14

Πίνακας 8.16. Τιμές δεικτών κορεσμού για τα κυριότερα ορυκτά των γεωτρήσεων της ξηρής περιόδου.

ΞΗΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ							
	Ανυδρίτης	Αραγωνίτης	Ασβεσίτης	Δολομίτης	Σιδηρίτης	Αλίτης	Γύψος
	CaSO ₄	CaCO ₃	CaCO ₃	CaMg(CO ₃) ₂	FeCO ₃	NaCl	CaSO ₄ ·2H ₂ O
75Λ	-2.70	0.91	1.06	1.79	-0.63	-8.48	-2.46
AD2	-2.73	0.73	0.87	1.36	-0.67	-8.45	-2.49
AD3	-3.92	0.59	0.74	1.20	-0.78	-8.61	-3.69
Fakas-1	-3.71	1.06	1.21	2.43	-0.08	-8.37	-3.47
Karaiskos-1	-4.86	0.44	0.58	1.32	-0.85	-8.52	-4.62
LB110	-2.95	0.88	1.03	1.69	-0.78	-8.64	-2.72
LB113	-4.48	0.60	0.74	1.32	-1.25	-8.79	-4.24
LB115	-4.13	0.81	0.96	1.76	-1.43	-8.57	-3.89
LB128	-3.34	0.83	0.98	1.63	-1.04	-8.59	-3.10
LB129	-2.99	0.99	1.14	1.93	-1.28	-8.54	-2.75
LB131	-4.14	0.85	1.00	1.67	-1.33	-8.70	-3.90
LB134	-3.53	0.87	1.02	1.79	-1.09	-8.34	-3.29
LB139	-2.50	1.15	1.29	2.22	-1.06	-8.22	-2.26
LB140	-3.42	0.94	1.09	1.92	-1.58	-8.38	-3.19
LB148	-3.46	0.64	0.79	1.48	-1.62	-8.46	-3.23
LB152	-3.60	0.69	0.83	1.54	-1.96	-8.42	-3.36
LB213	-1.58	1.13	1.28	2.71	-0.56	-6.26	-1.35
ΕΛ47	-2.84	0.52	0.66	1.70	-1.66	-7.02	-2.60
LB250	-2.59	0.89	1.04	1.75	-1.07	-8.56	-2.35
LB251	-2.39	1.09	1.23	2.32	-1.27	-8.01	-2.15
LB257	-2.97	0.73	0.88	2.03	-1.52	-7.77	-2.74
LB260	-2.02	1.02	1.17	2.43	-1.19	-7.66	-1.78
LB268	-2.31	1.03	1.18	2.54	-0.81	-7.63	-2.07
LB271	-2.04	0.73	0.88	1.88	-1.88	-7.40	-1.80
LB279	3.08	0.75	0.90	1.36	-0.52	-8.74	-2.84
LB81	-2.96	1.01	1.16	1.98	-0.62	-8.58	-2.72
LB84	-3.55	1.01	1.16	1.96	-1.32	-8.68	-3.31
LB90	-2.49	1.08	1.23	2.24	-1.32	-8.32	-2.26
LB95	-4.15	0.82	0.97	1.63	-1.22	-8.53	-3.92
LB98	-2.35	0.83	0.98	1.73	-0.85	-8.19	-2.11
SR67	-5.00	0.89	1.03	1.55	-0.59	-8.58	-4.77
SR01	-4.58	0.26	0.40	0.68	-1.45	-8.40	-4.34
SR110	-3.08	0.92	1.07	1.94	-0.82	-8.59	-2.84
SR111	-3.83	0.91	1.06	1.67	-0.91	-8.79	-3.60
SR112	-3.24	0.88	1.03	1.69	-1.27	-8.72	-3.00
SR114	-3.71	0.70	0.85	1.22	-0.98	-8.81	-3.48
SR39	-2.97	0.84	0.99	1.58	-0.38	-8.37	-2.73
Γ3	-2.49	0.58	0.72	1.47	-1.17	-7.61	-2.26
ΕΛ55	-2.36	0.87	1.01	1.62	-1.03	-7.69	-2.12
Λ41	-2.53	1.05	1.19	2.04	-0.93	-8.65	-2.29
Λ43	-2.35	1.20	1.35	2.51	-0.63	-7.88	-2.11
Λ53	-3.60	0.96	1.11	1.91	-1.21	-8.64	-3.36
Λ76	-2.53	0.55	0.69	1.03	-1.03	-8.46	-2.29



Διάγραμμα 8.16. Ιστογράμματα συχνότητων των τιμών του δείκτη κορεσμού των κυριότερων ορυκτών για την υγρή και ξηρή περίοδο δειγματοληψίας.

Από τα παραπάνω διαγράμματα συχνοτήτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με τους δείκτες κορεσμού των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης:

❖ Δεν παρατηρούνται ουσιαστικές διαφοροποιήσεις στους δείκτες κορεσμού των βασικών ορυκτών μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου, γεγονός που αναμενόταν καθώς δεν υπήρχαν και σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των τεσσάρων περιόδων δειγματοληψίας.

❖ Οι δείκτες κορεσμού του δολομίτη ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), του ασβεστίτη (CaCO_3) και του αραγωνίτη (CaCO_3) είναι στο σύνολό τους θετικοί και στις δύο περιόδους, γεγονός το οποίο υποδεικνύει: (i) κίνηση του νερού δια μέσου ασβεστο-μαγνησιούχων πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάργες) με ποικίλη περιεκτικότητα σε Ca^{2+} και Mg^{2+} , (ii) υπερκορεσμένα διαλύματα σε Ca^{2+} και Mg^{2+} και τάση του νερού για απόθεση των συγκεκριμένων αυτών ορυκτών και (iii) σημαντικό χρόνο παραμονής των ανθρακικών ορυκτών του υπόγειου νερού στον υδροφόρο (περιορισμένη ταχύτητα υπόγειας απορροής).

❖ Αντιθέτως, οι δείκτες κορεσμού του σιδηρίτη (FeCO_3), του αλίτη (NaCl) και της γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) είναι στο σύνολό τους αρνητικοί και στις δύο περιόδους, υποδεικνύοντας έτσι ακόρεστα διαλύματα στα ορυκτά αυτά και τάση για περαιτέρω διάλυσή τους. Μεγαλύτερη τάση διάλυσης παρουσιάζεται στην περίπτωση του αλίτη, καθώς το 77% των τιμών της υγρής και το 80% των τιμών της ξηρής περιόδου κυμαίνονται από -8 έως -9. Μικρότερη τάση διάλυσης παρουσιάζει ο σιδηρίτης, καθώς το 80% των τιμών της υγρής και το 87% των τιμών της ξηρής περιόδου κυμαίνονται από -0.5 έως -1.5.

❖ Στην περίπτωση του ανυδρίτη (CaSO_4), το 98% των τιμών του δείκτη κορεσμού της υγρής περιόδου κυμαίνονται από -2 έως -5 και το υπόλοιπο 2% από -1 έως -2. Για την ξηρή περίοδο το 96% των τιμών κυμαίνονται από -2 έως -5, το 2% από -2 έως 0, ενώ το υπόλοιπο 2% παρουσιάζει θετικό πρόσημο μεταξύ 0 και 3. Μόνο κατά την ξηρή περίοδο δηλαδή υπάρχει ένα μικρό ποσοστό δειγμάτων, το οποίο παρουσιάζεται υπερκορεσμένο σε ανυδρίτη και έχει την τάση για απόθεση του συγκεκριμένου ορυκτού.

9 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ & ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

9.1 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

Η ποιοτική αξιολόγηση των υπόγειων υδάτων αποτελεί μια πολυδιάστατη έννοια καθοριζόμενη, σε κάθε περίπτωση, από τον τελικό αποδέκτη-χρήστη. Μέχρι σήμερα, το ενδιαφέρον για τα υπόγεια νερά αφορούσε κυρίως στην κάλυψη των αναγκών για ύδρευση (περίπου το 75% των κατοίκων της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξαρτώνται από τα υπόγεια αποθέματα για την παροχή νερού για ανθρώπινη κατανάλωση), αναγνωρίζοντας επίσης ότι είναι ένας σημαντικός φυσικός πόρος για την άντληση νερού για τη βιομηχανία (π.χ. ψυκτικό ύδωρ) και τη γεωργία (άρδευση). Εντούτοις, γίνεται όλο και περισσότερο αντιληπτό ότι τα υπόγεια ύδατα πρέπει να αντιμετωπισθούν όχι μόνο ως μια δεξαμενή, από την οποία μπορεί να αντληθεί νερό καλής ποιότητας, για διάφορες χρήσεις, αλλά και να προστατευθούν για την περιβαλλοντική τους αξία.

Με βάση την Ευρωπαϊκή Οδηγία – Πλαίσιο για τη διαχείριση των Υδάτων (Οδηγία 2000/60/ΕΚ), η οποία είναι σε ισχύ από το Δεκέμβριο του 2000, αλλά και τη θυγατρική της 2006/118/ΕΚ, αναφορικά με τα υπόγεια νερά, θεσπίζεται για πρώτη φορά η έννοια της «οικολογικής σημασίας» των υπόγειων υδάτων, παράλληλα και ανεξάρτητα της όποιας άλλης χρήσης τους, προκρίνοντας έτσι την περιβαλλοντική διάσταση της έννοιας ποιοτική αξιολόγηση. Η μεθοδολογία προσδιορισμού της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων είναι απόρροια των ευρωπαϊκών οδηγιών αλλά και της ελληνικής νομοθεσίας. Τα δύο πιο βασικά στάδια της μεθοδολογίας είναι (i) ο έλεγχος -αξιολόγηση των παραμέτρων των φυσικών-χημικών αναλύσεων των υδροσημείων του συστήματος και (ii) η αξιολόγηση των πιέσεων που οφείλονται σε ανθρωπογενή αίτια και όχι σε φυσικές διεργασίες (ΕΓΥ 2014). Αναλυτικότερα, τα στάδια εφαρμογής της μεθοδολογίας που υιοθετούνται και εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων είναι:

- (α) προσδιορισμός περιόδου αναφοράς,
- (β) προσδιορισμός συγκέντρωσης αναφοράς,
- (γ) διάγνωση τάσης,
- (δ) υπολογισμός μέσης τιμής συγκέντρωσης ανά θέση,
- (ε) ανάλυση πιέσεων,
- (στ) αξιολόγηση της χημικής κατάστασης του υπόγειου υδατικού συστήματος.

Πέρα από την περιβαλλοντική διάσταση της ποιοτικής αξιολόγησης, που όπως ειπώθηκε προηγουμένως, είναι αυτή στην οποία εστιάζουν οι Ευρωπαϊκές Οδηγίες (2000/60/ΕΚ & 2006/118/ΕΚ), υφίσταται και η ποιοτική αξιολόγηση, που σχετίζεται με την καταλληλότητα του υπόγειου ύδατος ως προς μία συγκεκριμένη χρήση (π.χ. ύδρευση, άρδευση, βιομηχανία κ.α.). Στη περίπτωση αυτή το πεδίο εστίασης δεν είναι το περιβάλλον αλλά η χρήση για την οποία προορίζεται το υπό αξιολόγηση υπόγειο νερό. Και ενώ στην περιβαλλοντική αξιολόγηση δεν λαμβάνονται υπόψη οι απόλυτες τιμές των χημικών

παραμέτρων, εφόσον αυτές είναι αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών και εξελίξεων, στην περίπτωση της χρηστικής ποιοτικής αξιολόγησης, οι τιμές αυτές των χημικών παραμέτρων καθορίζουν το αποτέλεσμα της αξιολόγησης ανεξάρτητα από την αιτία προέλευσής τους. Με βάση τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ένα δείγμα υπόγειου ύδατος μπορεί να είναι άριστο ποιοτικά από περιβαλλοντικής απόψεως, αλλά πλήρως ακατάλληλο ως προς μία ή/και περισσότερες χρήσεις.

Σε προηγούμενη ερευνητική εργασία (Panagoroulos et al 2012), έλαβε χώρα η περιβαλλοντική αξιολόγηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων, για ολόκληρη την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού ποταμού με βάση την εθνική μεθοδολογία, που αναφέρθηκε παραπάνω. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο, να μην επαναληφθεί η συγκεκριμένη διαδικασία στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, καθώς δε θα αποτελούσε πρότυπο και καινοτόμο στοιχείο για την περιοχή. Ωστόσο, η περιβαλλοντική διάσταση της ποιοτικής αξιολόγησης πραγματοποιήθηκε, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, με τη χρήση ενός πρότυπου δείκτη αξιολόγησης (Δείκτης PoS), ο οποίος εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στη συγκεκριμένη περιοχή.

Αναφορικά με την χρηστική ποιοτική αξιολόγηση των υπόγειων υδάτων της περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη ότι η κυρίαρχη χρήση του νερού είναι η άρδευση, στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο δείκτη SAR και το συνεπακόλουθο διάγραμμα Wilcox, ως μια ένδειξη καταλληλότητας των υπόγειων υδάτων της περιοχής για αρδευτικούς σκοπούς. Στη περίπτωση αυτή, πρέπει να τονισθεί ότι η αρδευτική ποιοτική κατάσταση, που θα προκύψει από την ανάλυση του δείκτη SAR και του διαγράμματος Wilcox, δεν καθιστά αυτομάτως το συγκεκριμένο νερό κατάλληλο για άρδευση, απαλλαγμένο από οποιουσδήποτε άλλους περιορισμούς. Στην επίλυση της εξίσωσης «καταλληλότητα» υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες, βασικότεροι από τους οποίους είναι το είδος της αρδευόμενης καλλιέργειας και ο τύπος του καλλιεργούμενου εδάφους. Χαρακτηριστικά όπως, η ανθεκτικότητα και η παραγωγικότητα μιας καλλιέργειας καθώς και η ποιότητα του εδάφους πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη, έτσι ώστε να αποδοθεί ο όρος κατάλληλο σε ένα υπόγειο νερό που προορίζεται για συγκεκριμένη αρδευτική χρήση. Η αρδευτική καταλληλότητα λοιπόν έχει να κάνει με το συνολικό σύστημα έδαφος-νερό-φυτό και ως εκ τούτου δεν μπορεί να αποδοθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, καθώς κάτι τέτοιο θα ξέφευγε από τους στόχους της..

Τέλος, σχετικά με την ποσιμότητα του υπόγειου νερού της περιοχής, η οποία είναι η δεύτερη κατά σειρά επικρατούσα χρήση, γίνεται σύγκριση των υδροχημικών αναλύσεων με τα ανώτατα όρια ποσιμότητας, όπως αυτά ορίστηκαν για την Ελλάδα από το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017. Ένα νερό θεωρείται μη κατάλληλο προς πόση όταν έστω και μία από τις εξεταζόμενες παραμέτρους ξεπερνά τα ανώτατα αυτά όρια χωρίς ωστόσο να ισχύει υποχρεωτικά το αντίστροφο, όπως θα ειπωθεί στην αντίστοιχη Παράγραφο (9.1.3.).

9.1.1 ΔΕΙΚΤΗΣ Poseidon (PoS Index)

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση της ποιότητας των δειγμάτων του υπόγειου νερού πραγματοποιήθηκε και με τη βοήθεια του δείκτη PoS (Tziritis et al. 2014), ο οποίος αποδίδει το αποτύπωμα της περιβαλλοντικής ποιότητας ενός δείγματος νερού λόγω της παρουσίας των διαφόρων παραμέτρων του (κάθε μία από τις οποίες μπορεί να έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στον άνθρωπο και τα φυσικά συστήματα) και το δυνητικό αθροιστικό τους αποτέλεσμα. Πρόκειται για μια εναλλακτική προσέγγιση αξιολόγησης και χαρακτηρισμού της ποιότητας των υδάτων, η οποία επιτρέπει χρονικές συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών περιόδων δειγματοληψίας στην ίδια λεκάνη, αλλά και αξιολογήσεις μεταξύ λεκανών στις οποίες ασκούνται διαφορετικές πιέσεις και ελέγχονται από διάφορους μηχανισμούς (Tziritis et al. 2016).

Οι βασικές διαφορές του δείκτη PoS σε σχέση με άλλους ποιοτικούς δείκτες που έχουν προταθεί είναι (α) ότι ο δείκτης PoS δεν μεταβάλλεται με τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους (αριθμό και φύση), ενώ οι υπόλοιποι ποιοτικοί δείκτες μεταβάλλονται και (β) οι προαναφερθέντες δείκτες επικεντρώνονται είτε σε (i) συγκεκριμένους στόχους, είτε σε (ii) συγκεκριμένες διεργασίες ή τέλος (iii) σε χαρακτηρισμό που σχετίζεται με την τελική χρήση (π.χ. ποιότητα πόσιμου ή αρδευτικού νερού). Αντίθετα, ο δείκτης PoS παρέχει μια γενική αξιολόγηση της ποιότητας μέσω μιας μοναδικής βαθμολογίας, αντιπροσωπευτικής της συνολικής ποιοτικής κατάστασης του νερού, ανεξάρτητα από τις διεργασίες (ανθρωπογενείς ή φυσικές), τους στόχους και τον χαρακτηρισμό (Tziritis et al. 2014).

Τέλος, ο δείκτης PoS δεν αποδίδει μόνο την περιβαλλοντική ποιοτική κατάσταση ενός δείγματος υπόγειου ύδατος, αλλά εντοπίζει και ποια είναι η χημική παράμετρος που προκαλεί την παρέκκλιση σε σχέση με ένα «καλό» περιβαλλοντικό πρότυπο, επιφέροντας έτσι τοξικότητα και επομένως δίνεται και η κατεύθυνση για την επίλυση του προβλήματος.

Ο PoS, ως δείκτης ποιότητας νερού, σχεδιάστηκε έτσι ώστε να επιτρέπει εύκολες και επιτόπιες χρονικές και χωρικές συγκριτικές μελέτες και εκτιμήσεις της ποιοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων ανεξαρτήτως του αριθμού των διαθέσιμων υδρογεωχημικών παραμέτρων και της συνοχής τους στις εξεταζόμενες λεκάνες και τις χρονικές περιόδους. Προσπαθεί επίσης να επιλύσει το ζήτημα των ημιτελών βάσεων δεδομένων, που υπάρχουν για την ποιότητα των υδάτων σε διαφορετικές λεκάνες απορροής, καθώς και τους χαρακτηρισμούς που έγιναν με βάση ποικίλα πρωτογενή υδρογεωχημικά δεδομένα, τα οποία συχνά δεν είναι συγκρίσιμα.

Η μεθοδολογία για τον υπολογισμό του δείκτη PoS είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις συγκεντρώσεις των επιλεγμένων παραμέτρων, οι οποίες ενδέχεται να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον. Παρόλο που τα δείγματα νερού της παρούσας μελέτης δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο, η αξιολόγηση της ποιότητάς τους επιλέχθηκε να γίνει με ανθρωποκεντρικά κριτήρια σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της Οδηγίας 98/83/EC και λαμβάνοντας υπόψη τα πρότυπα του WHO (European Council 1998; WHO 2011) για τους εξής λόγους:

(α) την ύπαρξη επαρκών πληροφοριών για ένα πολύ μεγάλο αριθμό ουσιών που έχουν έμμεσες και άμεσες επιπτώσεις στον άνθρωπο, καλύπτοντας έτσι σχεδόν όλο το φάσμα των δυνητικών ρύπων,

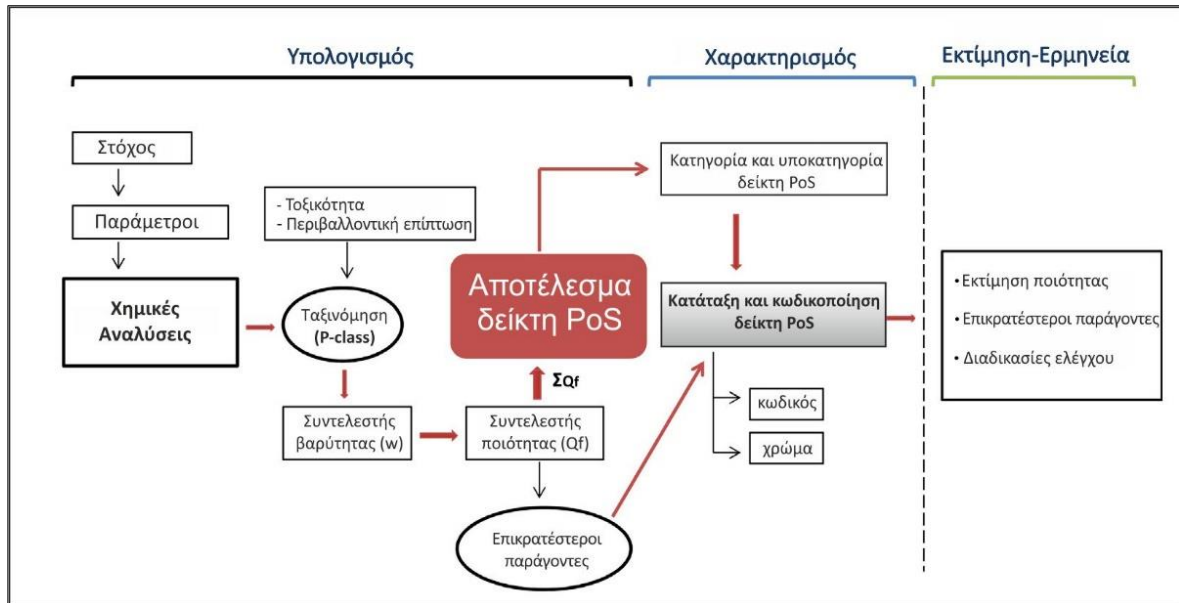
(β) το γεγονός ότι τα κριτήρια ποσιμότητας είναι ευρέως αποδεκτά σε παγκόσμιο επίπεδο, με ελάχιστες μόνο διακυμάνσεις όσον αφορά τα αποδεκτά όρια,

(γ) τα ίδια όρια χρησιμοποιούνται ουσιαστικά στα περισσότερα υδροφόρα συστήματα σε παγκόσμια κλίμακα και

(δ) δεδομένου ότι η κατανάλωση από τον άνθρωπο απαιτεί αυστηρότερα όρια σε σύγκριση με τους άλλους τελικούς αποδέκτες (π.χ. άρδευση, βιομηχανία, κτηνοτροφία), προτιμήθηκε να υιοθετηθεί μια πιο συντηρητική και περιβαλλοντικά αυστηρή προσέγγιση μεταξύ όλων των πιθανών χρήσεων.

Για τον υπολογισμό του δείκτη PoS προτείνεται η χρησιμοποίηση παραμέτρων, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται οι πιο κοινοί πιθανοί ανόργανοι ρύποι από διάφορες ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές όπως οι γεωργικές πρακτικές, η υφαλμύριση, βιομηχανικές και οικιακές εκροές, δραστηριότητες εξόρυξης και αποσάθρωσης πετρωμάτων. Η αρχική πρόταση είναι να χρησιμοποιούνται όλοι οι προτεινόμενοι παράγοντες, ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να είναι λιγότεροι, εφόσον υπάρχει έλλειψη δεδομένων ή η αξιολόγηση εστιάζεται σε συγκεκριμένο στόχο, ή και περισσότερους, στην περίπτωση που πρέπει να διεξαχθούν ειδικές έρευνες. Οι επιλεγμένες παράμετροι ταξινομούνται ανάλογα με τις συνολικές (συνεργιστικές/αθροιστικές) επιπτώσεις τους στην υγεία και το περιβάλλον, οι οποίες βασίζονται κυρίως στην τοξικότητά τους απέναντι στον άνθρωπο. Η ταξινόμησή τους βασίστηκε στη «Λίστα Προτεραιότητας Επικίνδυνων Ουσιών» (ATSDR 2011) αλλά τροποποιήθηκε περαιτέρω από δεδομένα που ελήφθησαν από διάφορες πηγές (WGK 2005, GHS 2005, Valko et al. 2005, ITER 2011, WHO 2011), προκειμένου να εξεταστούν και άλλες πτυχές της ποιότητας των υδάτων.

Στις πρώτες στήλες του Πίνακα 9.1 φαίνονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας καθώς και η ταξινόμηση με βάση την τοξικότητα. Η ταξινόμηση αυτή έχει ως σκοπό να δώσει μια σχετική σύγκριση μεταξύ των επιλεγμένων παραμέτρων για τους σκοπούς του δείκτη PoS και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να θεωρηθεί ως ατομική ποσοτική προσέγγιση της τοξικότητας. Με βάση τα παραπάνω, οι επιλεγμένοι παράμετροι ταξινομούνται ανάλογα σε 6 κατηγορίες (P-class). Η γενική προσέγγιση της μεθοδολογίας του δείκτη PoS παρουσιάζεται στο λογικό Διάγραμμα 9.1.



Διάγραμμα 9.1. Λογικό διάγραμμα της μεθοδολογικής προσέγγισης του δείκτη PoS (Tziritis et al. 2014).

Σε κάθε παραμετρική κλάση (P-class) αποδίδεται μια "μερική βαθμολογία" (Partial Score), η οποία αντανακλά το μέγεθος της συνολικής επίπτωσης όσον αφορά την τοξικότητα για τον άνθρωπο. Η μερική βαθμολογία των τιμών (PS) ακολουθεί μια εκθετική προσέγγιση, αλλά η κλίμακα μεταξύ τους επιλέγεται προσεκτικά, ώστε να υπάρχει διακριτή διαφοροποίηση μεταξύ των αναγνωρισμένων παραμετρικών κλάσεων (P-class), χωρίς να επικαλύπτουν τις χαμηλότερες από αυτές.

Με βάση τη μερική βαθμολογία, σε κάθε παράμετρο αποδίδεται ένας συντελεστής βαρύτητας (Weighting Factor), ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Wf_i = \frac{PS_i}{\sum PS_i} \quad (9.1)$$

Οι μερικές βαθμολογίες επιλέχθηκαν προσεκτικά ακολουθώντας μια προσεγγιστική διαδικασία δοκιμής-σφάλματος, με σκοπό να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα, έτσι ώστε ο συντελεστής βαρύτητας (Wf) μιας παραμέτρου, που ανήκει στην κατηγορία (P-class) VI, θα είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο μιας παραμέτρου που ανήκει στην κατηγορία I (π.χ. 0.019 για το Cl και 0.19 για το As). Το σκεπτικό πίσω από αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι μεταξύ των κατηγοριών I και II (μη τοξικές), καθώς και μεταξύ των V και VI (ιδιαίτερα και σοβαρά τοξικές) οι διαφορές ως προς τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι ασήμαντες. Αντίθετα οι επιπτώσεις μεταξύ μη τοξικών και τοξικών κατηγοριών πρέπει να διακρίνονται σαφώς.

Πίνακας 9.1. Παράμετροι υπολογισμού του δείκτη PoS για την υπολεκάνη Τυρνάβου, ταξινόμηση με βάση την τοξικότητα, μερική βαθμολογία και συντελεστής βαρύτητας.

Παράμετροι	Τοξικότητα			Partial Score	Wf
	Τάξη	Βαθμός ¹	(P-class)		
As	1	1	VI	10	0.194
Pb	2	10	V	8	0.155
Cd		10	V	8	0.155
NH ₄	3	100	IV	5	0.097
NO ₂		100	IV	5	0.097
NO ₃	4	1,000	III	3	0.058
B		5,000	II	1.5	0.029
Cu		5,000	II	1.5	0.029
Mn		5,000	II	1.5	0.029
Ca		50,000	I	1	0.019
Cl		50,000	I	1	0.019
Fe		50,000	I	1	0.019
K		50,000	I	1	0.019
Mg		50,000	I	1	0.019
Na		50,000	I	1	0.019
SO ₄		50,000	I	1	0.019
EC		50,000	I	1	0.019
Άθροισμα				51.5	

1. Βαθμός τοξικότητας (ATSDR 2011). Όσο μικρότερος ο βαθμός τόσο μεγαλύτερη η κατηγορία (P-class)

Η αξιοπιστία των τελικών συντελεστών βαρύτητας που προκύπτουν, επιβεβαιώθηκε με τεχνικές πολλαπλών μεταβλητών (ανάλυση αντικειμένων) υπολογίζοντας τον συντελεστή **Cronbach's alpha (α)**, ο οποίος αντιπροσωπεύει την εσωτερική συνοχή των εξεταζόμενων τιμών (Allen and Yen 2002). Ο συντελεστής (α) κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 και υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν μεγαλύτερη συνοχή, με ιστορικό σημείο αναφοράς αποδεκτών τιμών άνω του 0.7. Όλες οι τιμές για τους συντελεστές βαρύτητας μεταξύ των εξεταζόμενων παραμέτρων βρέθηκαν πάνω από 0.94, δείχνοντας ισχυρή εσωτερική συνοχή και επιτυχημένη εφαρμογή.

Επομένως, οι παράμετροι της ίδιας κατηγορίας P έχουν τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας, ενώ στην περίπτωση που ο αριθμός των παραμέτρων διαφέρει από τον αρχικό προτεινόμενο, οι συντελεστές βάρους υπολογίζονται, ομοίως, από τη Σχέση 9.1 δεδομένου ότι ο παρονομαστής θα προσαρμοστεί ανάλογα με τον αριθμό των παραμέτρων.

Η επιρροή κάθε παραμέτρου στη συνολική αξιολόγηση της ποιότητας του δείγματος αποδίδεται μέσω των επιμέρους συντελεστών συνεισφοράς ποιότητας (Q_{fi}), οι οποίοι υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_{fi} = \left[\frac{C_i * W_i}{MAC_i} \right] * 10^3 \quad (9.2)$$

Όπου:

Q_{fi} = ο συντελεστής συνεισφοράς ποιότητας της i παραμέτρου

C_i = η συγκέντρωση της i παραμέτρου (ίδιες μονάδες με την παράμετρο)

W_i = ο συντελεστής βαρύτητας της i παραμέτρου

MAC_i = η μέγιστη παραμετρική τιμή της i παραμέτρου (η μέγιστη αποδεκτή συγκέντρωση που καθορίζεται από την Οδηγία 98/83/EC για το νερό που προορίζεται για κατανάλωση από τον άνθρωπο)

Το τελικό στάδιο υπολογισμού του δείκτη PoS συνίσταται στην άθροιση όλων των επιμέρους συντελεστών Q_f (Σχέση 9.3). Η παραγόμενη βαθμολογία είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποιοτική αξιολόγηση ενός δείγματος.

$$PoS = \sum Q_f \quad (9.3)$$

Από τη Σχέση 9.2 μπορεί εύκολα να εξαχθεί η συνεισφορά της κάθε παραμέτρου στην συνολική ποιοτική κατάσταση του δείγματος, ως ποσοστό επί τοις εκατό. Οι επικρατούσες παράμετροι ελέγχου θεωρούνται εκείνες με ποσοστό συνεισφοράς μεγαλύτερο από 20%.

Σύμφωνα με την υπολογιζόμενη βαθμολογία του δείκτη PoS, το κάθε δείγμα κατατάσσεται σε μία κατηγορία σύμφωνα με ένα σύστημα ταξινόμησης που αναλύεται στη συνέχεια. Αυτό γίνεται προκειμένου να αποκωδικοποιηθεί η υπολογιζόμενη βαθμολογία, που είναι απλά ένας αριθμός, έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η ερμηνεία του από ένα μη εξειδικευμένο κοινό.

Με βάση ένα δείγμα αναφοράς, με συγκεντρώσεις οι οποίες αντανakλούν τις μέσες τυπικές συγκεντρώσεις που αναμένονται στα φυσικά υπόγεια ύδατα, για τις επιλεγμένες παραμέτρους, εκτελέστηκε η διαδικασία που αναφέρθηκε προκειμένου να υπολογιστεί μια τιμή κατωφλίου για τον δείκτη PoS. Η τιμή αυτή, που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον ορισμό των τάξεων και υποκατηγοριών του δείκτη PoS, είναι 150 σύμφωνα με τους Tziritis et al. (2014) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το θεμελιώδες σταθερό βήμα για την ταξινόμηση του δείκτη PoS, ανεξάρτητα από τις παραμέτρους που συμμετέχουν κάθε φορά. Ο υπολογισμός της βασίστηκε σε πολλά τεστ δοκιμής- σφάλματος, τα οποία εκτελέστηκαν με ποικίλους συνδυασμούς παραμέτρων και τα οποία έδωσαν παρόμοια τιμή. Αυτή λοιπόν η τιμή χρησιμοποιείται ως σταθερή τιμή "t" μεταξύ των διαδοχικών τάξεων του δείκτη PoS και με βάση αυτή διακρίνονται 6 τάξεις (Πίνακας 9.2). Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 9.2, όσο μεγαλύτερη είναι η τάξη του δείκτη PoS, τόσο χαμηλότερη είναι η συνολική περιβαλλοντική ποιότητα του νερού, η οποία εκφράζεται από τη χρωματική απόχρωση του δείκτη PoS (Πίνακας 9.2).

Η κατηγορία 1 υποδηλώνει δείγματα μηδενικής ή ελάχιστης υποβάθμισης της ποιότητας, όσον αφορά την περιβαλλοντική τοξικότητα, ενώ η κατηγορία 6 υποδηλώνει δείγματα των οποίων η ποιότητα είναι σοβαρά υποβαθμισμένη και μπορούν να θεωρηθούν ακατάλληλα για όλες τις χρήσεις.

Πίνακας 9.2. Κατηγορίες, υποκατηγορίες και χρωματική απόχρωση για τον δείκτη PoS.

Τάξη PoS	Εύρος	min	max	Εύρος υποκατηγορίας	a*		b*		c*		Χρώμα	Επίπεδο Ποιότητας Υποβάθμισης
1	PoS ≤ t	0	150	-	< t							Καθόλου-Ελάχιστο
2	t < PoS < 2t	150	300	50	150	200	200	250	250	300		Χαμηλό
3	2t < PoS < 4t	300	600	100	300	400	400	500	500	600		Μέσο
4	4t < PoS < 8t	600	1200	200	600	800	800	1000	1000	1200		Υψηλό
5	8t < PoS < 16t	1200	2400	400	1200	1600	1600	2000	2000	2400		Πολύ υψηλό
6	PoS > 16t	2400	-	-	-							Εξαιρετικά υψηλό

a,b,c: υποκατηγορίες του εύρους τιμών του δείκτη PoS

t: τιμή καθορισμού του δείκτη PoS σε τάξεις

Προκειμένου να επιτευχθεί μια καλύτερη διάκριση μεταξύ των εξεταζόμενων δειγμάτων, κάθε μία από τις κύριες κατηγορίες (εκτός από την πρώτη και την τελευταία) χωρίζεται σε τρεις ίσου εύρους υποκατηγορίες με προοδευτικά αυξημένη κλίμακα, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη αντιπροσωπευτικότητα και διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Αποδίδεται έτσι υψηλότερη ανάλυση μεταξύ των δειγμάτων της ίδιας κατηγορίας. Οι κατηγορίες 1 και 6 δεν χρειάζονται περαιτέρω διακριτοποίηση επειδή αντιπροσωπεύουν οριακές συνθήκες ποιότητας, επομένως μπορούν να θεωρηθούν ως κρίσιμα όρια υψηλότερης και χαμηλότερης ποιότητας υπογείων υδάτων αντίστοιχα.

Η ολοκλήρωση της διαδικασίας περιλαμβάνει την τελική αξιολόγηση με τη βοήθεια ενός συστήματος κωδικοποίησης, το οποίο είναι πολύ χρήσιμο για την αντιμετώπιση της ουσίας των αποτελεσμάτων σε διαφορετικούς χρήστες διαφόρων ειδικοτήτων ή σε ευρύ κοινό με ελάχιστο ή και καθόλου ειδικό επιστημονικό υπόβαθρο. Για το σκοπό αυτό προτείνεται μια απλουστευμένη αλλά περιεκτική απεικόνιση δεδομένων, η οποία παρέχει τα βασικά στοιχεία του δείκτη. Αυτή η έκφραση περιλαμβάνει:

- i) την κύρια κατηγορία του δείκτη PoS (1 έως 6) και την υποκατηγορία αυτής, εφόσον υπάρχει,
- ii) τον κυρίαρχο παράγοντα (ή παράγοντες με $Q_f > 20\%$), ο οποίος (οι οποίοι) ελέγχει (ελέγχουν) την κατάσταση ποιότητας του δείγματος,
- iii) και έναν τελικό μοναδικό χρωματικό χαρακτηρισμό, που καθιστά τα δεδομένα πιο οπτικά ευκρινή και ο οποίος ακολουθείται από ακριβείς πληροφορίες για το επίπεδο υποβάθμισης της ποιότητας (Πίνακας 9.2).

Σημειώνεται ότι ο όρος «υποβάθμιση της ποιότητας», αναφέρεται σε συγκριτικό χαρακτηρισμό μεταξύ των εξεταζόμενων δειγμάτων στο πλαίσιο του δείκτη PoS και σε καμία περίπτωση δεν συνεπάγεται κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηρισμό στο πλαίσιο της σχετικής νομοθεσίας ή/και των διεθνών προτύπων.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων για την περιοχή έρευνας ταξινομήθηκαν με βάση τον δείκτη PoS, αφού πρώτα χωρίστηκαν σε δείγματα ξηρής περιόδου (μέσος όρος Σεπτεμβρίου 2016 και Σεπτεμβρίου 2017) και δείγματα υγρής περιόδου (μέσος όρος Απριλίου 2017 και Απριλίου 2018). Σημειώνεται ότι η διαφορά μεταξύ των χημικών αναλύσεων των δύο περιόδων είναι ότι μόνο στην υγρή περίοδο υπήρχαν αναλύσεις As, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν κάποιες αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις. Τα αποτελέσματα και η κωδικοποίησή τους φαίνονται στον Πίνακα 9.3 ενώ οι αναλυτικοί υπολογισμοί από τους οποίους προέκυψαν, αναφέρονται στο Παράρτημα 1 (Πίνακες Π1.22 & Π1.23).

Πίνακας 9.3. Χαρακτηρισμός δειγμάτων και υπολογισμένη βαθμολογία του δείκτη PoS για την περιοχή έρευνας (ξηρή - υγρή περίοδος).

Ξηρή Περίοδος				Υγρή Περίοδος			
Κωδικός Δείγματος	Βαθμολογία Δείκτη PoS	Ταξινόμηση Δείγματος	Επίπεδο Ποιοτικής Υποβάθμισης	Κωδικός Δείγματος	Βαθμολογία Δείκτη PoS	Ταξινόμηση Δείγματος	Επίπεδο Ποιοτικής Υποβάθμισης
75A	58	1/NO ₃ ,Pb	Καθόλου-Ελάχιστο	75A	87	1/As	Καθόλου-Ελάχιστο
AD2	77	1/NO ₃ ,Pb	Καθόλου-Ελάχιστο	AD2	90	1/NO ₃ ,As	Καθόλου-Ελάχιστο
AD3	165	2a/Mn,Pb	Χαμηλό	AD3	109	1/As	Καθόλου-Ελάχιστο
F-1	416	3b/NH ₄	Μέτριο	F-1	100	2a/Mn,As	Χαμηλό
K-1	178	2a/Mn,NH ₄	Χαμηλό	K-1	165	2a/Mn,As	Χαμηλό
LB110	62	1/Pb,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB110	161	1/As	Καθόλου-Ελάχιστο
LB113	24	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB113	77	1/As	Καθόλου-Ελάχιστο
LB115	40	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB115	75	1/As	Καθόλου-Ελάχιστο
LB128	58	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB128	105	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB129	69	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB129	56	1/NO ₃ ,As	Καθόλου-Ελάχιστο
LB131	43	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB131	102	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB134	59	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB134	106	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB139	79	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB139	114	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB140	65	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB140	127	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB148	33	1/NO ₃ ,Mg	Καθόλου-Ελάχιστο	LB148	70	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB152	30	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB152	46	1/As	Καθόλου-Ελάχιστο
LB213	200	1/SO ₄	Καθόλου-Ελάχιστο	LB214	116	2a/NH ₄ ,As	Χαμηλό
LB250	81	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB250	194	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB251	87	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB251	126	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο

Ξηρή Περίοδος				Υγρή Περίοδος			
Κωδικός Δείγματος	Βαθμολογία Δείκτη ΡοS	Ταξινόμηση Δείγματος	Επίπεδο Ποιοτικής Υποβάθμισης	Κωδικός Δείγματος	Βαθμολογία Δείκτη ΡοS	Ταξινόμηση Δείγματος	Επίπεδο Ποιοτικής Υποβάθμισης
LB257	47	1/Mg	Καθόλου-Ελάχιστο	LB257	87	1/Mg	Καθόλου-Ελάχιστο
LB260	129	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB260	125	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB268	61	1/Mg	Καθόλου-Ελάχιστο	LB268	46	1/NO ₃ ,Mg	Καθόλου-Ελάχιστο
LB271	101	1/Mn	Καθόλου-Ελάχιστο	LB271	140	2a/As	Χαμηλό
LB279	62	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB279	56	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB81	72	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB81	157	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB84	46	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB84	90	1/NO ₃ ,As	Καθόλου-Ελάχιστο
LB90	58	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB90	82	1/NO ₃ ,As	Καθόλου-Ελάχιστο
LB95	44	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB95	54	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
LB98	61	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	LB98	123	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
SR01	47	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	SR01	41	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
SR110	34	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	SR110	56	1/NO ₃ ,As	Καθόλου-Ελάχιστο
SR111	73	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	SR111	28	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
SR112	62	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	SR112	50	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
SR114	43	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	SR114	50	1/NO ₃ ,As	Καθόλου-Ελάχιστο
SR39	49	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	SR39	106	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
Γ3	88	2b/NO ₃	Χαμηλό	Γ3	68	2c/NO ₃	Χαμηλό
ΕΛ55	102	2b/NO ₃	Χαμηλό	ΕΛ55	83	2b/NO ₃	Χαμηλό
Λ41	209	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	Λ41	67	1/NO ₃ ,As	Καθόλου-Ελάχιστο
Λ43	61	2a/NO ₃	Χαμηλό	Λ43	130	2a/NO ₃	Χαμηλό
Λ53	208	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	Λ53	257	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
Λ76	96	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	Λ76	213	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
Msp	162	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	Msp	134	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
SR67	43	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο	Ag.Anna	181	1/As,NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο
ΕΛ47	109	1/Mn	Καθόλου-Ελάχιστο	LB237	63	1/SO ₄	Καθόλου-Ελάχιστο
				M-1	127	1/NO ₃	Καθόλου-Ελάχιστο

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 9.3 μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα, σχετικά με την εφαρμογή του δείκτη PoS:

- ❖ η συντριπτική πλειοψηφία των δειγμάτων κατατάσσεται στην πρώτη κατηγορία του δείκτη PoS, με ελάχιστο έως μηδαμινό επίπεδο ποιοτικής υποβάθμισης.
- ❖ Δεν υπάρχουν ουσιαστικές μεταβολές στο επίπεδο ποιοτικής υποβάθμισης των δειγμάτων από περίοδο σε περίοδο.
- ❖ Για την υγρή περίοδο, ο κυρίαρχος παράγοντας, της όποιας ποιοτικής υποβάθμισης, είναι τα NO_3^- με δεύτερο κατά σειρά το As.
- ❖ Στην ξηρή περίοδο, ο μοναδικός κυρίαρχος παράγοντας, της όποιας ποιοτικής υποβάθμισης είναι τα NO_3^- , ελλείψει των δεδομένων για το As.
- ❖ Για τα δείγματα της αμέσως επόμενης κατηγορίας (κατηγορία 2) με χαμηλό επίπεδο ποιοτικής υποβάθμισης, οι κυρίαρχοι παράγοντες είναι το Mn, τα NO_3^- και το As.
- ❖ Ένα μόνο δείγμα ανήκει στην τρίτη κατηγορία του δείκτη PoS (το F-1) μεσαίου επιπέδου ποιοτικής υποβάθμισης, με κυρίαρχο παράγοντα υποβάθμισης τα NH_4^+ .
- ❖ Η διαφοροποίηση στις χημικές αναλύσεις μεταξύ των δύο περιόδων, με την παρουσία του As μόνο στην υγρή περίοδο, δεν επέφερε αλλαγές στην ταξινόμηση των δειγμάτων.
- ❖ Τα αποτελέσματα από τη χρήση του δείκτη PoS, αποτελούν μια γενική ένδειξη της καλής ποιοτικής κατάστασης στην οποία βρίσκονται τα υπόγεια ύδατα της περιοχής έρευνας.

Στα Διαγράμματα 9.2 και 9.3 φαίνεται η αθροιστική συνεισφορά (%), για κάθε μία από τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή του δείκτη PoS, για το σύνολο των δειγμάτων της ξηρής και της υγρής περιόδου αντίστοιχα. Το ποσοστό αυτό προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{Συνεισφορά (\%)} = \left[\frac{\sum Qf_i}{\sum Qf_i + \sum Qf_j \dots \sum Qf_n} \right] * 100 \quad (9.3)$$

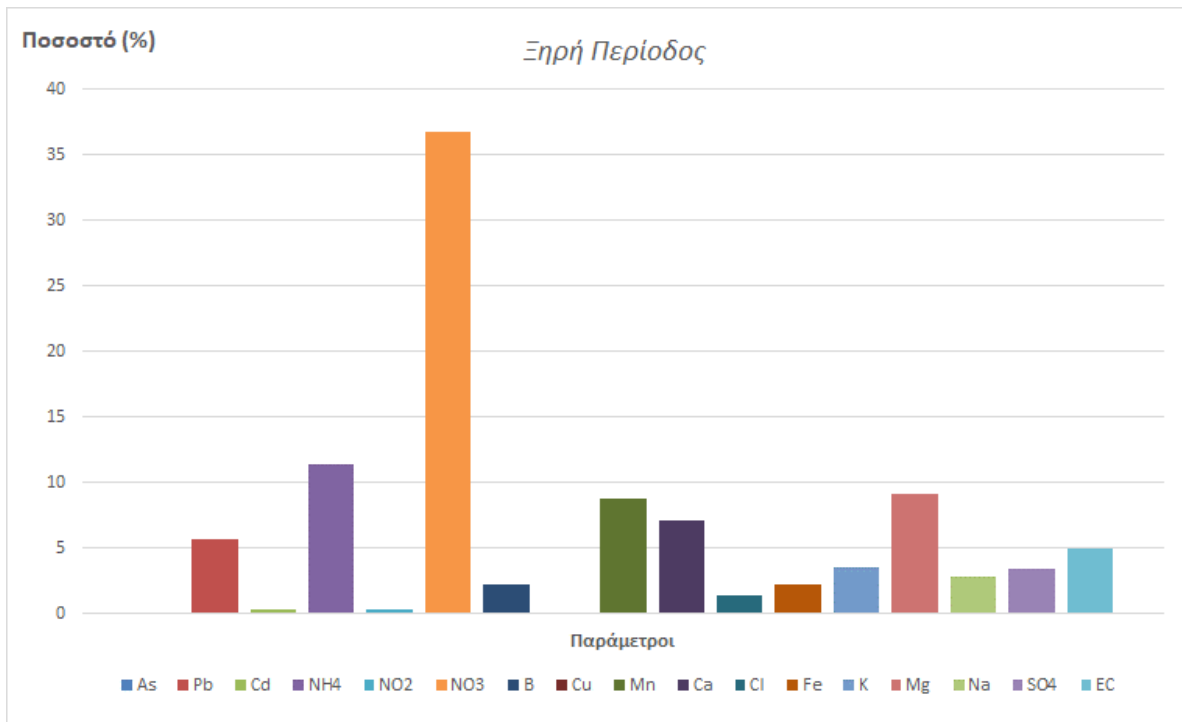
Όπου:

$\sum Qf_i$ = ο συνολικός συντελεστής ποιότητας της i παραμέτρου

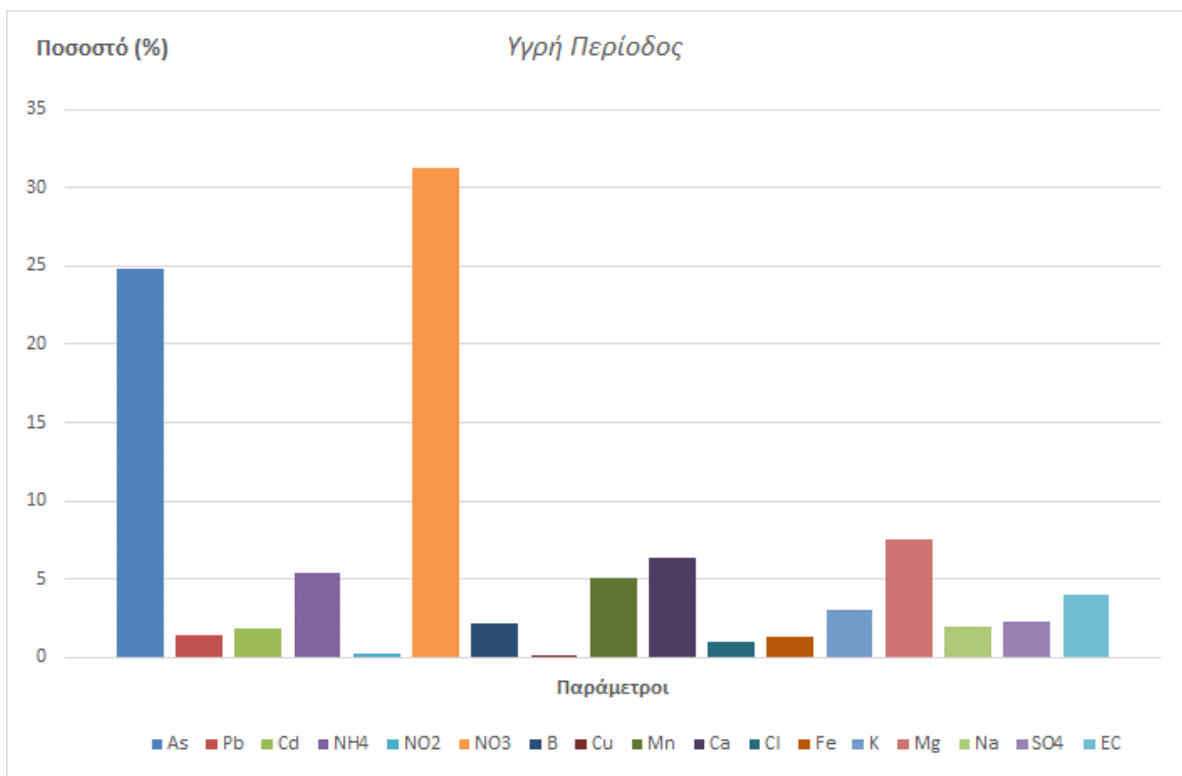
$\sum Qf_j$ = ο συνολικός συντελεστής ποιότητας της j παραμέτρου

$\sum Qf_n$ = ο συνολικός συντελεστής ποιότητας της n παραμέτρου

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν τις παρατηρήσεις που αποτυπώθηκαν παραπάνω, με τα NO_3^- να αποτελούν σε ποσοστό 37% για την ξηρή και 32% για την υγρή περίοδο, τον παράγοντα ποιοτικής υποβάθμισης και το As με ποσοστό 25% μόνο για την υγρή περίοδο. Τα ποσοστά συνεισφοράς για κάθε άλλη παράμετρο και για τις δύο περιόδους, βρίσκονται κάτω το 10%.



Διάγραμμα 9.2. Αθροιστική συνεισφορά των παραμέτρων του δείκτη PoS στο επίπεδο ποιοτικής υποβάθμισης για το σύνολο των δειγμάτων ξηρής περιόδου.



Διάγραμμα 9.3. Αθροιστική συνεισφορά των παραμέτρων του δείκτη PoS στο επίπεδο ποιοτικής υποβάθμισης για το σύνολο των δειγμάτων της ξηρής περιόδου.

9.1.2 SAR (Sodium Absorption Ratio) & Διάγραμμα Wilcox

Η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται από έντονη αγροτική δραστηριότητα, τόσο γεωργική όσο και κτηνοτροφική, η οποία απαιτεί αντίστοιχα και μεγάλες ποσότητες νερού. Αναφορικά με το νερό που προορίζεται για αρδευτικούς σκοπούς έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια, με σκοπό να ερμηνευθούν οι επιδράσεις της ποιότητάς του στην άρδευση. Ένα από αυτά τα κριτήρια για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του νερού για άρδευση είναι το διάγραμμα SAR. Το διάγραμμα αυτό έχει προταθεί από το U.S. Salinity Laboratory. Σύμφωνα με αυτό το διάγραμμα η καταλληλότητα του νερού για άρδευση εξετάζεται σε σχέση με δύο παράγοντες:

α) τον κίνδυνο αλκαλίωσης του εδάφους, δηλαδή την αύξηση της σχετικής περιεκτικότητας των ιόντων Na^+ του εδάφους που έχει ως συνέπεια τη μείωση της περατότητας και την αύξηση της σκληρότητάς του καθώς συμπιέζεται πιο εύκολα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται από το δείκτη προσρόφησης Νατρίου (SAR), ο οποίος αναφέρεται στο βαθμό κατά τον οποίο, το Na^+ στα νερά άρδευσης αντικαθιστά το προσροφημένο ($Ca^{2+}+Mg^{2+}$), που βρίσκεται στα αργιλικά εδάφη, μεταβάλλοντας έτσι τη δομή τους. Εκφράζεται από τη σχέση (9.4) (Richards 1969):

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (9.4)$$

β) τον κίνδυνο αλατότητας του εδάφους, ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί από την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Γενικά, στα αργιλικά εδάφη η δυνατότητα απόπλυσης των αλάτων που υπάρχουν σε περίσσεια είναι μειωμένη, λόγω της μικρής περατότητας και της χαμηλής δυνατότητας αποστράγγισης.

Σημειώνεται ότι εκτός από τον κλασικό δείκτη SAR στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνεται και ο δείκτης adjusted SAR (adj. SAR)(Bower et al. 1968), ο οποίος εισάγει στον κλασικό δείκτη την παράμετρο του διορθωμένου pH (pH_c). Η τιμή του adjusted SAR ορίζεται από τη σχέση (Lloyd & Heathcote 1985):

$$adj.SAR = SAR * [1+(8.4-pH_c)] \quad (9.5)$$

όπου:

SAR= ο δείκτης προσρόφησης νατρίου, όπως αυτός δίνεται από τη Σχέση 9.4

8.4= η κατά προσέγγιση τιμή του pH μη νατριούχου αλατούχου εδάφους σε ισορροπία με $CaCO_3$

pH_c = το pH αρδευτικού νερού κορεσμένο σε ανθρακικά (υπολογίζεται από πίνακα με βάση τις συγκεντρώσεις Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- σε meq/l)

Πρακτικά στην παρούσα έρευνα, οι τιμές του SAR με τις αντίστοιχες του adj. SAR, δεν παρουσίασαν αξιόλογες διαφορές, όπως προέκυψε από δειγματοληπτικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με βάση τις Σχέσεις 9.4 και 9.5 και ως εκ τούτου στην περαιτέρω

επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που προέκυψαν από τον κλασικό τύπο υπολογισμού του SAR (9.4), ως πιο εύκολες στον υπολογισμό τους.

Ο συνδυασμός του SAR με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ενός διαλύματος σε μια ημιλογαριθμική κλίμακα, κατατάσσει το νερό ως προς την αρδευτική του ποιότητα (Wilcox 1955). Η κατάταξη γίνεται μέσω της προβολής του σημείου που έχει συντεταγμένες ($x=EC$, $y=SAR$) και ανάλογα με τη θέση του σημείου προβολής του, χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος τιμών της μορφής C_i, S_j με τις εξής διαβαθμίσεις (Πίνακας 9.4):

Πίνακας 9.4. Διαβαθμίσεις στην κατάταξη του αρδευτικού νερού (Wilcox 1955).

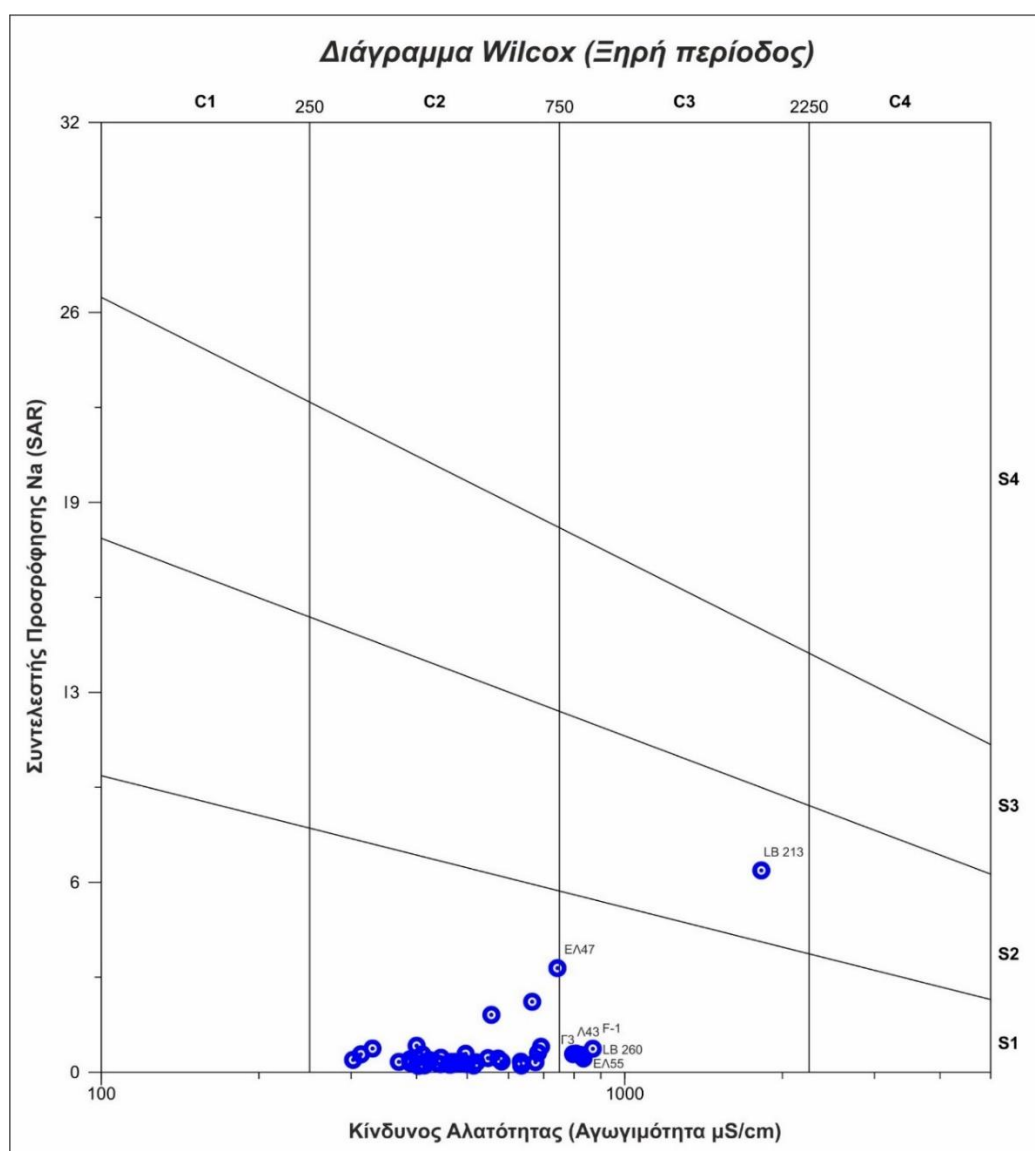
C1	Χαμηλός κίνδυνος αλατότητας	S1	Χαμηλός κίνδυνος αλκαλίωσης
C2	Μέσος κίνδυνος αλατότητας	S2	Μέσος κίνδυνος αλκαλίωσης
C3	Υψηλός κίνδυνος αλατότητας	S3	Υψηλός κίνδυνος αλκαλίωσης
C4	Πολύ υψηλός κίνδυνος αλατότητας	S4	Πολύ υψηλός κίνδυνος αλκαλίωσης

Στα παρακάτω Διαγράμματα 9.4 & 9.5 φαίνεται η προβολή των θέσεων δειγματοληψίας του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας στο διάγραμμα Wilcox, για τις ξηρές και υγρές περιόδους, αντίστοιχα.

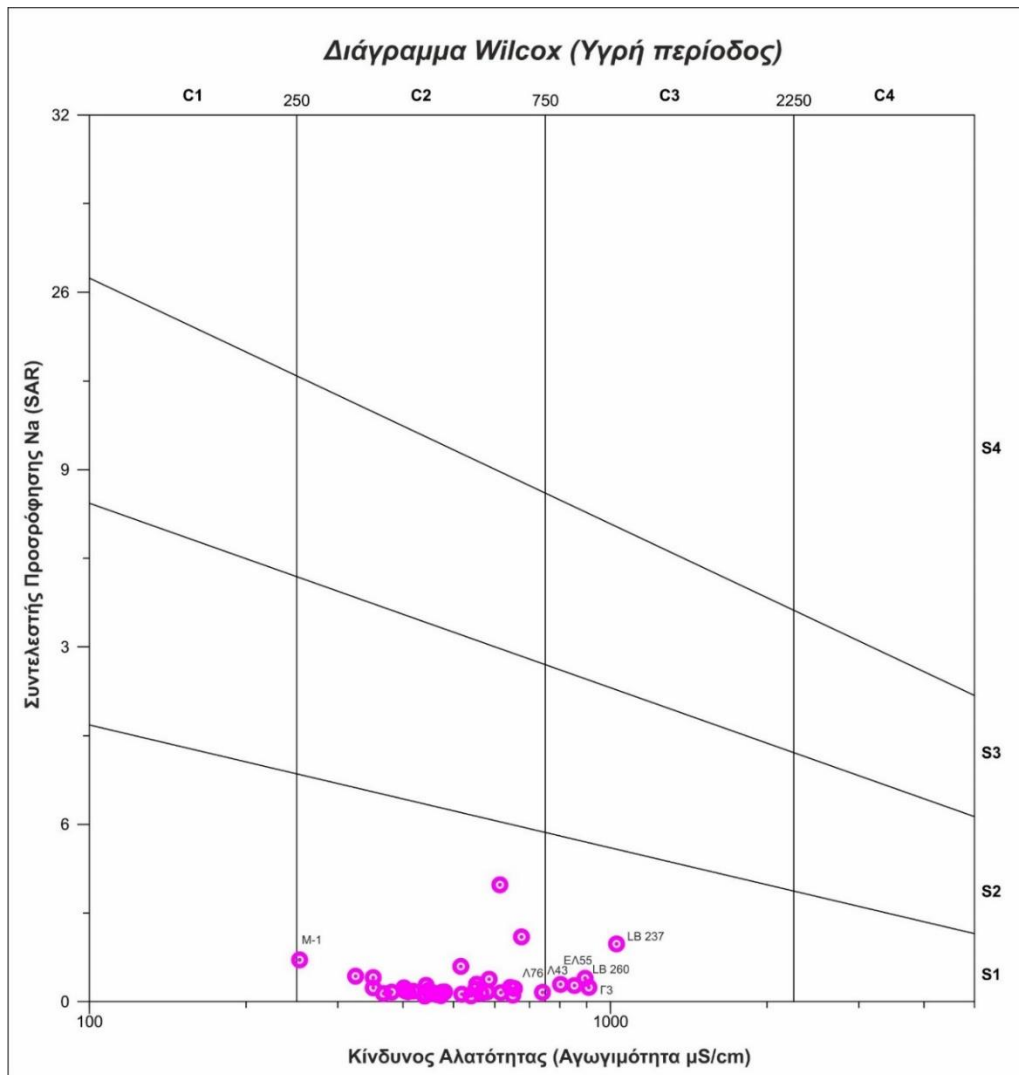
Αναφορικά με τις ξηρές περιόδους, η συντριπτική πλειοψηφία των δειγμάτων νερού ανήκει στην κατηγορία C2-S1, σύμφωνα με τις διαβαθμίσεις του Πίνακα 9.4. Πρόκειται δηλαδή για νερά με μικρό κίνδυνο αλκαλίωσης και μέσο κίνδυνο αλατότητας ($EC < 750 \mu S/cm$) και ως εκ τούτου είναι κατάλληλα για άρδευση αλλά με ορισμένους περιορισμούς, που σχετίζονται με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά και την ανθεκτικότητα του καλλιεργούμενου είδους. Πέντε από τα δείγματα των ξηρών περιόδων (Γ3, Λ43, F1, LB260, ΕΛ55) ανήκουν στην κατηγορία C3-S1, αντιπροσωπεύοντας έτσι νερά με μικρό κίνδυνο αλκαλίωσης και υψηλό κίνδυνο αλατότητας. Τα νερά αυτά είναι ακατάλληλα για άρδευση εδαφών με περιορισμένη στράγγιση ή ευαίσθητων καλλιεργειών και ποιοτικά μπορούν να χαρακτηριστούν από καλά έως αποδεκτά. Τέλος, ένα μόνο δείγμα (LB213), το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της υπολεκάνης προς τα Α-ΝΑ, ανήκει στην κατηγορία C3-S2, υποδηλώνοντας έτσι νερό υψηλού κινδύνου αλατότητας και μέσου κινδύνου αλκαλίωσης. Τα νερά αυτά είναι ακατάλληλα για άρδευση εδαφών που παρουσιάζουν περιορισμένη στράγγιση ενώ ποιοτικά μπορούν να θεωρηθούν από αποδεκτά έως αμφίβολα, όσον αφορά στους περιορισμούς που συνοδεύουν τη χρήση τους.

Αντίστοιχα, η πλειοψηφία των δειγμάτων των υγρών περιόδων ανήκουν στην κατηγορία C2-S1, δηλαδή ποιοτικά καλά νερά κατάλληλα για άρδευση. Πέντε δείγματα ανήκουν στην κατηγορία C3-S1 (Λ43, ΕΛ55, Γ3, LB260, LB237), μικρού κινδύνου αλκαλίωσης και υψηλού κινδύνου αλατότητας. Όπως προαναφέρθηκε, τα νερά αυτά είναι ακατάλληλα για άρδευση εδαφών με περιορισμένη στράγγιση ή ευαίσθητων καλλιεργειών και ποιοτικά μπορούν να χαρακτηριστούν από καλά έως αποδεκτά.

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα και των δύο περιόδων προκύπτει ότι 4 δείγματα νερού γεωτρήσεων, εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου, (Λ43, ΕΛ55, Γ3, LB260) παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο αλατότητας και είναι ποιοτικά υποδεέστερα από τα υπόλοιπα, αναφορικά πάντα με την αρδευτική τους καταλληλότητα. Οι γεωτρήσεις αυτές καταλαμβάνουν δύο τμήματα της υπολεκάνης, τα οποία σύμφωνα με τα προαναφερθέντα αλλά και την ανάλυση που ακολουθεί, είναι αυτά που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα αναφορικά με τη συνολική ποιοτική τους ταξινόμηση. Το πρώτο τμήμα είναι στα δυτικά της υπολεκάνης κατά μήκος άξονα με διεύθυνση Β-Ν ενώ το δεύτερο εντοπίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα αυτής.



Διάγραμμα 9.4. Κατάταξη αρδευτικού νερού ξηρής περιόδου για την περιοχή έρευνας κατά Wilcox (1955).



Διάγραμμα 9.5. Κατάταξη αρδευτικού νερού υγρής περιόδου για την περιοχή έρευνας κατά Wilcox (1955).

9.1.3 ΠΟΣΙΜΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Ο χαρακτηρισμός ενός δείγματος νερού ως κατάλληλου για ανθρώπινη κατανάλωση, δεν μπορεί να αποδοθεί με βάση μόνο τα αποτελέσματα μιας τυπικής χημικής ανάλυσης (φυσικοχημικοί, παράμετροι, κύρια ιόντα, βασικά ιχνοστοιχεία, βαρέα μέταλλα), όπως αυτές που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Έτσι, για την αξιολόγηση της ποσιμότητας λαμβάνονται υπόψη και μια σειρά επιπλέον αναλύσεων (микροβιολογικών, οργανικών μορίων, ουσιών προτεραιότητας κ.α.) καθώς η καταλληλότητα ή μη του νερού για πόση είναι πρωταρχικής σημασίας για την ανθρώπινη υγεία.

Τα κριτήρια καταλληλότητας καθορίζονται με βάση ιατρικές οδηγίες και πορίσματα επιδημιολογικών ερευνών και οι οριακές τιμές των ποιοτικών παραμέτρων ορίζονται από εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς, όπως είναι ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας και η Ευρωπαϊκή Ένωση. Επίσης, τα κριτήρια καταλληλότητας διαφέρουν από χώρα σε χώρα

λόγω της επάρκειας ή μη νερού ορισμένης ποιότητας σε μία χώρα, του κλίματος και της γεωγραφικής θέσης της κάθε χώρας (Γαμβρουλά 2013).

Ο έλεγχος της καταλληλότητας ποσιμότητας για τα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας (ως προς τις προσδιοριζόμενες παραμέτρους της παρούσας έρευνας και μόνο) πραγματοποιήθηκε με βάση το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017 για την Ελλάδα, σχετικά με την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 3^{ης} Νοεμβρίου 1998 [(όπως αυτή τροποποιήθηκε με την Οδηγία (ΕΕ) 2015/1787 (6.10.2015)].

Με βάση τις ανώτατες συγκεντρώσεις που αναφέρονται στο παραπάνω ΦΕΚ και τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των τεσσάρων (4) περιόδων δειγματοληψίας, τα οποία επισυνάπτονται στους Πίνακες Π1.17 έως Π1.20 του Παραρτήματος 1, προκύπτουν οι θέσεις δειγματοληψίας στις οποίες υπάρχει υπέρβαση σε μία ή/και περισσότερες παραμέτρους. Στον Πίνακα 9.5 παραθέτονται ανά περίοδο δειγματοληψίας, οι θέσεις στις οποίες παρατηρούνται υπερβάσεις των ανώτατων επιτρεπτών ορίων, καθώς και οι αντίστοιχες παράμετροι για κάθε θέση.

Πίνακας 9.5. Θέσεις δειγματοληψίας και οι αντίστοιχες παράμετροι στις οποίες παρατηρήθηκαν υπερβάσεις των ανώτατων ορίων ποσιμότητας με βάση το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017, για κάθε περίοδο δειγματοληψίας.

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2016		ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2017	
Κωδικός θέσης	Παράμετρος (-οι) υπέρβασης	Κωδικός θέσης	Παράμετρος (-οι) υπέρβασης
AD3	Pb	ΕΛ55	NO ₃
ΕΛ55	NO ₃	Λ76	NO ₃
Λ76	NO ₃	Λ43	NO ₃
Λ43	NO ₃	LB260	NO ₃
LB260	NO ₃	Γ3	NO ₃
Γ3	NO ₃	F1	NH ₄ , Mn
SR111	NH ₄	K1	NH ₄ , Mn
Msp	NH ₄	LB214	NH ₄
		LB237	SO ₄ , NH ₄
		LB271	SO ₄ , NH ₄
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2017		ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2018	
Κωδικός θέσης	Παράμετρος (-οι) υπέρβασης	Κωδικός θέσης	Παράμετρος (-οι) υπέρβασης
LB260	NO ₃	Γ3	NO ₃
F1	NH ₄ , Mn	LB81	B
K1	NH ₄ , Mn	Λ76	NO ₃
Γ3	NO ₃	ΕΛ55	NO ₃
AD3	Mn	F1	NH ₄
ΕΛ55	NO ₃	K1	NH ₄ , Mn
LB213	Na, SO ₄ , B, Mn	LB271	NH ₄ , Mn
LB271	NH ₄	Λ43	NO ₃
		LB214	NH ₄

Από τις αναφερόμενες υπερβάσεις των παραμέτρων, που φαίνονται στον Πίνακα 9.5, για το σύνολο των δειγμάτων, προκύπτει ότι η συντριπτική πλειοψηφία αυτών αφορά τις αζωτούχες ενώσεις (NO₃ και NH₄). Η χωρική κατανομή των υπερβάσεων αυτών, καθώς και

η ερμηνεία τους θα γίνει αναλυτικά στο 12^ο Κεφάλαιο. Πέραν των αζωτούχων ενώσεων παρατηρήθηκαν και κάποιες μεμονωμένες υπερβάσεις SO₄, Mn, Na, B και P.

9.2 ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η χρήση των υδροχημικών διαγραμμάτων, ως μέσο παρουσίασης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από τις χημικές αναλύσεις των δειγμάτων νερού, είναι διαχρονική. Διάφοροι ερευνητές κατά το παρελθόν έχουν προτείνει διάφορους τρόπους παρουσίασης και ερμηνείας των υδροχημικών διαγραμμάτων με σημαντικότερους τους: Hill (1940), Piper (1944), Durov (1948), Stiff (1951), Burdon & Mazloum (1958), Schoeller (1962), Lloyd (1965) και Lloyd & Heathcote (1985). Καθένα από τα διαγράμματα αυτά δεν μπορεί από μόνο του να δώσει μια ολοκληρωμένη ερμηνεία των πρωτογενών δεδομένων τα οποία απεικονίζει, αλλά χρειάζεται ο συνδυασμός του και με άλλες πληροφορίες όπως η χαρτογραφική απεικόνιση, τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά δεδομένα (Ravikumar et al. 2015).

9.2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑ PIPER

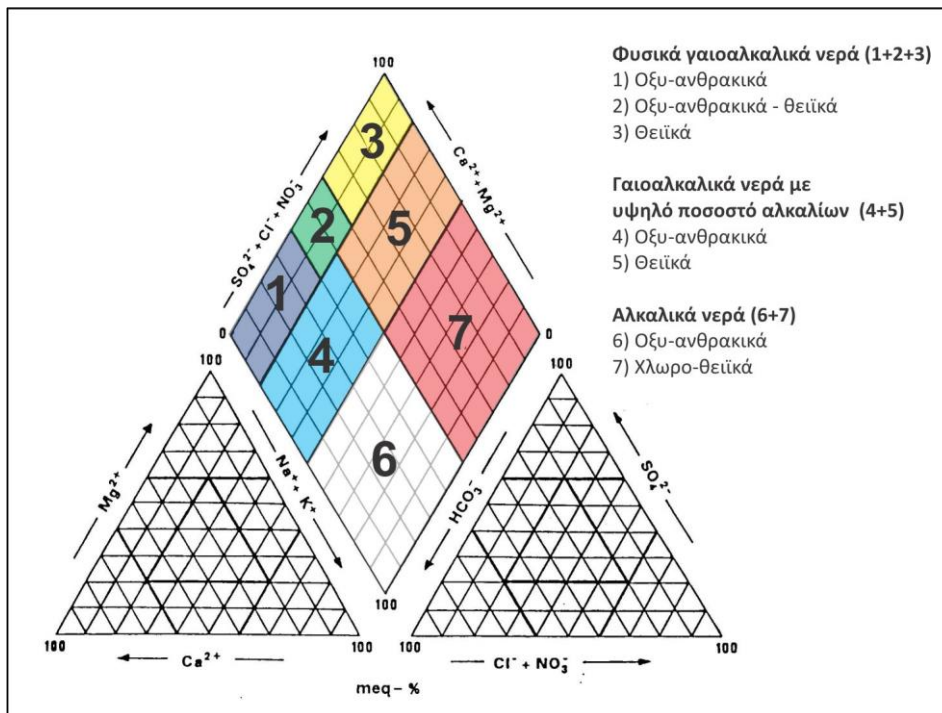
Το διάγραμμα Piper (Διάγραμμα 9.6) είναι το πιο εύχρηστο και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο διάγραμμα υδροχημικής ταξινόμησης. Δημιουργήθηκε από τον Piper το 1944 και τα πλεονεκτήματά του είναι τα εξής (Hounslow 1995, Καλλέργης 2000):

- (α) προσφέρει άμεση σύγκριση νερών διαφορετικής χημικής σύστασης
- (β) ταυτόχρονη απεικόνιση υδροχημικών δεδομένων μεγάλου αριθμού δειγμάτων
- (γ) καθορισμό υδροχημικού τύπου των υπόγειων νερών
- (δ) ερμηνεία φαινομένων όπως η καθίζηση, η διάλυση, η ανάμειξη και η ιοντοανταλλαγή.

Ουσιαστικά αποτελείται από δύο τριγωνικά διαγράμματα, ένα για τα ανιόντα και ένα για τα κατιόντα, και ένα ενδιάμεσο ρομβικό που στο σύνολο τους συνιστούν ένα τρίγωνο (Εικόνα 7.24). Ανάλογα με τη θέση του προβαλλόμενου δείγματος νερού στο διάγραμμα, αυτό κατατάσσεται τόσο ως προς τα κατιόντα και τα ανιόντα όσο και ως προς το σύνολο. Στο αριστερό τρίγωνο προβάλλονται τα κατιόντα Ca²⁺, Mg²⁺ και το Na⁺+K⁺ με βάση την κατ' όγκο συγκέντρωσή τους ως ποσοστό επί τοις εκατό (meq%) του συνόλου των κατιόντων, ενώ στο δεξιό τρίγωνο προβάλλονται τα ανιόντα Cl⁻, HCO₃⁻ και SO₄⁻ επίσης σε ποσοστό επί τοις εκατό (meq%) του συνόλου των ανιόντων. Στη συνέχεια τα δύο αυτά σημεία προβάλλονται στο ρόμβο παράλληλα προς τις δύο πάνω πλευρές του. Το σημείο τομής των δύο προβολών δίνει τη συνολική εικόνα της ιοντικής κατανομής (Καλλέργης 2000).

Στο πλαίσιο της διατριβής αυτής τα δείγματα των τεσσάρων δειγματοληψιών, χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, της υγρής και της ξηρής περιόδου. Κάθε κατηγορία περιλαμβάνει δυο (2) περιόδους δειγματοληψίας και ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι των

συγκεντρώσεων των δύο περιόδων για κάθε παράμετρο. Με τη βοήθεια του λογισμικού AquaChem v5.0.56, δημιουργήθηκαν δυο (2) ξεχωριστά διαγράμματα Piper (Διάγραμμα 9.7), με το πρώτο να απεικονίζει τα δείγματα που αντιπροσωπεύουν την ξηρή περίοδο (μέσος όρος Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου 2016 & Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου 2017) και το δεύτερο τα δείγματα της υγρής περιόδου (μέσος όρος Απριλίου-Μαΐου 2017 & Απριλίου-Μαΐου 2018).

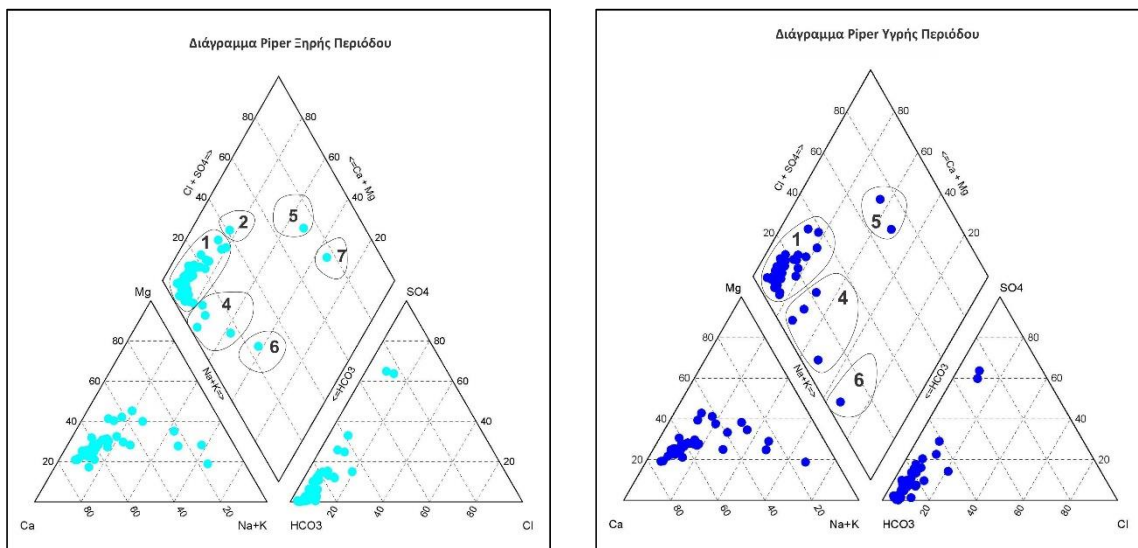


Διάγραμμα 9.6. Piper και ταξινόμηση υπόγειου νερού.

Με βάση το διαχωρισμό του Διαγράμματος 9.6 τα δείγματα του υπόγειου νερού της ξηρής περιόδου διαχωρίζονται σε έξι (6) Ομάδες, ενώ αυτά της υγρής περιόδου σε τέσσερις (4) Ομάδες, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 9.1 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των Ομάδων αυτών και για τις δυο (2) περιόδους, αναδεικνύοντας έτσι τις υδροχημικές περιφέρειες που εντοπίζονται στην περιοχή έρευνας .

➤ **Ομάδα 1.** Η ομάδα αυτή χαρακτηρίζεται από φυσικά γαιοαλκαλικά - οξυανθρακικά νερά και σε αυτήν ανήκει η συντριπτική πλειοψηφία των δειγμάτων τόσο της ξηρής όσο και της υγρής περιόδου. Πρόκειται για φρέσκα νερά τροφοδοσίας με κυρίαρχους υδροχημικούς τύπους τους Ca-Mg-HCO_3 και Ca-HCO_3 . Από πλευράς κατιόντων επικρατούν τα ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου ενώ από πλευράς ανιόντων επικρατούν κυρίως τα όξινα ανθρακικά. Σε αυτήν την κατηγορία κατατάσσονται τα δείγματα των γεωτρήσεων του δυτικού περιθωρίου της υπολεκάνης καθώς και τα περισσότερα δείγματα του κεντρικού τμήματος αυτής με σαφή προέλευση το Άνω-κρητιδικό καρστικό σύστημα Τυρνάβου-Δαμασίου (Εικόνα 9.1).

- **Ομάδα 2.** Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει μόνο το δείγμα της γεώτρησης LB260 για την ξηρή περίοδο και χαρακτηρίζεται ως γαιοαλκαλικό – οξυανθρακικό – θειικό νερό. Ο υδροχημικός του τύπος είναι Mg-Ca-HCO₃-SO₄, και όπως φαίνεται από την προβολή του στο διάγραμμα ανήκει οριακά σε αυτή την ομάδα καθώς είναι πολύ κοντά και στην Ομάδα 1. Πρόκειται λοιπόν και στην περίπτωση αυτή για φρέσκα νερά με σχετικά ανεβασμένες συγκεντρώσεις θειικών ιόντων.
- **Ομάδα 3.** Τα νερά της κατηγορίας αυτής χαρακτηρίζονται ως γαιοαλκαλικά – θειικά και σε αυτήν δεν ανήκει κανένα από τα δείγματα που αναλύθηκαν.
- **Ομάδα 4.** Τα νερά που ανήκουν σε αυτήν την ομάδα χαρακτηρίζονται ως γαιοαλκαλικά – οξυανθρακικά με υψηλό ποσοστό αλκαλίων. Εδώ ανήκουν τέσσερα δείγματα της ξηρής (K1, SR01, LB152, LB257) και τέσσερα δείγματα της υγρής περιόδου (K1, M1, LB152, LB257). Ο υδροχημικός τύπος των δειγμάτων αυτών είναι της μορφής Ca-Mg-Na-HCO₃, με διαφορετική κατά περίπτωση σειρά των κατιόντων. Θεωρούνται νερά προερχόμενα από ανάμιξη και στα οποία οι διαδικασίες ιοντοανταλλαγής βρίσκονται σε εξελικτικό στάδιο. Οι γεωτρήσεις των δειγμάτων αυτών κατανέμονται χωρικά στο ανατολικό τμήμα της υπολεκάνης (Εικόνα 9.1).

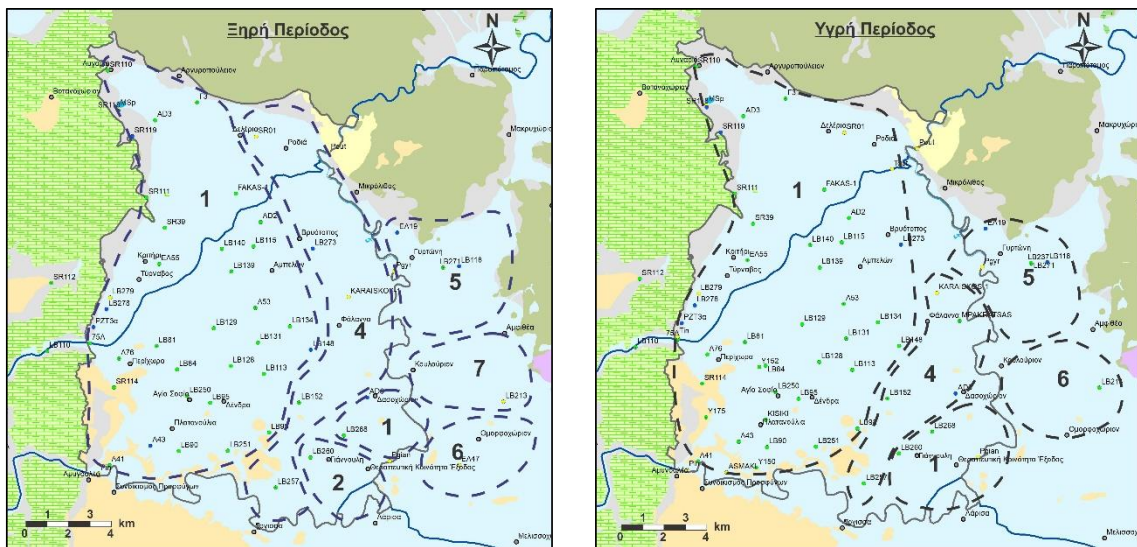


Διάγραμμα 9.7. Διαγράμματα Piper για την ξηρή (αριστερά) και για την υγρή (δεξιά) περίοδο

- **Ομάδα 5.** Η ομάδα αυτή χαρακτηρίζεται από γαιοαλκαλικά νερά με υψηλό ποσοστό αλκαλίων και θειικών ιόντων. Προσομοιάζουν με τα νερά της προηγούμενης κατηγορίας με υψηλότερες συγκεντρώσεις θειικών και ως εκ τούτου έχουν υδροχημικό τύπο τον Na-Mg-Ca-SO₄-HCO₃. Το δείγμα της γεώτρησης LB271 και των δύο περιόδων ανήκει σε αυτήν την ομάδα, καθώς το δείγμα της γεώτρησης LB237 για την υγρή περίοδο. Και σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για νερά προερχόμενα από ανάμιξη και ιοντοανταλλαγή, ενώ χωρικά κατανέμονται στην περιοχή της Γυρτώνης, ανατολικά του Πηνειού ποταμού, ανατολικότερα δηλαδή των γεωτρήσεων της Ομάδας 4 (Εικόνα 9.1).

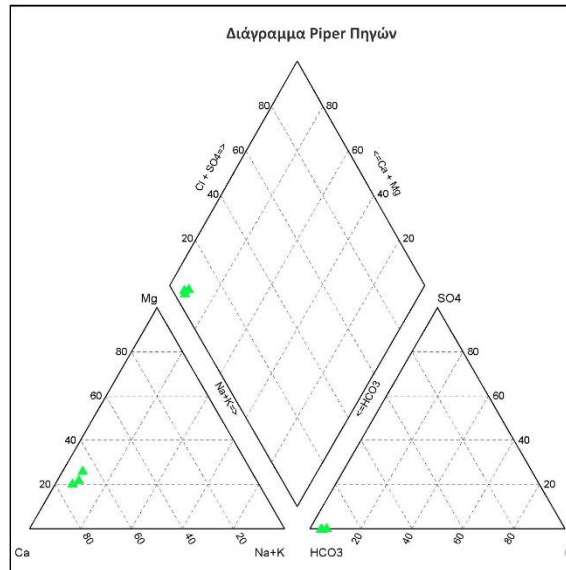
➤ **Ομάδα 6.** Πρόκειται για οξυανθρακικά – αλκαλικά νερά με υδροχημικό τύπο Na-HCO_3 και Na-Mg-HCO_3 . Μόλις δύο δείγματα ανήκουν στην ομάδα αυτή το ΕΛ47 της ξηρής περιόδου και το LB214 της υγρής. Οι δύο αυτές γεωτρήσεις βρίσκονται και αυτές ανατολικά του Πηνειού ποταμού, νότια από τις γεωτρήσεις της προηγούμενης ομάδας (Εικόνα 9.1).

➤ **Ομάδα 7.** Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν τα νερά που χαρακτηρίζονται ως αλκαλικά – χλωροθειικά. Εδώ ανήκει μόνο το δείγμα της γεώτρησης LB213 της ξηρής περιόδου, το οποίο έχει υδροχημικό τύπο $\text{Na-SO}_4\text{-HCO}_3$. Πρόκειται για νερά τελικού σταδίου ροής με κυρίαρχα κατιόντα αυτά του νατρίου, ενώ από την πλευρά των ανιόντων επικρατούν τα θειικά, τα χλωριόντα και εν μέρει τα όξινα ανθρακικά. Χωροταξικά η γεώτρηση LB213 της κατηγορίας αυτής βρίσκεται στην περιοχή πλησίον της LB214 από την Ομάδα 6 (Εικόνα 9.1).



Εικόνα 9.1. Χωρική κατανομή των υδροχημικών περιφερειών ξηρής (αριστερά) και υγρής περιόδου (δεξιά) σύμφωνα με την ταξινόμηση των δειγμάτων στα αντίστοιχα διαγράμματα Piper.

Αναφορικά με τα δείγματα νερού από τις πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας, τόσο για την υγρή όσο και για την ξηρή περίοδο, ταξινομούνται και αυτά στην πρώτη Ομάδα των φυσικών γαιοαλκαλικών - οξυανθρακικών νερών με βάση το παρακάτω διάγραμμα Piper (Διάγραμμα 9.8). Ο υδροχημικός χαρακτήρας των πηγών, όπως αναμενόταν, δεν διαφοροποιείται από αυτόν των γεωτρήσεων του δυτικού περιθωρίου της υπολεκάνης, καθώς αυτές αποφορτίζουν τον καρστικό όγκο Δαμασίου-Τυρνάβου.



Διάγραμμα 9.8. Διάγραμμα Piper των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας για την ξηρή και την υγρή περίοδο δειγματοληψίας.

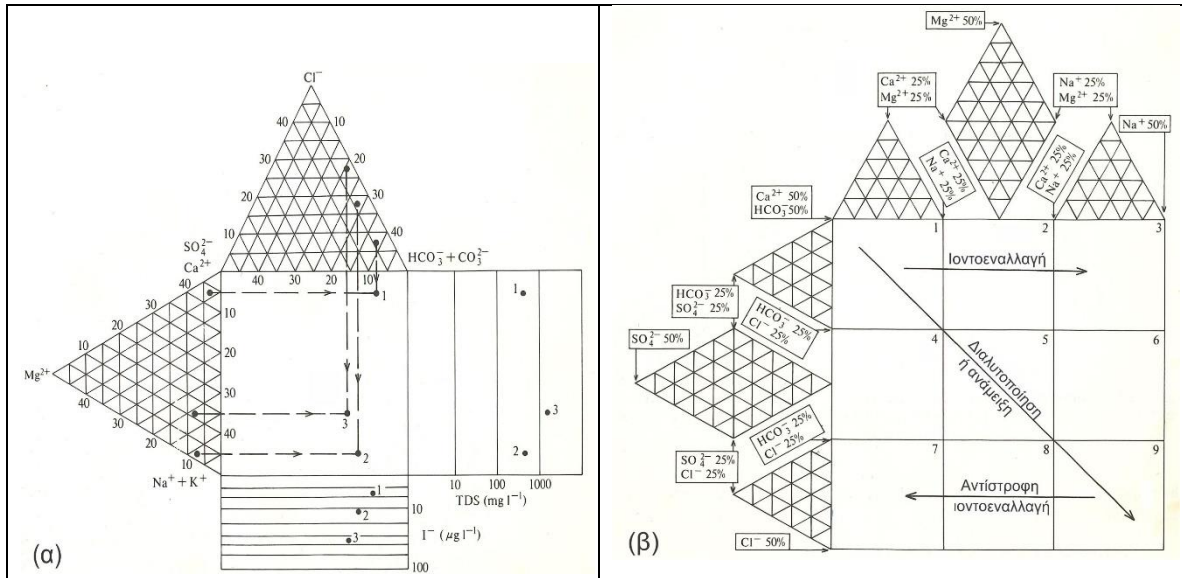
9.2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑ DUROV

Το διάγραμμα Durov αποτελεί μια εναλλακτική μορφή του διαγράμματος Piper, αναπτύχθηκε από την Σοβιετική σχολή (Durov 1948) και στη συνέχεια μελετήθηκε και εξελίχθηκε από σειρά ερευνητών, μεταξύ των οποίων τους Burdon & Mazloum (1958) και τον Lloyd (1965). Όπως και στο διάγραμμα Piper, τα κύρια ανιόντα και κατιόντα προβάλλονται σε δυο (2) ξεχωριστά τριγωνικά διαγράμματα και στη συνέχεια τα δύο αυτά σημεία προβάλλονται σε ένα τετράγωνο, οι δύο από τις κάθετες πλευρές του οποίου είναι οι βάσεις των δυο τριγωνικών διαγραμμάτων. Οι βασικές του διαφορές με το διάγραμμα Piper είναι οι εξής:

α) στο διάγραμμα Durov τα κατιόντα και τα ανιόντα εκφράζονται συνολικά ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) ανηγμένα στην τιμή 50% της συγκέντρωσης (meq/l) για το άθροισμα της κάθε ομάδας παραμέτρων (ανιόντα-κατιόντα),

β) στην περίπτωση αυτή εκτός από την τριγωνική απεικόνιση των κυρίων κατιόντων και ανιόντων, δύναται να απεικονιστούν και άλλες παράμετροι στην επέκταση του τετραγώνου (Διάγραμμα 9.9α).

Όπως ήδη αναφέρθηκε η αρχική μορφή του διαγράμματος εξελίχθηκε στην διαστελλόμενη ή εκτεταμένη μορφή του (expanded Durov) από τους Burdon & Mazloum και Lloyd (Εικόνα 9.9β). Το διαστελλόμενο διάγραμμα Durov πλεονεκτεί σαφώς έναντι του διαγράμματος Piper, καθώς παρέχει καλύτερη απεικόνιση των υδροχημικών τύπων και των υδροχημικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα και από πρακτικής άποψης απαιτεί λιγότερη εργασία στην περιοχή του κυρίου πεδίου προβολής (Lloyd & Heathcote 1985).



Διάγραμμα 9.9. Πρωτότυπο διάγραμμα Durov (αριστερά) και εκτεταμένο διάγραμμα Durov (δεξιά) (από Lloyd & Heathcote 1985 με παρεμβάσεις).

Το κύριο πεδίο προβολής (τετράγωνο) χωρίζεται σε εννέα (9) πεδία που μας διευκολύνουν να κατανοήσουμε καλύτερα την εξελικτική πορεία του υπόγειου νερού λόγω των υδρογεωχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα, όπως φαίνεται στην ερμηνεία του Διαγράμματος 9.9β. Τα εννέα αυτά πεδία αναλύονται ως εξής:

Πεδίο 1: κυριαρχούν τα HCO_3^- και τα Ca^{2+} και συνήθως αφορά φρέσκα νερά τροφοδοσίας που κατεισδύουν διαμέσου ασβεστόλιθων, ψαμμιτών αλλά και άλλων ανθρακικών πετρωμάτων.

Πεδίο 2: κυριαρχούν τα HCO_3^- και τα Mg^{2+} ή δεν επικρατεί κάποιο κατιόν. Πρόκειται για νερά που έχουν σχέση με δολομίτες. Στην περίπτωση που τα Ca^{2+} και Na^+ είναι αρκετά, η διαδικασία της ιοντοανταλλαγής μπορεί να λάβει χώρα.

Πεδίο 3: Κυριαρχούν τα HCO_3^- και τα Na^+ και το φαινόμενο της ιοντοανταλλαγής βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη.

Πεδίο 4: Κυριαρχεί το Ca^{2+} από τα κατιόντα και από τα ανιόντα είτε τα SO_4^{2-} , είτε κανένα ανιόν. Στην περίπτωση εκείνη όπου κυριαρχούν τόσο τα Ca^{2+} όσο και τα SO_4^{2-} , έχουμε νερά που προέρχονται από ζώνες αναπλήρωσης διαμέσου ηφαιστειακών λαβών και γύψων. Διαφορετικά αυτό ερμηνεύεται απλά σαν ένα νερό μικτό ή νερό διαλυτοποίησης.

Πεδίο 5: Κανένα κυρίαρχο ιόν. Πρόκειται για νερά ανάμειξης ή νερά διαλυτοποίησης.

Πεδίο 6: Κυριαρχεί το Na^+ και είτε κυριαρχούν τα SO_4^{2-} , είτε κανένα ανιόν. Πρόκειται για υπόγειο νερό που δεν συναντάται πολύ συχνά και είναι τις περισσότερες φορές προϊόν ανάμειξης.

Πεδίο 7: Κυριαρχούν τα Ca^{2+} και τα Cl^- . Σπάνιος τύπος υπόγειου νερού εκτός και αν έχει προέλθει σαν τελικό προϊόν αντίστροφης ιοντοανταλλαγής από νερά $\text{Na}-\text{Cl}$.

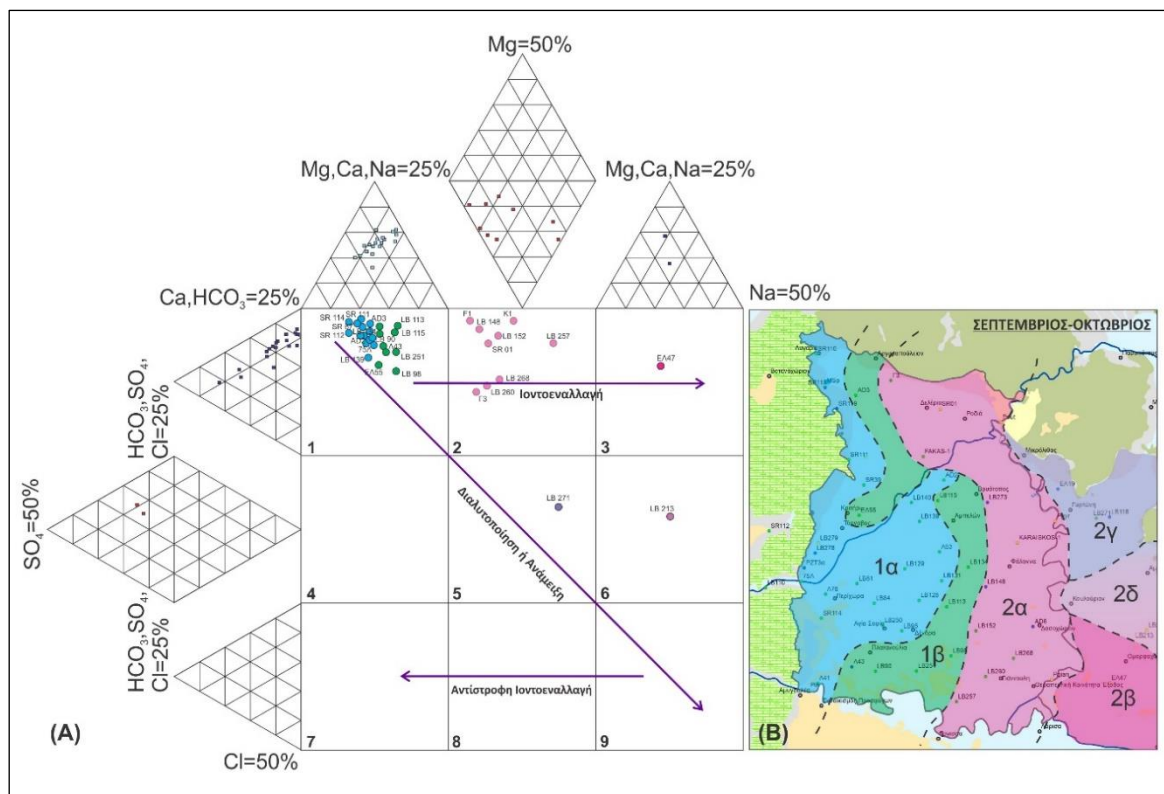
Πεδίο 8: Κυριαρχούν τα Cl^- και από την πλευρά των κατιόντων τα Mg^{2+} ή χωρίς να κυριαρχεί κανένα κατιόν. Υπόγεια νερά όπου το φαινόμενο της αντίστροφης ιοντοανταλλαγής βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη.

Πεδίο 9: Κυριαρχούν τα Na^+ και τα Cl^- . Πρόκειται για νερά καταληκτικής φάσης ροής (end-point waters).

Τα βέλη στο Διάγραμμα 9.9β υποδεικνύουν συνήθεις υδροχημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα πριν τα υπόγεια νερά καταλήξουν σε διεπαφή με θαλάσσιο νερό (σε παράκτιους ή άλλως υψηλής αλατότητας υδροφόρους, σε καταληκτικά σημεία υδροφόρου, ή κινηθούν προς βαθύτερους υδροφόρους (Lloyd & Heathcote 1985).

Όπως και στην περίπτωση των διαγραμμάτων Piper, τα δείγματα των τεσσάρων δειγματοληψιών, χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, της υγρής και της ξηρής περιόδου και χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι των συγκεντρώσεων των παραμέτρων δύο περιόδων για κάθε κατηγορία. Με τη βοήθεια της εφαρμογής του λογισμικού DurovPwin (Al-Bassam & Khalil 2012) δημιουργήθηκαν δυο (2) ξεχωριστά διαγράμματα Durov (Εικόνες 9.2 & 9.3), με το πρώτο να απεικονίζει τα δείγματα που αντιπροσωπεύουν την ξηρή περίοδο (μέσος όρος Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου 2016 & Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου 2017) και το δεύτερο τα δείγματα της υγρής περιόδου (μέσος όρος Απριλίου-Μαΐου 2017 & Απριλίου-Μαΐου 2018).

Με βάση την προβολή των αποτελεσμάτων των συγκεντρώσεων των κύριων ιόντων στο εκτεταμένο διάγραμμα Durov (Εικόνα 9.2Α) για την ξηρή περίοδο, αναγνωρίζονται δύο βασικοί υδροχημικοί χαρακτήρες, οι οποίοι μπορούν να διαχωρισθούν στις επιμέρους ομάδες: 1α, 1β, 2α, 2β, 2γ και 2δ. Στη συνέχεια περιγράφονται οι χαρακτήρες αυτοί ενώ στην Εικόνα 9.2Β, απεικονίζεται η χωρική κατανομή των επιμέρους ομάδων που αναγνωρίστηκαν, αναδεικνύοντας έτσι τις υδροχημικές περιφέρειες που αναπτύσσονται στην περιοχή έρευνας και οι οποίες προκύπτουν βάσει της ταξινόμησης κατά Durov.



Εικόνα 9.2. (Α) Ταξινόμηση των δειγμάτων της ξηρής περιόδου (μέσος όρος των δύο ξηρών περιόδων) κατά Durov και (Β) αποτύπωση των υδροχημικών περιφερειών βάσει της χωρικής κατανομής των υδροχημικών ομάδων που προκύπτουν κατά Durov.

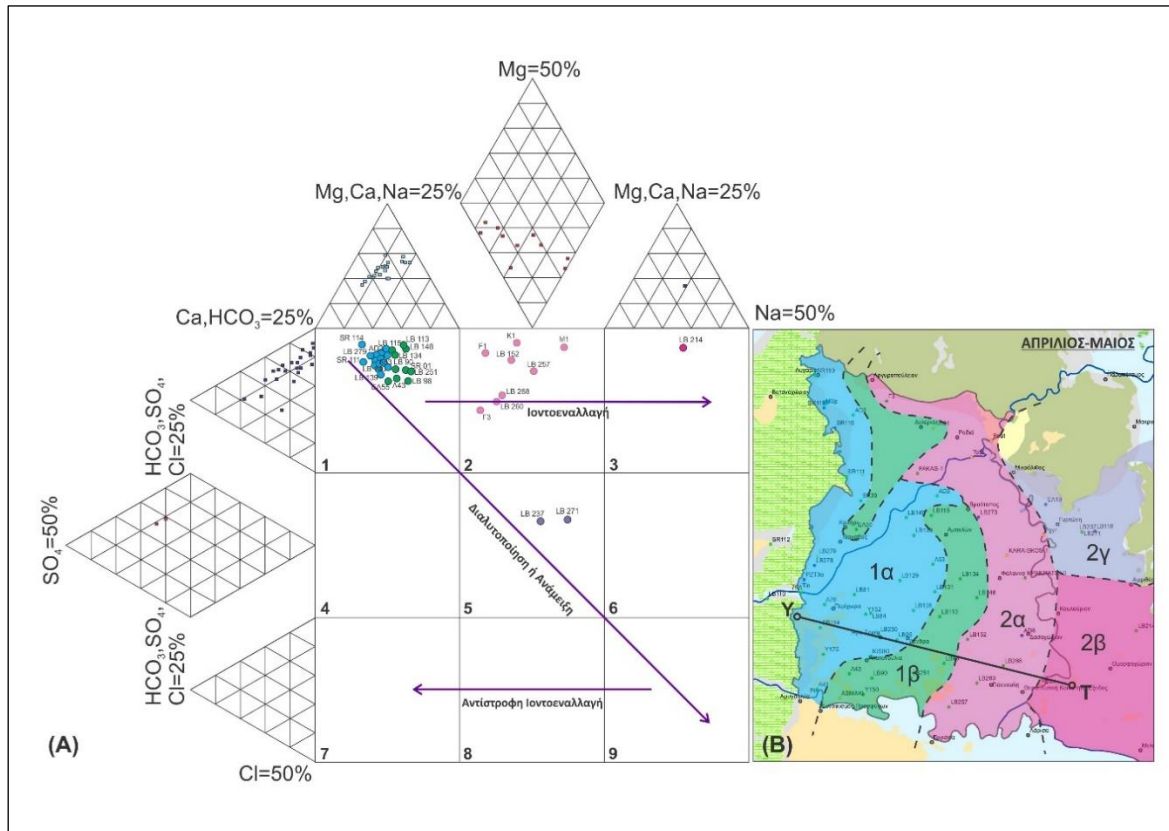
Υδροχημικός Τύπος 1 (Ca-Mg-HCO₃): Στην υπο-ομάδα 1α, κυριαρχούν οι συγκεντρώσεις Ca⁺² και HCO₃⁻, γεγονός που υποδεικνύει ότι πρόκειται για ζώνη τροφοδοσίας κάτι που επαληθεύεται άλλωστε από τις υψηλές τιμές διαλυμένου οξυγόνου, αλλά και τις χαμηλές τιμές θερμοκρασίας νερού της περιοχής αυτής, σύμφωνα με τις μετρήσεις υπαίθρου που αναλύθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους. Βάσει των επικρατούντων κατιόντων στη διαμόρφωση του υδροχημικού χαρακτήρα, η ομάδα 1β δεν διαφέρει ουσιαστικά από την 1α. Ωστόσο παρατηρείται μια μικρή αύξηση στις συγκεντρώσεις του Na⁺ και του Mg⁺², ενώ αναφορικά με τα ανιόντα, υπάρχουν υψηλότερες τιμές SO₄⁻². Χωρικά, ο υδροχημικός αυτός τύπος καταλαμβάνει δύο ζώνες εκατέρωθεν του Τιταρήσιου. Η πρώτη ξεκινά βόρεια αυτού και εκτείνεται προς το βορειοδυτικό τμήμα της υπολεκάνης, ενώ η δεύτερη ξεκινά από το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης, νοτιοανατολικά από τον Τιταρήσιο και εκτείνεται προς το νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα της υπολεκάνης. Η επικράτηση Ca⁺² και HCO₃⁻ και σε αυτήν την υπό-ομάδα συνηγορούν στον χαρακτήρα ζώνης τροφοδοσίας, ενδεχομένως ελαφρά χαμηλότερης έντασης σε σχέση με την ομάδα 1α, ενώ η συμμετοχή του Mg⁺² στη διαμόρφωση του υδροχημικού τύπου, συνάδει με την ελαφρά δολομιτίωση που χαρακτηρίζει το ανθρακικό σύστημα (Panagoroulios 1995). Αιτία της παρατηρούμενης διαφοροποίησης μεταξύ των δύο υπό-ομάδων ενδέχεται να αποτελεί ο περιορισμένος ρυθμός τροφοδοσίας του συστήματος από το καρστ, γεγονός που επιτρέπει ανάμιξη νερού τροφοδοσίας με το νερό του υδατικού συστήματος ή/και την ανάπτυξη σε μικρό βαθμό

ιοντοεναλλακτικών διεργασιών. Ειδικότερα, η ανάπτυξη της υπό-ομάδας αυτής στα ΝΔ όρια της, μπορεί να δικαιολογηθεί με την ανάδυση των Νεογενών αποθέσεων στην περιοχή αυτή, τα οποία περιορίζουν τον ρυθμό ανανέωσης και τροφοδοσίας σε αυτό το τμήμα του υδατικού συστήματος. Ταυτόχρονα στην περιοχή αυτή, σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες (Panagoroulos et al. 1995), αναφέρεται πλευρική τροφοδοσία από τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους, η οποία είναι περιορισμένης έκτασης και έντασης και είναι ποιοτικά υποδεέστερη της τροφοδοσίας από το καρστικό σύστημα. Προς τα βόρεια η ελαφρά αυτή διαφοροποίηση στην υδροχημεία σε συνδυασμό με την ανάλυση των φυσικοχημικών παραμέτρων (Παράγραφος 8.6) και με τη σχετικά υψηλή στάθμη στη ζώνη αυτή (Εικόνα 7.10), μπορεί να υποστηρίξει την ύπαρξη μιας τοπικής επιλεκτικής και μάλλον ασθενούς υδροφορίας που αναπτύσσεται στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο. Η υδροφορία αυτή τροφοδοτεί μέσω πλευρικών μεταγγίσεων το αλλουβιακό πεδίο, και λόγω της φύσης των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, δεν πρέπει να αναπτύσσεται στο υγιές τμήμα του συμπαγούς πετρώματος, αλλά πιθανότατα σε ζώνες διάρρηξης, διάβρωσης ή και εξαλλοίωσης (Βρουχάκης κ.α. 2017).

Υδροχημικός Τύπος 2 (Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄): Ο δεύτερος υδροχημικός τύπος χαρακτηρίζεται από υψηλότερες συγκεντρώσεις Na⁺ και SO₄⁻². Η συμμετοχή Ca⁺² και HCO₃⁻ στη διαμόρφωση του υδροχημικού τύπου της υπό-ομάδας 2α εξακολουθεί να είναι σημαντική, ωστόσο μικρότερη από αυτήν των υπό-ομάδων 1α και 1β. Η θέση προβολής της υπό-ομάδας 2α στο διάγραμμα DUROV, υποδεικνύει προοδευτική συμμετοχή μηχανισμών ανάμιξης και ιοντοεναλλαγής. Τοπικά τουλάχιστον, δεν μπορεί να αποκλειστεί η ανάμιξη του νερού του ποταμού Πηνειού, μέσω διηθήσεων κατά μήκος της κοίτης του, με το νερό του υδατικού συστήματος στη διαμόρφωση του παρατηρούμενου υδροχημικού τύπου. Χαρακτηρίζεται επίσης από χαμηλές αναλογικά με τις υπό-ομάδες 1α και 1β τιμές στις συγκεντρώσεις Ca⁺² και HCO₃⁻. Επομένως η υπό-ομάδα 2α μπορεί να θεωρηθεί ως αντιπροσωπευτική μιας μεταβατικής κατάστασης από ζώνες έντονης τροφοδοσίας (υπό-ομάδες 1α και 1β) προς μια ζώνη περιορισμένης τροφοδοσίας και μεγαλύτερου χρόνου παραμονής του υπόγειου νερού στον υδροφόρο (υπό-ομάδες 2β, 2γ, 2δ).

Στην υπό-ομάδα 2β, επικρατούν τα HCO₃⁻ και τα Na⁺ και πλέον το φαινόμενο της ιοντοεναλλαγής βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη, όπως υποδεικνύεται και από την προβολή της αντιπροσωπευτικής γέωτρησης EL47 στο διάγραμμα Durov. Αναφορικά με τις υπό-ομάδες 2γ και 2δ, αντιπροσωπεύουν νερά ανάμιξης ή διαλυτοποίησης, με την υπό-ομάδα 2δ να αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο, ουσιαστικά από τη ζώνη επικράτησης των ιοντοεναλλακτικών διεργασιών 2β στη ζώνη επικράτησης των φαινομένων ανάμιξης ή διαλυτοποίησης 2γ. Με βάση την χωρική κατανομή των υποομάδων αυτών, υποδεικνύεται ως πιθανότητα η τροφοδοσία του συστήματος και από τα ΒΑ όριά του, η ένταση της οποίας βαίνει μειούμενη προς τα κεντρικά και ΝΑ τμήματα του υδροφόρου, μεταβαίνοντας στην ζώνη επικράτησης των ιοντοεναλλακτικών διεργασιών. Η υπόθεση αυτή υποστηρίζεται από τα ευρήματα της ισοτοπικής υδρολογίας που αναλύονται στο Κεφάλαιο 11 της διατριβής.

Από την προβολή των υδροχημικών αναλύσεων της υγρής περιόδου στο εκτεταμένο διάγραμμα Durov (Εικόνα 9.3Α), προκύπτουν παρόμοια συμπεράσματα για τους επικρατούντες υδροχημικούς χαρακτήρες των υπόγειων υδάτων της περιόδου αυτής σε σχέση με την ξηρή περίοδο. Και στην περίπτωση αυτή υπάρχουν οι ίδιοι κύριοι υδροχημικοί χαρακτήρες 1 και 2 με παρόμοια χωρική κατανομή. Παρόμοια είναι και η χωρική κατανομή των υπό-ομάδων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.3Β, με μόνη διαφορά ότι η ζώνη μετάβασης 2δ, η οποία εμφανίζεται στη χωρική κατανομή της ξηρής περιόδου, δεν εμφανίζεται στην περίπτωση αυτή.



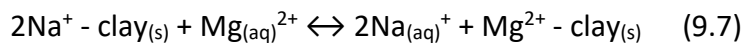
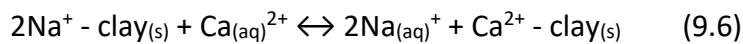
Εικόνα 9.3. (Α) Ταξινόμηση των δειγμάτων της υγρής περιόδου (μέσος όρος των δύο υγρών περιόδων) κατά Durov και (Β) αποτύπωση των υδροχημικών περιφερειών βάσει της χωρικής κατανομής των υδροχημικών ομάδων που προκύπτουν κατά Durov.

Σημειώνεται ότι η αναγνώριση των υπό-ομάδων 2β, γ και δ, στηρίζεται σε εξαιρετικά μικρό αριθμό θέσεων (1 ανά υπό-ομάδα), που καθιστά περιορισμένη την ακρίβεια ορισμού αυτών. Ωστόσο, ο υδροχημικός χαρακτήρας των παραπάνω θέσεων δεν θα άφηνε επιλογή ομογενοποίησης αυτών σε μια υδροχημική κατηγορία.

Οι παραπάνω εκτιμήσεις μπορούν περαιτέρω να υποστηριχθούν με βάση την υδροχημική τομή (ΥΤ) ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης (Διάγραμμα 9.10), διαμέσου του υδατικού συστήματος. Η τομή αυτή αποτελεί τη φυσικοχημική εξέλιξη των υπόγειων υδάτων κατά μήκος της υπόγειας ροής, από την πηγή τροφοδοσίας έως την καταληκτική ζώνη του υπό μελέτη

συστήματος, όπως καθορίζεται από 6 επιλεγμένες (αντιπροσωπευτικές) γεωτρήσεις (Εικόνα 9.3B, τομή ΥΤ).

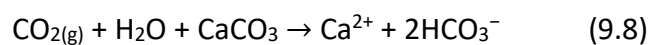
Από την υδροχημική αυτή τομή προκύπτει ότι, κατά την πορεία των υπόγειων υδάτων από τα δυτικά προς τα ανατολικά παρατηρείται πτώση κυρίως των ιόντων ασβεστίου (Ca^{2+}) (αλλά και των ιόντων μαγνησίου (Mg^{2+}), αφού πρώτα παρατηρηθεί μια μικρή αύξηση), με αντίστοιχη αύξηση των ιόντων νατρίου (Na^+). Η δραστική αυτή μείωση του λόγου Ca/Na και Mg/Na προς τα ανατολικά, υποδηλώνει την επικράτηση της ιοντοεναλλαγής ως κυρίαρχης υδροχημικής διαδικασίας στο συγκεκριμένο τμήμα της υπολεκάνης. Η ιοντοανταλλαγή λαμβάνει χώρα σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Σύμφωνα με τις αντιδράσεις αυτές το Ca^{2+} (αντίδραση 9.6) και το Mg^{2+} (αντίδραση 9.7) αντικαθίστανται από Na^+ , οδηγώντας έτσι σε μείωση των ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} και αντίστοιχη αύξηση των ιόντων Na^+ . Η ανταλλαγή αυτή των συγκεκριμένων ιόντων λαμβάνει χώρα λόγω της επικράτησης των ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} στα φυσικά νερά τροφοδοσίας, ειδικά στην περίπτωση που αυτά προέρχονται από ένα ανθρακικό πέτρωμα (Palmer et al. 1984), αλλά και λόγω της εκλεκτικότητας των αργιλικών ορυκτών να προσροφούν πρωτίστως ιόντα Ca^{2+} αλλά και ιόντα Mg^{2+} .

Και οι δύο παραπάνω διεργασίες ιοντοανταλλαγής είναι αναστρέψιμες, ωστόσο δεν λαμβάνουν χώρα συχνά σε συστήματα γλυκών υδάτων εξαιτίας της επιλεκτικότητας των ορυκτών αργίλου προς την προσρόφηση Ca^{2+} και Mg^{2+} , καθώς επίσης και λόγω της έλλειψης υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων Na^+ στα υπόγεια νερά, τα οποία είναι απαραίτητα για να ξεκινήσει η διαδικασία. Δεδομένου ότι η ιοντοανταλλαγή είναι μια αργή διαδικασία, η σημασία της στην εξέλιξη των υπόγειων υδάτων καθίσταται σημαντική σε περιοχές όπου κυριαρχούν συνθήκες χαμηλής ροής, ενώ κοντά στις περιοχές τροφοδοσίας, όπου η ροή των υπόγειων υδάτων είναι υψηλότερη, είναι λιγότερο σημαντική και λιγότερο εμφανής, καθώς καλύπτεται από άλλες υδροχημικές διαδικασίες (ανάμιξη, διάλυση-καθίζηση).

Τα όξινα ανθρακικά άλατα (HCO_3^-) μειώνονται σταδιακά και στη συνέχεια αυξάνονται, φθάνοντας τελικώς σε υψηλότερη τιμή σε σχέση με την περιοχή τροφοδοσίας. Αυτή η εξέλιξη πιθανώς υποδηλώνει εξωτερική επίδραση από CO_2 . Συγκεκριμένα, η αντίδραση του ασβεστίτη, προερχόμενου από το ανθρακικό καρστικοποιημένο πέτρωμα της περιοχής τροφοδοσίας στα δυτικά, με το CO_2 που προήλθε από την διαπνοή της οργανικής ύλης, παρήγαγε ανθρακικό οξύ ως ενδιάμεσο βήμα και στη συνέχεια όξινα ανθρακικά άλατα - με ταυτόχρονη απελευθέρωση ασβεστίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

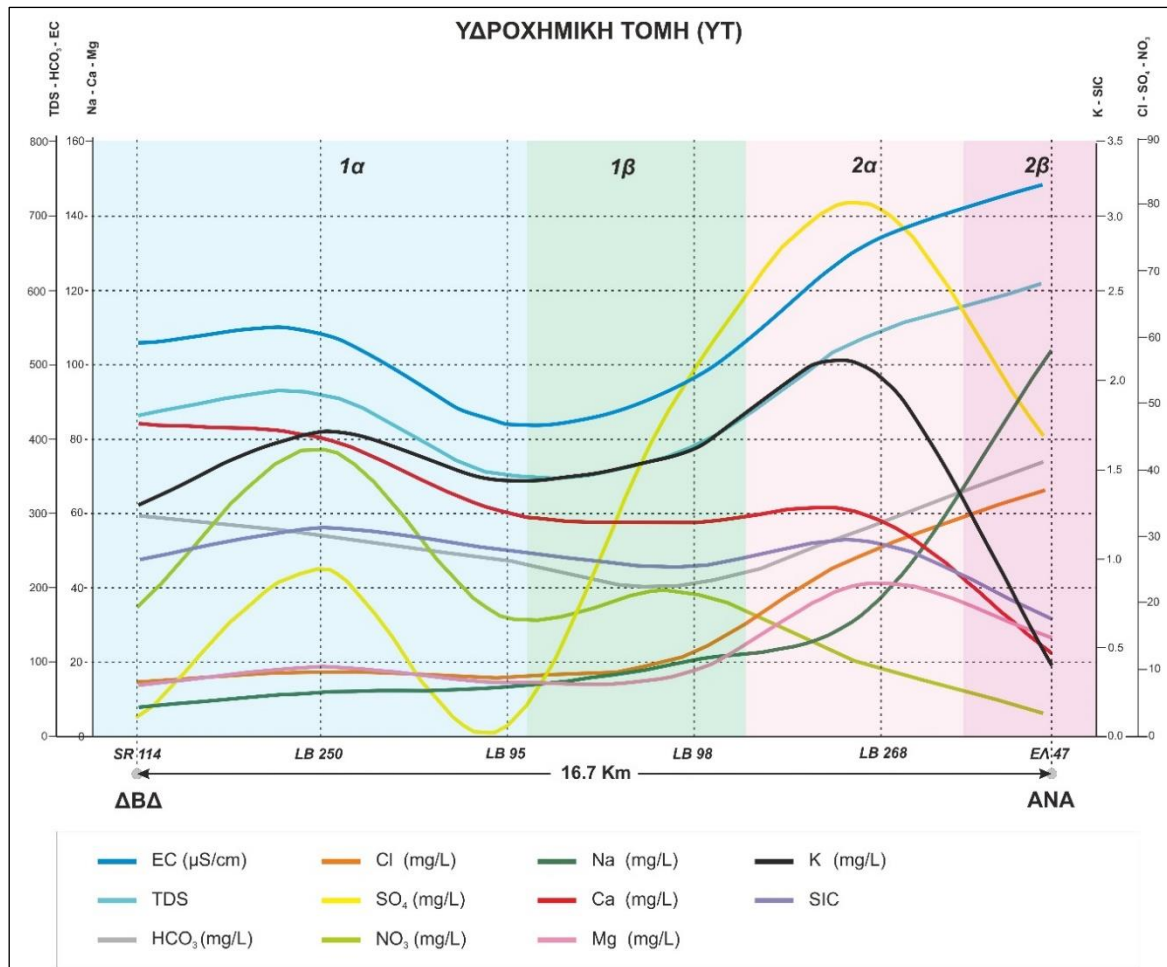


Σταδιακά, κατά μήκος της πορείας ροής των υπόγειων υδάτων, η περιεκτικότητα σε CO_2 αυξάνεται (πιθανώς χρησιμοποιώντας ως πηγή προέλευσης την εμφάνιση οργανικής ύλης

στα ιζήματα του υδροφόρου, λόγω της διαδικασίας καθίζησης των ποταμολιμναίων αποθέσεων, υπό πλούσιες σε C παλαιογεωγραφικές συνθήκες), οδηγώντας σε αύξηση της διαλυτότητας του CaCO_3 (Appelo & Postma 2004) και μετατοπίζοντας τις τιμές του δείκτη κορεσμού του ασβεστίτη (SIC) από υπερκορεσμένες σε ελαφρώς κορεσμένες. Το τελευταίο, έρχεται σε συμφωνία με το Διάγραμμα 9.10, δείχνοντας απότομη μείωση του SIC.

Οι επιστροφές του νερού άρδευσης μπορούν να επηρεάσουν έντονα την ποιότητα των υπόγειων υδάτων, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις των Cl^- , NO_3^- καθώς και την τιμή των συνολικών διαλυμένων στερεών (TDS) (Chourasia et al. 1992, Park et al. 2018). Με βάση την υδροχημική τομή (Διάγραμμα 9.10), κάτι τέτοιο φαίνεται να επαληθεύεται για το κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας (υπό-ομάδες 1β & 2α), το οποίο είναι αυτό που αρδεύεται εντονότερα. Μικρή διαφοροποίηση από αυτό παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις των NO_3^- , οι οποίες παρουσιάζουν συνεχείς αυξομειώσεις κατά την εξέλιξη της πορείας των υδάτων προς τα ανατολικά. Περισσότερα για τις συγκεντρώσεις των NO_3^- , παραθέτονται στο Κεφάλαιο 1, όπου αναλύονται οι ασκούμενες πιέσεις στην περιοχή έρευνας.

Συνεχείς μεταβολές παρουσιάζει και η εξελικτική πορεία των θειικών ιόντων (SO_4^{2+}). Ωστόσο, μεταβαίνοντας προς τα ανατολικά, οι τελικές συγκεντρώσεις τους εμφανίζονται σημαντικά αυξημένες σε σχέση με τις αρχικές. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει, ο χαμηλός ρυθμός ανανέωσης των υδάτων προς τα ανατολικά καθώς και μικρές ταχύτητες ροής των υδάτων έναντι του δυτικού τμήματος, λόγω της αύξησης της απόστασης από την βασική πηγή τροφοδοσίας.



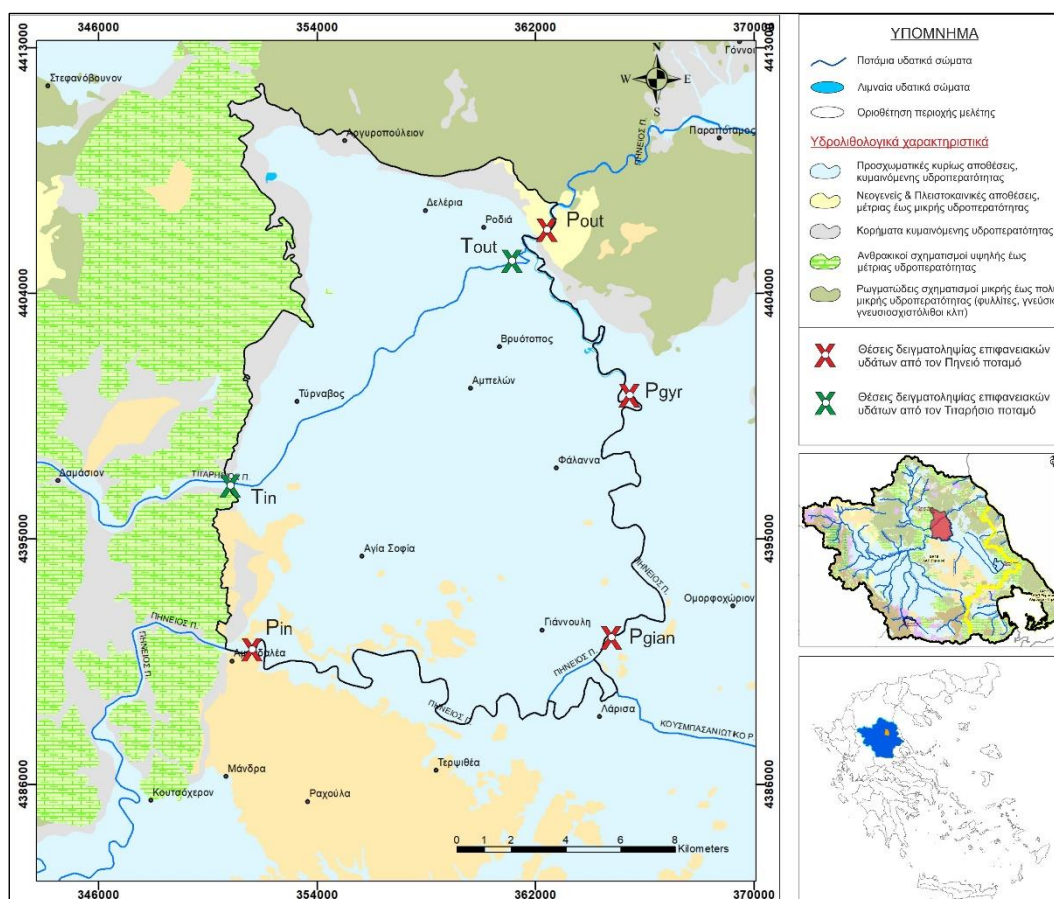
Διάγραμμα 9.10. Υδροχημική τομή δια μέσου του υδατικού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου. Οι χρωματικές αποχρώσεις υποδηλώνουν την αλλαγή του υδροχημικού τύπου.

9.3 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Η ποιότητα των επιφανειακών υδάτων αποτελεί ένα ιδιαίτερο και ευαίσθητο θέμα. Ανθρωπογενείς επιδράσεις (αστικές, βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες, αυξανόμενη κατανάλωση υδατικών πόρων) καθώς και φυσικές διεργασίες (μεταβολές στις εισροές από τα κατακρημνίσματα, διάβρωση, αποσάθρωση υλικών), υποβαθμίζουν τα επιφανειακά ύδατα και επηρεάζουν την καταλληλότητά τους για ύδρευση, άρδευση, βιομηχανία, ψυχαγωγία ή άλλες χρήσεις. Εξαιτίας των πιθανών χωρικών αλλά και χρονικών μεταβολών στη χημεία των επιφανειακών υδάτων, απαιτείται και στην περίπτωση αυτή, μια συνεχής παρακολούθηση, η οποία θα παρέχει μια αντιπροσωπευτική και αξιόπιστη εκτίμηση της ποιότητάς τους (Simeonov et al 2003). Η μεταβολή στη χημεία των επιφανειακών υδάτων ανατρέπει και τη σταθερότητα των οικοσυστημάτων των ποταμών. Λόγω των προαναφερόμενων ανθρωπογενών επιδράσεων, η φυσική κατάσταση της ποιότητας των υδάτων ενός ποταμού πολύ δύσκολα μπορεί να διατηρηθεί. Μεταφέρεται έτσι ρυπαντικό φορτίο από τα επιφανειακά στα υπόγεια υδροσυστήματα, σε εκείνες τις

περιοχές όπου η γεωμορφολογία και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υπεδάφιου ορίζοντα το επιτρέπουν, συμβάλλοντας στην ποιοτική τους υποβάθμιση (Χαριζόπουλος 2013)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία και από τα δύο ποτάμια που διαρρέουν την υπολεκάνη Τυρνάβου (Πηνεϊός και Τιταρήσιος) και στις τέσσερις (4) προγραμματισμένες περιόδους δειγματοληψίας. Για τον Πηνεϊό ποταμό οι θέσεις δειγματοληψίας ήταν τέσσερις, μία στην είσοδο και μία στην έξοδο της υπολεκάνης καθώς και δύο ενδιάμεσες θέσεις στις περιοχές Γιάννουλη και Γυρτώνη (Εικόνα 9.4). Για τον Τιταρήσιο επιλέχθηκαν δύο θέσεις δειγματοληψίας, κατά την είσοδό του και την έξοδό του από την υπολεκάνη (Εικόνα 9.4), καθώς λόγω του χειμαρρώδους χαρακτήρα του δεν παρουσίαζε συχνά ροή στο τμήμα αυτό της πορείας του (κάτω ρου). Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα των υδροχημικών αναλύσεων των έξι (6) αυτών θέσεων επιφανειακών υδάτων και για τις τέσσερις περιόδους. Σημειώνεται, ότι ενώ από τον Πηνεϊό ποταμό ελήφθησαν όλα τα δείγματα (16 συνολικά), λόγω της συνεχούς ροής του, από τον ποταμό Τιταρήσιο ελήφθησαν τα πέντε από τα συνολικά οκτώ που θα μπορούσαν να ληφθούν, λόγω της ανυδρίας που παρουσίαζε ο ποταμός στις υπόλοιπες περιπτώσεις.



Εικόνα 9.4. Δίκτυο παρακολούθησης επιφανειακών υδάτων (Πηνεϊός-Τιταρήσιος).

9.3.1 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Θερμοκρασία νερού

Η διακύμανση των τιμών της θερμοκρασίας για τον Πηνειό ποταμό είναι από 13.9°C (P_{in} , Απρίλιος 2017) μέχρι 27.7 °C (P_{gyr} , Σεπτέμβριος 2017), ενώ για τον ποταμό Τιταρήσιο η αντίστοιχη κύμανση είναι 16.2 °C (T_{out} , Απρίλιος 2017) έως 26.5 °C (T_{in} , Σεπτέμβριος 2016) (Πίνακας 9.6). Από τη σύγκριση των τιμών της θερμοκρασίας στην είσοδο και την έξοδο των ποταμών από την υπολεκάνη, προκύπτει για όλες τις περιόδους δειγματοληψίας, ότι τα νερά του ποταμού Τιταρήσιου είναι 2.5-2.9 °C θερμότερα από αυτά του Πηνειού. Το στοιχείο αυτό οφείλεται βασικά στη διαφορά του βάθους στάθμης ανάμεσα στα δύο ποτάμια. Η διακύμανση των τιμών θερμοκρασίας στα επιφανειακά ύδατα ακολουθεί το χρονικό πρότυπο της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα. Είναι γνωστό άλλωστε ότι οι θερμοκρασίες στα επιφανειακά νερά δείχνουν ημερήσιες και ετήσιες διακυμάνσεις που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες και ιδιαίτερα την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (Keery et al. 2006). Ο Τιταρήσιος ποταμός, λόγω της εποχιακής ροής του, κατά τη διάρκεια όλων των δειγματοληψιών παρουσίαζε πολύ χαμηλή στάθμη, με αποτέλεσμα το νερό να θερμαίνεται ευκολότερα σε σχέση με το νερό του ποταμού Πηνειού (μεγαλύτερη στήλη νερού).

Πίνακας 9.6. Αποτελέσματα φυσικοχημικών παραμέτρων επιφανειακών υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου.

Κωδικός σημείου	Θέση	Ημερομηνία δειγματοληψίας	T_w (°C)	pH	E.C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	D.O. (mg/L)	O.R.P. (mV)	TDS (mg/L)
P_{in}	Πηνειός είσοδος (Αμυγδαλέα)	15/9/2016	24.0	8.10	532.5	8.02	58.2	527.5
P_{in}	Πηνειός είσοδος (Αμυγδαλέα)	5/4/2017	13.9	7.90	562.0	9.62	44.5	463.3
P_{in}	Πηνειός είσοδος (Αμυγδαλέα)	5/9/2017	24.4	8.04	477.0	7.64	82.8	388.1
P_{in}	Πηνειός είσοδος (Αμυγδαλέα)	2/5/2018	19.0	7.82	575.0	7.86	171.0	444.2
P_{gian}	Πηνειός (Γιάννουλη)	15/9/2016	24.2	8.18	520.0	8.85	78.0	442.5
P_{gian}	Πηνειός (Γιάννουλη)	5/4/2017	15.4	7.92	565.0	9.96	81.0	478.1
P_{gian}	Πηνειός (Γιάννουλη)	6/9/2017	25.6	8.16	494.1	7.88	52.5	406.1
P_{gian}	Πηνειός (Γιάννουλη)	3/5/2018	19.8	7.85	559.0	8.40	35.0	462.5
P_{gyr}	Πηνειός (Γυρτώνη)	15/9/2016	26.6	8.23	520.0	8.41	48.4	494.0
P_{gyr}	Πηνειός (Γυρτώνη)	6/4/2017	14.8	7.91	540.0	9.84	74.7	470.1
P_{gyr}	Πηνειός (Γυρτώνη)	6/9/2017	27.7	8.15	390.2	7.30	54.2	313.0
P_{gyr}	Πηνειός (Γυρτώνη)	3/5/2018	20.4	7.87	555.0	7.95	31.5	454.8
P_{out}	Πηνειός έξοδος (Ροδιά)	15/9/2016	24.0	8.17	540.0	9.04	65.0	414.4
P_{out}	Πηνειός έξοδος (Ροδιά)	6/4/2017	15.5	8.04	536.0	9.72	84.8	462.3
P_{out}	Πηνειός έξοδος (Ροδιά)	6/9/2017	23.8	8.20	619.0	9.00	54.3	487.1
P_{out}	Πηνειός έξοδος (Ροδιά)	2/5/2018	21.4	7.99	561.0	9.07	52.2	432.6
T_{in}	Τιταρήσιος είσοδος	15/9/2016	26.5	8.41	514.0	11.87	85.4	480.7
T_{in}	Τιταρήσιος είσοδος	6/4/2017	16.4	8.04	467.4	12.79	71.6	379.6
T_{in}	Τιταρήσιος είσοδος	2/5/2018	21.9	8.60	490.5	12.16	150.0	361.6
T_{out}	Τιταρήσιος έξοδος	6/4/2017	16.2	8.33	465.0	10.92	78.3	382.8
T_{out}	Τιταρήσιος έξοδος	2/5/2018	24.0	8.25	425.0	10.54	67.0	340.4

Η τιμή του pH

Η διακύμανση των τιμών του pH για τον Πηνειό ποταμό είναι μεταξύ 7.82 (P_{in} , Απρίλιος 2018) και 8.23 (P_{gyr} , Σεπτέμβριος 2016), ενώ για τον ποταμό Τιταρήσιο η αντίστοιχη κύμανση είναι από 8.04 (T_{in} , Απρίλιος 2017) έως 8.60 (T_{in} , Απρίλιος 2018) (Πίνακας 9.6). Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεγάλο εύρος κύμανσης στις τιμές του pH, καθώς και ότι και τα δύο ποτάμια παρουσιάζουν ελαφρώς αλκαλικό χαρακτήρα. Βασικό ρόλο στον αλκαλικό αυτό χαρακτήρα των επιφανειακών υδάτων, παίζει η λιθολογία της ευρύτερης λεκάνης απορροής των ποταμών. Για τον Τιταρήσιο ποταμό το 67% της λεκάνης του αποτελείται από κρυσταλλικά (46%) και ανθρακικά (21%) πετρώματα (το υπόλοιπο αλλούβια και ένα μικρό ποσοστό φλύσχη), ενώ για τον Πηνειό τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 16% και 18% αντίστοιχα (Stamatis 1999). Σύμφωνα πάντως με τον Skoulikidis et al. (2006), οι τιμές αυτές του pH είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποτάμια της Ελλάδας. Σύμφωνα με τους ίδιους συγγραφείς, τα ποτάμια της περιοχής έρευνας ανήκουν στην 2^η γεωγραφική ζώνη (γεω-χημική κλιματική ζώνη) για την Ελλάδα, στην οποία οι τιμές του pH των ποταμών κυμαίνονται από 7.5 έως 9.3. Από προηγούμενη εργασία για όλη την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού (Stamatis 1999), οι τιμές pH για τον κύριο κλάδο του Πηνειού ήταν 6.7 έως 8.4 (για το 1992), με τιμές για την περιοχή P_{gyr} 8.3 το χειμώνα και 8.1 το καλοκαίρι. Για τον ποταμό Τιταρήσιο, με βάση την ίδια εργασία, οι τιμές κυμαίνονται από 7.4 έως 8.5, με τιμές για την περιοχή T_{out} 8.1 το χειμώνα και 7.4 το καλοκαίρι. Από τις τιμές του Πίνακα 9.6 για τις αντίστοιχες θέσεις, προκύπτει ότι δεν υπάρχουν ουσιαστικές μεταβολές στις τιμές του pH, των επιφανειακών υδάτων της περιοχής, την τελευταία 25ετία.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Για τον Πηνειό ποταμό οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) κυμαίνονται από 390.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ έως 619 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Για τον Τιταρήσιο το αντίστοιχο εύρος είναι μικρότερο, 425-514 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Πίνακας 7.28). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα επιφανειακά νερά καθορίζεται κυρίως από το είδος των γεωλογικών σχηματισμών, τους οποίους διαρρέουν τα ποτάμια, καθώς και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες πλησίον αυτών (αστικά, βιομηχανικά, γεωργικά λύματα). Οι τιμές της EC είναι παραπλήσιες με αυτές που μετρήθηκαν και στα υπόγεια νερά, όπου σε λίγες περιπτώσεις ξεπερνούσε τα 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, με την υψηλότερη τιμή να ανέρχεται στα 877 $\mu\text{S}/\text{cm}$, εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου. Κατ' αντιστοιχία οι αγωγιμότητες στον Πηνειό στη θέση P_{gyr} το έτος 1992 ήταν 482 $\mu\text{S}/\text{cm}$ το χειμώνα και 576 $\mu\text{S}/\text{cm}$ το καλοκαίρι, ενώ για τον Τιταρήσιο (T_{out}) 368 και 415 $\mu\text{S}/\text{cm}$ αντίστοιχα.

Συνολικά διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids)

Οι τιμές TDS στον Πηνειό ποταμό για το χρονικό διάστημα των μετρήσεων (Σεπτέμβριος 2016 - Απρίλιος 2018) της παρούσας έρευνας, κυμαίνονται από 313.0 έως 527.5 mg/L, με μέση τιμή τα 446.3 mg/L. Για τον Τιταρήσιο η αντίστοιχη κύμανση είναι μεταξύ 340.4 και 480.7 mg/L, με μέση τιμή τα 389 mg/L. Πιο συγκεκριμένα στη θέση P_{gyr} του Πηνειού ποταμού, η τιμές TDS κυμαίνονται μεταξύ 313.03-493.96 mg/L, ενώ η αντίστοιχη κύμανση

το 1992 ήταν 358 - 437 mg/L (Stamatis 1999). Για τη θέση T_{out} του Τιταρήσιου, η μέση τιμή της υγρής περιόδου είναι 361.60 mg/L, ενώ η τιμή για το χειμώνα του 1992 ήταν 286 mg/L.

Σύμφωνα με τον ίδιο συγγραφέα (Stamatis 1999), για ολόκληρη την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού, η τιμή των TDS είναι μικρή στα ανάντη, κάτι που αντανακλά το γεωλογικό περιβάλλον στη συγκεκριμένη περιοχή (σχιστόλιθοι). Από την άλλη πλευρά, στις περιοχές όπου ο Πηνειός διέρχεται από Μεσοζωικούς και Τριτογενείς ιζηματογενείς σχηματισμούς, καθώς και οφιολιθικές μάζες, οι τιμές TDS αυξάνονται βαθμιαία. Στη παρούσα έρευνα ωστόσο, η πορεία και των δύο ποταμών γίνεται διαμέσου Τεταρτογενών αποθέσεων και έτσι, οι όποιες διαφορές υπάρχουν στις τιμές TDS από θέση σε θέση δεν οφείλονται στη λιθολογία. Οι διαφορές αυτές, από θέση σε θέση αλλά και από περίοδο σε περίοδο, μπορεί να είναι συνεπώς είτε αποτέλεσμα της διαφοράς στη ροή των ποταμών, καθώς μεγάλοι όγκοι νερού οδηγούν σε μείωση των τιμών TDS και αντιστρόφως, είτε και αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων (γεωργία, βιομηχανία, αστικοποίηση).

Διαλυμένο οξυγόνο

Και στην περίπτωση του διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved Oxygen) το εύρος της κύμανσης δεν είναι μεγάλο και για τους δύο ποταμούς, ωστόσο ο Τιταρήσιος παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές (Πίνακας 9.6). Για τον Πηνειό όλες οι τιμές DO που μετρήθηκαν είναι μικρότερες από 10 mg/L με διακύμανση μεταξύ 7.3 και 10.0 mg/L, ενώ για τον ποταμό Τιταρήσιο οι συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες των 10 mg/L, με κύμανση από 10.5 έως 12.8 mg/L. Το αντίστοιχο εύρος των συγκεντρώσεων του DO για τα επιφανειακά νερά της ίδιας γεω-χημικής κλιματικής ζώνης (Skoulikidis et al. 2006) είναι 6.7-12.0 mg/L.

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό αυξάνεται με την πτώση της θερμοκρασίας, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τη διαλυτότητα του οξυγόνου. Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνεται σε κάθε μία από τις έξι (6) θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακών υδάτων, εκτός 2-3 μεμονωμένων τιμών που και αυτές είναι σχετικά κοντά μεταξύ τους.

Δυναμικό οξειδοαναγωγής

Όπως ειπώθηκε και στην περίπτωση των υπόγειων νερών, η μέτρηση του δυναμικού οξειδοαναγωγής (Oxidation-Reduction Potential) είναι μια μερικώς ασταθής μέτρηση. Ωστόσο δίνει μια γενική εικόνα των συνθηκών που επικρατούν σε κάθε θέση δειγματοληψίας. Και για τα δύο ποτάμια οι τιμές του ORP είναι θετικές (επικράτηση οξειδωτικών συνθηκών), σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς όπως ειπώθηκε προηγουμένως, υπήρχε επάρκεια σε οξυγόνο. Για τον Πηνειό οι τιμές του ORP κυμαίνονταν από 31.5 έως 171 mV, ενώ για τον Τιταρήσιο από 67 έως 150 mV. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω της μικρότερης διαλυτότητας του οξυγόνου, το ORP εμφανίζει μικρότερες τιμές. Ωστόσο από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν (Πίνακας 9.6) δεν προκύπτει ικανοποιητική συσχέτιση της θερμοκρασίας με το ORP, κάτι που οφείλεται στην αστάθεια των μετρήσεων του δυναμικού οξειδοαναγωγής.

9.3.2 ΚΥΡΙΑ ΙΟΝΤΑ

Τα αποτελέσματα των υδροχημικών αναλύσεων των επιφανειακών υδάτων παραθέτονται, ανά περίοδο δειγματοληψίας, στους Πίνακες Π1.17 έως Π1.20 του Παραρτήματος 1, μαζί με αυτά των υπόγειων υδάτων. Για την ευχερέστερη παρακολούθηση της ερμηνείας και του σχολιασμού των αναλύσεων που παρατίθεται στη συνέχεια, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αποτυπώνονται και στον Πίνακα 9.7 που ακολουθεί. Τόσο για τα κύρια ιόντα, όσο και για τα βαρέα μέταλλα, που ακολουθούν, αναλύονται εκτενέστερα μόνο εκείνα που παρουσιάζουν σημαντικές συγκεντρώσεις και αξιόλογο εύρος κύμανσης.

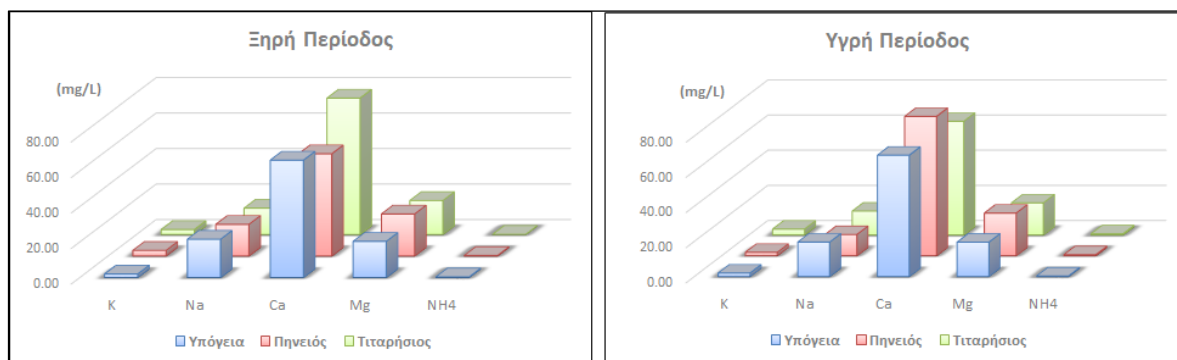
Πίνακας 9.7. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων επιφανειακών υδάτων (Πηνεϊός και Τιταρήσιος) για το σύνολο των δειγματοληψιών.

Κωδικός Θέσης		pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Ολ. Σκληρότητα (mg CaCO ₃ /l)	Cl (mg/l)	CO ₃ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	SAR	B (mg/l)	Cu ($\mu\text{g/l}$)	Fe ($\mu\text{g/l}$)	Mn ($\mu\text{g/l}$)	Pb ($\mu\text{g/l}$)	Cd ($\mu\text{g/l}$)	TDS	As ($\mu\text{g/l}$)	Zn (mg/l)
Pin	Σεπ-16	8.1	544	2.30	12.89	69.45	26.45	282	9.69	0.00	367	30.30	8.40	0.64	0.18	0.33	0.00	1.36	85.45	2.66	0.00	0.00	527		
Pgian	Σεπ-16	8.2	518	2.50	11.90	66.10	24.15	265	9.69	0.00	313	7.47	7.68	0.28	0.17	0.32	0.00	1.62	17.82	0.95	0.00	0.00	442		
Pgyr	Σεπ-16	8.2	528	2.80	15.87	65.90	24.75	266	11.31	0.00	345	17.66	9.84	0.54	0.17	0.42	0.00	1.60	63.10	2.78	0.00	0.00	494		
Pout	Σεπ-16	8.2	493	2.70	12.30	62.90	22.25	249	9.69	0.00	293	2.19	8.53	0.26	0.15	0.34	0.00	1.83	61.60	4.08	0.17	0.00	414		
Tin	Σεπ-16	8.4	534	2.80	14.87	76.85	19.15	271	11.88	3.95	312	26.72	12.66	0.05	0.05	0.39	0.00	0.70	44.33	4.10	0.00	0.00	481		
Pin	Απρ-17	7.9	561	1.60	12.56	83.85	25.05	313	10.37	0.00	318	2.75	8.34	0.82	0.08	0.31	0.23	1.33	9.64	3.94	0.00	0.00	463		
Pgian	Απρ-17	7.9	568	2.00	14.35	83.50	25.45	313	12.14	0.00	311	19.55	7.68	1.82	0.14	0.35	0.22	1.44	29.24	0.57	0.00	0.00	478		
Pgyr	Απρ-17	7.9	562	1.90	13.58	82.80	25.40	311	11.01	0.00	309	18.23	8.49	0.02	0.08	0.33	0.23	1.57	17.12	0.00	0.00	0.00	470		
Pout	Απρ-17	8.0	545	2.50	12.97	80.85	24.15	301	10.65	0.00	297	25.77	8.38	0.34	0.09	0.32	0.24	1.32	31.33	9.01	0.00	0.00	462		
Tin	Απρ-17	8.0	473	4.90	13.88	70.00	17.40	246	12.42	0.00	243	5.21	11.85	0.87	0.20	0.38	0.26	1.66	23.10	1.74	0.00	0.00	380		
Tout	Απρ-17	8.3	472	2.70	13.28	72.75	17.70	255	11.78	0.00	252	1.81	9.56	1.47	0.08	0.36	0.22	1.45	16.13	1.86	0.00	0.00	383		
Pin	Σεπ-17	8.0	483	2.20	16.91	62.15	20.65	240	13.30	0.00	266	4.08	2.78	0.02	0.03	0.47	0.06	2.95	97.35	8.68	0.00	0.01	388		
Pgian	Σεπ-17	8.2	475	2.80	16.61	59.00	21.40	235	13.37	0.00	266	24.83	1.82	0.25	0.04	0.47	0.05	1.05	11.85	0.63	0.00	0.02	406		
Pgyr	Σεπ-17	8.2	389	3.40	15.42	33.80	19.25	164	12.74	0.00	202	24.83	1.14	0.03	0.02	0.52	0.06	1.12	34.16	0.52	0.00	0.00	313	0.28	0.00
Pout	Σεπ-17	8.2	610	6.60	40.53	41.35	30.50	229	36.47	0.00	270	59.92	1.38	0.07	0.02	1.16	0.11	0.92	21.88	3.10	0.00	0.01	487		
Pin	Απρ-18	7.8	564	1.80	10.22	77.05	24.25	292	9.73	0.00	296	15.77	8.77	0.42	0.14	0.26	0.07	0.27	14.49	0.79	0.00	0.13	444	0.68	0.00
Pgian	Απρ-18	7.9	564	2.00	12.42	71.85	22.40	272	10.57	0.00	315	18.79	8.61	0.69	0.13	0.33	0.00	0.11	5.21	1.15	0.00	0.13	462	0.00	0.00
Pgyr	Απρ-18	7.9	558	1.90	10.22	77.55	24.00	292	9.87	0.00	321	1.62	8.65	0.42	0.09	0.26	0.00	0.35	7.60	0.34	0.00	0.14	455	0.00	0.00
Pout	Απρ-18	8.0	557	2.00	10.22	77.10	23.40	289	10.15	0.00	295	4.83	9.76	0.27	0.08	0.26	0.00	2.05	7.51	0.30	0.00	0.13	433	1.63	0.00
Tin	Απρ-18	8.6	466	2.90	12.32	64.45	17.50	233	12.83	10.53	230	2.00	9.11	0.15	0.07	0.35	0.01	0.35	8.23	1.32	0.00	0.13	362	2.16	0.00
Tout	Απρ-18	8.3	455	2.90	15.02	51.60	20.45	213	14.17	0.00	230	4.83	1.15	0.23	0.02	0.45	0.02	10.58	40.85	27.26	0.00	0.15	340	0.00	0.00

Κάλιο (K^+)

Αναφορικά με τις θέσεις δειγματοληψίας του Πηνειού ποταμού, οι συγκεντρώσεις καλίου κυμαίνονται από 1.6 έως 6.6 mg/L, με μέση τιμή τα 2.6 mg/L. Χαρακτηριστικό, στη περίπτωση του Πηνειού, είναι ότι για κάθε θέση οι συγκεντρώσεις K^+ του Σεπτεμβρίου είναι μεγαλύτερες από αυτές του Απριλίου. Για τον Τιταρήσιο το εύρος κύμανσης των συγκεντρώσεων καλίου είναι από 2.7 έως 4.9 mg/L, με μέση τιμή τα 3.2 mg/L. Οι συγκεντρώσεις K^+ των δύο ποταμών, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις των υπόγειων υδάτων (μέσες τιμές), είναι μεγαλύτερες τόσο για την ξηρή όσο και για την υγρή περίοδο, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 9.11, όπου απεικονίζεται η σύγκριση των κατιόντων μεταξύ υπόγειων και επιφανειακών υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου. Αντίστοιχες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν στις θέσεις P_{gyr} και T_{out} στα δύο ποτάμια έδωσαν τιμές K^+ παραπλήσιες με τις σημερινές (Stamatis 1999). Στον χάρτη της Εικόνας 9.5 φαίνονται οι συγκεντρώσεις των κατιόντων των επιφανειακών υδάτων σε κάθε θέση μέτρησης, για όλες τις περιόδους δειγματοληψίας (χωροχρονική μεταβολή).

Οι συγκεντρώσεις K^+ αποτελούν έναν από του δείκτες αστικής και γεωργικής ρύπανσης των υδάτων (Stamatis 1999), υπόγειων και επιφανειακών. Αναφορικά με τα επιφανειακά ύδατα η ρύπανση αυτή είναι άμεση και προέρχεται από τα αστικά λύματα και τα καλιούχα λιπάσματα (γι' αυτό και οι συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες τον Σεπτέμβριο). Ωστόσο, αναφορικά με τα υπόγεια ύδατα και με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα, δεν μπορεί να υποστηριχθεί αν η ρύπανση αυτή οφείλεται στην υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων ή στην απευθείας κατείσδυση του ρύπου στον υδροφόρο ή και στο συνδυασμό των δύο αυτών περιπτώσεων.



Διάγραμμα 9.11. Σύγκριση των συγκεντρώσεων των κατιόντων υπόγειων και επιφανειακών υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου (μέσες τιμές).

Νάτριο (Na^+)

Οι συγκεντρώσεις νατρίου στις θέσεις μέτρησης του ποταμού Πηνειού κυμαίνονται από 10.2 έως 40.5 mg/L, με μέση τιμή τα 14.9 mg/L και τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις να παρατηρούνται τον Σεπτέμβριο. Από τον χάρτη της Εικόνας 9.5 φαίνεται μια παραπλήσια χωροχρονική μεταβολή από θέση σε θέση, με εξαίρεση τη θέση P_{out} , όπου τον Σεπτέμβριο του 2017 παρατηρείται μια απότομη αύξηση των ιόντων Na^+ . Από την άλλη πλευρά, για τον Τιταρήσιο, το εύρος κύμανσης των τιμών συγκέντρωσης Na^+ είναι από 12.3 έως 15.0

mg/L (μέση τιμή 13.9 mg/L), χωρίς ωστόσο να υπάρχει ξεκάθαρη χρονική εξάρτηση, καθώς για τον Σεπτέμβριο υπάρχει μόνο ένα δείγμα, λόγω της ανυδρίας που παρουσιάζει την περίοδο αυτή ο ποταμός. Από το Διάγραμμα 9.11 προκύπτει ότι, στην περίπτωση του νατρίου, οι συγκεντρώσεις του στα υπόγεια ύδατα είναι μεγαλύτερες από αυτές των επιφανειακών. Από τη σύγκριση των μετρήσεων, στις θέσεις P_{gyr} και T_{out} , του 1992 (Stamatis 1999), προκύπτουν επίσης παραπλήσιες τιμές Na^+ με τις πρόσφατες μετρήσεις. Για τη θέση P_{gyr} , το 1992, η κύμανση ήταν 12-14 mg/L, ενώ οι πρόσφατες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 10.2 και 15.9 mg/L και για τη θέση T_{out} , η κύμανση το 1992 ήταν 9-14 mg/L, ενώ οι πρόσφατες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 13.3 και 15.0 mg/L.

Οι τιμές των συγκεντρώσεων νατρίου στα επιφανειακά νερά οφείλονται και στη διάλυση νατρίουχων ορυκτών, τα οποία υπάρχουν στους σχηματισμούς από τους οποίους διέρχονται τα υδατορέματα. Σε αλλουβιακούς υδροφόρους της ευρύτερης περιοχής, παλαιότερες μετρήσεις στα υπόγεια νερά, έδειξαν μια τιμή 12 mg/L για τα ιόντα Na^+ (Stamatis 1999). Η τιμή αυτή είναι μικρότερη της μέσης τιμής που υπολογίσθηκε για τα υπόγεια (~20 mg/L) αλλά και τα επιφανειακά (~14 mg/L) ύδατα της περιοχής έρευνας. Δεδομένου ότι και τα ιόντα Na^+ αποτελούν δείκτη αστικής και γεωργικής ρύπανσης, οι αυξημένες τιμές τους στην περιοχή έρευνας, θα μπορούσαν να αποδοθούν συνδυαστικά στη διάλυση νατρίουχων ορυκτών και στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Ασβέστιο (Ca^{2+})

Με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των επιφανειακών υδάτων, οι συγκεντρώσεις ασβεστίου κυμαίνονται μεταξύ 33.8 και 83.9 mg/L για τον Πηνειό και 51.6 και 76.9 mg/L για τον Τιταρήσιο. Οι μέσες τιμές είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, 68.5 και 67.1 mg/L αντίστοιχα. Αναφορικά με τη χρονική μεταβολή των ιόντων Ca^{2+} για τον Πηνειό ποταμό, για τον οποίο υπάρχουν συγκρίσιμα δεδομένα, παρατηρείται μια σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων τον Απρίλιο (υγρή περίοδος) σε σχέση με το Σεπτέμβριο (ξηρή περίοδος), η οποία από θέση σε θέση κυμαίνεται από 14 έως 36 mg/L. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την τροφοδοσία των επιφανειακών υδάτων από τις βροχοπτώσεις της υγρής περιόδου, οι οποίες προκαλούν τη διάλυση του $CaCO_3$ των καρστικών σχηματισμών εμπλουτίζοντας έτσι τα επιφανειακά (και τα υπόγεια) ύδατα σε Ca^{2+} .

Από το Διάγραμμα 9.11 προκύπτει ότι κατά την ξηρή περίοδο οι συγκεντρώσεις Ca^{2+} στα υπόγεια ύδατα υπερτερούν των συγκεντρώσεων του Πηνειού και υπολείπονται των συγκεντρώσεων του Τιταρήσιου. Αντίθετα κατά την υγρή περίοδο, και ενώ οι συγκεντρώσεις Ca^{2+} στα υπόγεια ύδατα δεν μεταβάλλονται, οι συγκεντρώσεις του Πηνειού αυξάνονται σημαντικά ξεπερνώντας τις αντίστοιχες των υπογείων, ενώ οι συγκεντρώσεις στον Τιταρήσιο παρουσιάζουν μικρή πτώση και υπολείπονται για λίγο αυτές των υπογείων. Από την χωρική και χρονική μεταβολή των ιόντων Ca^{2+} , που παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.5, φαίνεται ότι ο Πηνειός ποταμός διατηρεί μια σταθερότητα, τόσο από θέση σε θέση όσο και από περίοδο σε περίοδο, με μοναδική εξαίρεση το Σεπτέμβριο του 2017, όπου στις δυο (2) κατάντη θέσεις μέτρησης (Γυρτώνη και Ροδιά) παρουσιάζει εμφανή πτώση στις

συγκεντρώσεις του Ca^{2+} . Από τις λιγοστές μετρήσεις του Τιταρήσιου, από τον ίδιο χάρτη, προκύπτει μια πτώση της συγκέντρωσης των ιόντων Ca^{2+} (της τάξης των 10mg/L), μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του από την υπολεκάνη, κατά τον Απρίλιο του 2018. Σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις ασβεστίου στη θέση P_{gyr} , η κύμανση από 50-68 mg/L το 1992, έφτασε από 50-80 mg/L το 2018 και για τη θέση T_{out} από 46-62 mg/L το 1992, αυξήθηκε ελαφρώς από 52-73 mg/L.

Μαγνήσιο (Mg^{2+})

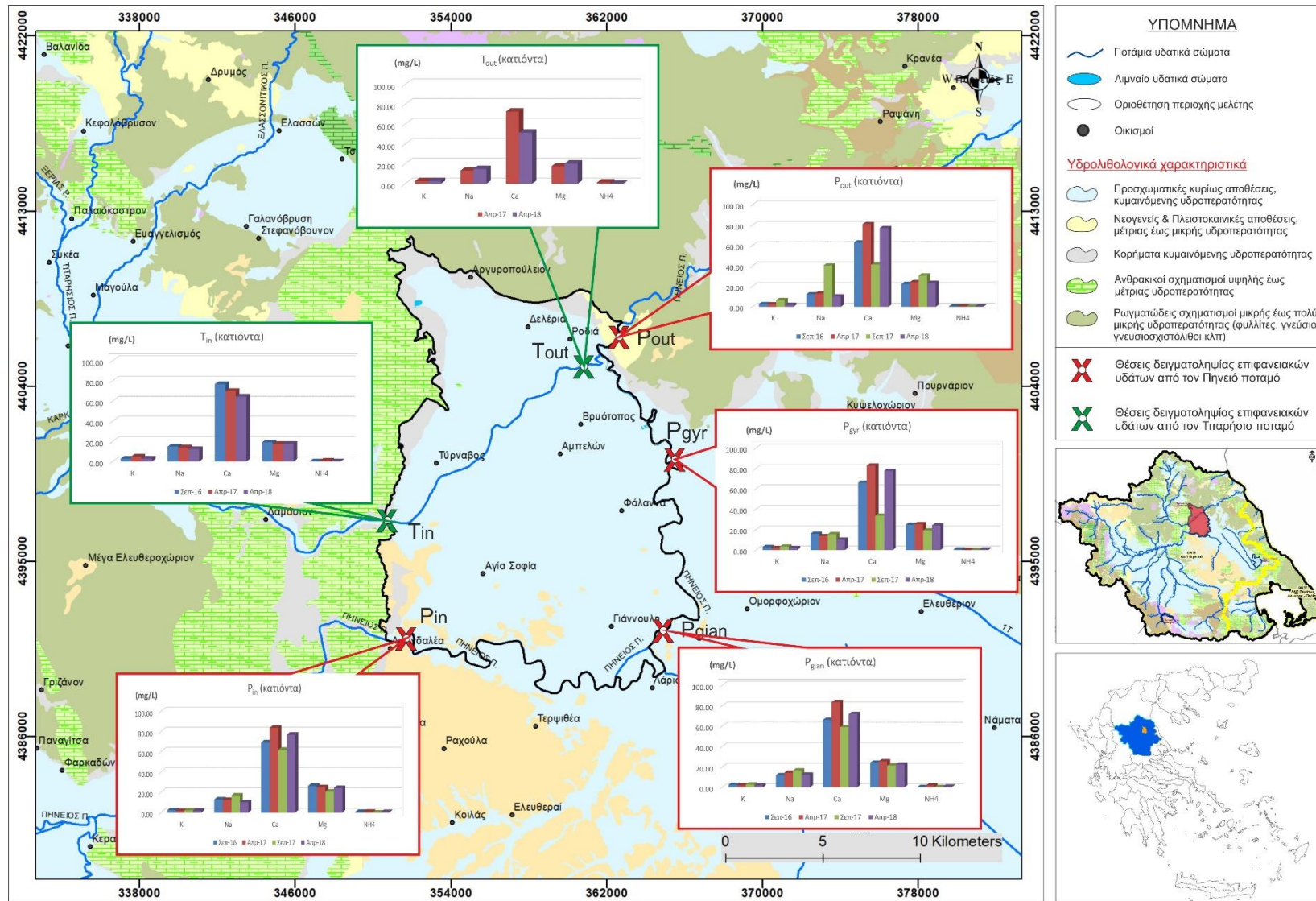
Οι συγκεντρώσεις μαγνησίου στο ποταμό Πηνειό κυμαίνονται από 19.3 έως 30.5 mg/L, με μέση τιμή τα 24.0 mg/L. Αντίστοιχα, ο Τιταρήσιος ποταμός παρουσιάζει μικρό εύρος κύμανσης στις συγκεντρώσεις μαγνησίου, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 17.4 και 20.5 mg/L και με αντίστοιχη μέση τιμή 18.4 mg/L. Οι συγκεντρώσεις του Πηνειού δεν παρουσιάζουν κάποια εμφανή διαφοροποίηση από περίοδο σε περίοδο και κυμαίνονται όλες κοντά στο 22-25 mg/L, με εξαίρεση το Σεπτέμβριο του 2017 στην έξοδο του ποταμού από την υπολεκάνη, όπου οι συγκεντρώσεις Mg^{2+} ξεπερνούν τα 30 mg/L (Εικόνα 9.5). Στη περίπτωση του Πηνειού, η κύμανση με βάση τις παλαιότερες μετρήσεις στη θέση P_{gyr} δεν παρουσιάζει ουσιαστικές μεταβολές (από 20-22 mg/L το 1992, σε 22-24.7 το 2018), ενώ για τη θέση T_{out} του Τιταρήσιου η συγκέντρωση του μαγνησίου παρουσιάζει αυξητική μεταβολή από 13 mg/L το χειμώνα του 1992 σε 20.5 mg/L την άνοιξη του 2018.

Η πηγή προέλευσης των ιόντων Mg^{2+} στα επιφανειακά νερά είναι κυρίως η διάλυση μαγνησιούχων ορυκτών από τα περιβάλλοντα πετρώματα. Συγκεκριμένα για την περιοχή μελέτης, στα δυτικά περιθώρια, η κατά τόπους παρουσία των δολομιτιωμένων ασβεστόλιθων, αλλά και στα ανατολικά περιθώρια η ύπαρξη των μεταμορφωμένων σχηματισμών και οι πλούσιες σε μαγνησιούχα ορυκτά οφιολιθικές μάζες αποτελούν την πηγή των ιόντων Mg^{2+} , τόσο για τα επιφανειακά νερά όσο και για τα υπόγεια, όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 8.7.2.

Αμμωνιακά (NH_4^+)

Τα αμμωνιακά ιόντα για τον Πηνειό ποταμό κυμαίνονται από 0.02 έως 1.82 mg/L, με μέση τιμή τα 0.43 mg/L. Για τον Τιταρήσιο το εύρος κύμανσης των αμμωνιακών είναι 0.05 – 1.47 mg/L, με μέση τιμή τα 0.55 mg/L. Συνολικά 7 από 21 δείγματα των επιφανειακών υδάτων της περιοχής έρευνας παρουσιάζουν συγκέντρωση NH_4^+ μεγαλύτερη από 0.5 mg/L, που είναι το ανώτερο αποδεκτό όριο για την ποσιμότητα των υδάτων σύμφωνα με το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017 για την Ελλάδα. Οι υπερβάσεις αυτές των συγκεντρώσεων των NH_4^+ , δεν παρουσιάζουν κάποιο χρονικό ή χωρικό μοτίβο. Δεδομένου ότι τα αμμωνιακά ιόντα υποδηλώνουν ανθρωπογενή ρύπανση, αστικής, γεωργικής ή/και κτηνοτροφικής προέλευσης και το γεγονός ότι υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις, τόσο κατά την υγρή όσο και κατά την ξηρή περίοδο, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η επίδραση τόσο των αστικών λυμάτων, αμμωνιακών λιπασμάτων αλλά και των φορτίων από κτηνοτροφικές μονάδες, δρουν συνδυαστικά στην ρύπανση των επιφανειακών υδάτων της περιοχής. Τέλος, σε

σύγκριση με άλλα ποτάμια της ίδιας γεω-χημικής κλιματικής ζώνης (Skoulikidis et al. 2006), τα επιφανειακά ύδατα της περιοχής, παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές NH_4^+ .

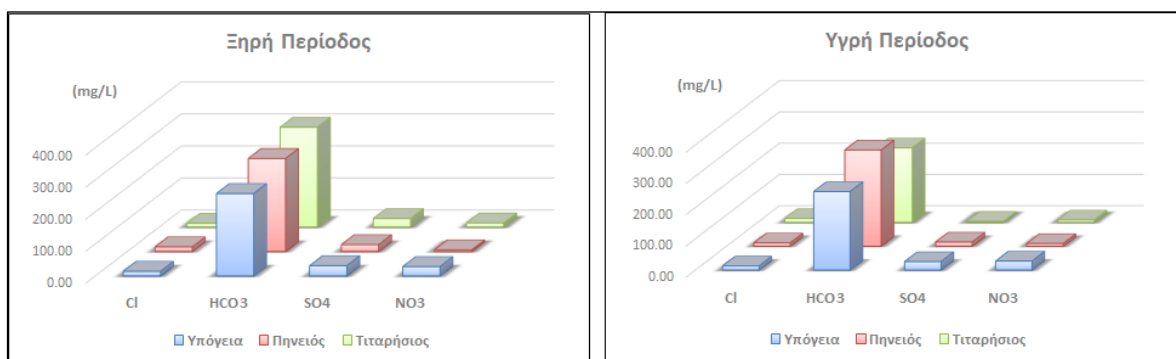


Εικόνα 9.5. Χωροχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των κατιόντων για τα επιφανειακά ύδατα της υπολεκάνης Τυρνάβου (Πηνειός και Τιταρήσιος).

Χλώριο (Cl⁻)

Τα ιόντα χλωρίου, στο τμήμα του Πηνειού εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου, κυμαίνονται από 9.7 έως 36.5 mg/L, με μέση τιμή τα 12.5 mg/L, για το χρονικό διάστημα Σεπτέμβριος 2016 - Απρίλιος 2018. Για το αντίστοιχο διάστημα στον Τιταρήσιο, η κύμανση των ιόντων Cl⁻ είναι 11.8 – 14.2 mg/L, με ίδια περίπου μέση τιμή (12.6 mg/L). Παρατηρώντας και το χάρτη της Εικόνας 9.6, όπου φαίνεται συγκεντρωτικά για τα ανιόντα η χωρική και χρονική τους μεταβολή, προκύπτει μια ομοιόμορφη εξέλιξη των συγκεντρώσεων Cl⁻, εκτός από το Σεπτέμβριο του 2017 στην έξοδο του Πηνειού ποταμού από την υπολεκάνη (P_{out}), όπου αυξάνεται απότομα λαμβάνοντας την υψηλότερη τιμή των 36.5 mg/L. Οι τιμές αυτές των συγκεντρώσεων Cl⁻ είναι αρκετά χαμηλές, λαμβάνοντας υπόψη και το όριο ποσιμότητας (250 mg/L) ωστόσο ακολουθούν τις αντίστοιχες χαμηλές συγκεντρώσεις των υπόγειων νερών της περιοχής (η υψηλότερη τιμή που μετρήθηκε εντός της υπολεκάνης ανέρχεται στα 48.1 mg/L) (Διάγραμμα 9.12). Οι αντίστοιχες τιμές των παλαιότερων μετρήσεων στις θέσεις P_{gyr} και T_{out} (Stamatis 1999), είναι ελαφρώς μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Για τον Πηνειό (P_{gyr}), η μέση τιμή το 1992 ήταν 21 mg/L έναντι των 11.23 mg/L για το διάστημα 2016-2018 και για τον Τιταρήσιο (T_{out}), η μέση τιμή το 1992 ήταν 23 mg/L έναντι των 13 mg/L για το διάστημα 2016-2018.

Τα ιόντα Cl⁻ αποτελούν και αυτά, όπως και τα ιόντα K⁺ και Na²⁺ που ήδη αναφέρθηκαν, δείκτη αστικής και γεωργικής ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων. Άλλη πηγή προέλευσης μπορεί να είναι η διάλυση ορυκτών που περιέχουν χλώριο, όπως ο αλίτης και ο καρναλίτης, καθώς και σε κάποια ιζηματογενή πετρώματα και κυρίως στους εβαπορίτες (Arello and Postma 2005). Φαινόμενα θαλάσσιας επίδρασης δεν έχουν εντοπιστεί στην περιοχή (μεγάλη απόσταση από τη θάλασσα) οπότε αποκλείεται ως πηγή προέλευσης των χλωριόντων.



Διάγραμμα 9.12. Σύγκριση των συγκεντρώσεων των ανιόντων υπόγειων και επιφανειακών υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου (μέσες τιμές).

Όξινα ανθρακικά (HCO₃⁻)

Τα όξινα ανθρακικά ιόντα κυμαίνονται μεταξύ 202.4 και 367.1 mg/L, στο τμήμα του Πηνειού εντός των ορίων της περιοχής έρευνας, για το χρονικό διάστημα 2016-2018. Για

τον Τιταρήσιο ποταμό το αντίστοιχο εύρος είναι 229.7 – 311.7 mg/L. Η μέση τιμή όλων των μετρήσεων για τον Πηνειό είναι 299 mg/L και για τον Τιταρήσιο 253.2 mg/L.

Συγκριτικά με τα υπόγεια νερά (Διάγραμμα 9.12), οι τιμές των HCO_3^- στα επιφανειακά είναι ελαφρώς μεγαλύτερες, εκτός από την υγρή περίοδο, όπου ο Τιταρήσιος εμφανίζει χαμηλή τιμή. Με βάση το χάρτη της Εικόνας 9.6, δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη συσχέτιση μεταξύ των μεγαλύτερων (ή των μικρότερων) τιμών με την ξηρή ή την υγρή περίοδο, καθώς ούτε και κάποια τακτική χωρική μεταβολή από τα ανάντη προς τα κατάντη. Με βάση τις παλαιότερες μετρήσεις (Stamatis 1999), ο Πηνειός παρουσιάζει μικρή άνοδο των συγκεντρώσεων στη θέση P_{gyr} το διάστημα 2016-2018, ενώ ο Τιταρήσιος μικρή πτώση στη θέση T_{out} σε σχέση με το 1992.

Τα όξινα ανθρακικά ιόντα έχουν ως κύρια πηγή προέλευσης, τόσο στα υπόγεια όσο και στα επιφανειακά ύδατα, τη διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων. Όπως και στην περίπτωση των υπόγειων, η παρουσία των Μέσο-Άνω Τριαδικών ασβεστόλιθων στα δυτικά περιθώρια της περιοχής, αποτελεί τη βασική πηγή των HCO_3^- . Άλλη πηγή προέλευσης μπορεί να είναι το διοξείδιο του άνθρακα του εδάφους, που παράγεται κατά την αποσύνθεση της οργανικής ύλης ή/και το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας.

Θειικά (SO_4^{-2})

Στο σύνολο των θέσεων επιφανειακής παρακολούθησης του Πηνειού ποταμού οι συγκεντρώσεις των θειικών ιόντων κυμαίνονται από 1.6 έως 59.9 mg/L, με μέση τιμή 17.4 mg/L, ενώ στις θέσεις του Τιταρήσιου η αντίστοιχη κύμανση είναι μικρότερη, μεταξύ 1.8 και 26.7 mg/L, με μέση τιμή 8.1 mg/L.

Με βάση και την Εικόνα 9.6 φαίνεται ότι τα SO_4^{-2} παρουσιάζουν, τουλάχιστον για τις περιόδους δειγματοληψίας Απριλίου 2017 και Σεπτεμβρίου 2017, μία αυξητική τάση από τον άνω προς τον κάτω ρου του ποταμού (από τη θέση P_{in} προς τη θέση P_{out}). Παρουσιάζουν επίσης και χρονική μεταβολή, καθώς οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αφορούσαν την ξηρή περίοδο, μετά το τέλος της αρδευτικής περιόδου. Για τον Τιταρήσιο ποταμό δεν εξάγεται κάποιο συμπέρασμα χωρικής μεταβολής, ίσως λόγω και των ελλιπών δεδομένων, ωστόσο η μεγαλύτερη συγκέντρωση των SO_4^{-2} εμφανίζεται και εδώ κατά την ξηρή περίοδο. Σε σχέση με τα υπόγεια ύδατα (Διάγραμμα 9.12) οι συγκεντρώσεις και των δύο ποταμών είναι μικρότερες και ιδιαίτερα αυτές του Τιταρήσιου. Με βάση και το ανώτατο όριο ποσιμότητας (250 mg/L), οι τιμές αυτές, τόσο των υπόγειων όσο και των επιφανειακών, θεωρούνται πολύ μικρές και σε καμία περίπτωση δεν το ξεπερνούν, εντός των ορίων της υπολεκάνης Τυρνάβου. Η σύγκριση τώρα των δύο κοινών θέσεων του δικτύου με τις θέσεις της παλαιότερης μελέτης (Stamatis 1999), δείχνει μικρότερες συγκεντρώσεις στη θέση P_{gyr} σήμερα έναντι του 1992 (1.62-24.8 mg/L έναντι 34-39 mg/L το 1992) και ακόμα μικρότερες στη θέση T_{out} (1.81-4.83 mg/L έναντι 12-27 mg/L το 1992).

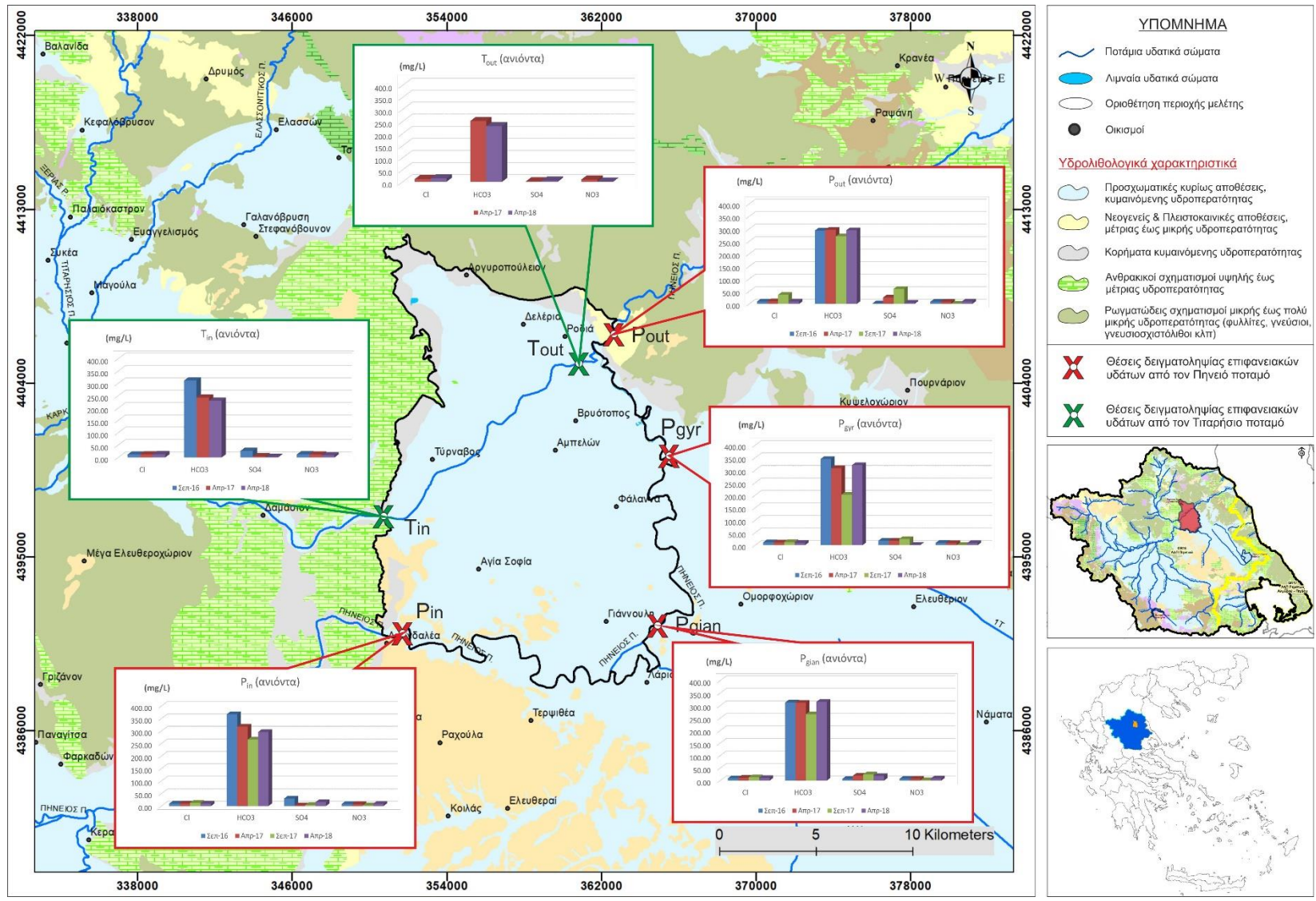
Τα θειικά ιόντα στα επιφανειακά ύδατα προέρχονται είτε από διάλυση εβαποριτικών αλάτων είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (έκλυση θειικών λιπασμάτων, βιομηχανικά-αστικά απόβλητα). Με βάση τις χαμηλές συγκεντρώσεις θεωρείται δύσκολο,

η πηγή προέλευσης των SO_4^{2-} εντός της περιοχής έρευνας, να είναι εβαπορίτες, ωστόσο θεωρείται δεδομένη η επίδραση της έκπλυσης των θειούχων αγροχημικών (Skoulikidis 1993, Χαμπίδη 2012) καθώς χρησιμοποιούνται εκτενώς στις υπάρχουσες αμπελοκαλλιέργειες. Το γεγονός αυτό ενισχύεται και από την εμφάνιση των μέγιστων συγκεντρώσεων, και για τα δύο ποτάμια, κατά την ξηρή περίοδο μετά δηλαδή από το τέλος της αρδευτικής περιόδου.

Νιτρικά (NO_3^-)

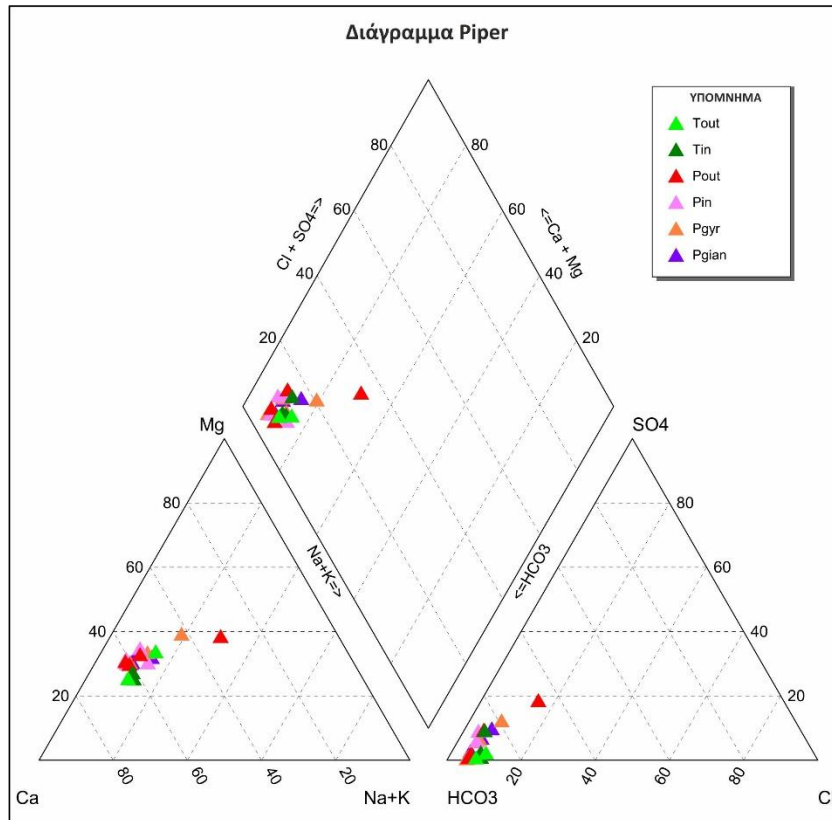
Η διακύμανση των νιτρικών ιόντων στον Πηγειό κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (2016-2018) είναι από 1.1 έως 9.8 mg/L, με μέση τιμή 6.9 mg/L. Στο αντίστοιχο διάστημα για τον Τιταρήσιο η διακύμανση των NO_3^- είναι από 1.2 έως 12.7 mg/L, με μέση τιμή 8.9 mg/L. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις και για τα δύο ποτάμια παρατηρούνται τον Σεπτέμβριο, ωστόσο λόγω και των μικρών γενικά συγκεντρώσεων, οι διαφορές τους με την υγρή περίοδο δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Σε αντίθεση με τα θειικά ιόντα, δεν παρουσιάζουν κάποια επαναλαμβανόμενη χωρική μεταβολή από τα ανάντη προς τα κατόντη, σε καμία εκ των τεσσάρων περιόδων δειγματοληψίας (Εικόνα 9.6). Οι τιμές τους, όπως ειπώθηκε, είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των υπόγειων υδάτων (Διάγραμμα 9.12) και ιδιαίτερα σε σύγκριση με τις υψηλότερες τιμές του, όπου στα υπόγεια φτάνουν και τα 145 mg/L. Έτσι, οι τιμές των επιφανειακών απέχουν κατά πολύ από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ποσιμότητας των 50 mg/L, με βάση το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017 για την Ελλάδα, σε αντίθεση με αρκετές θέσεις υπογείων όπου το νερό κρίνεται ακατάλληλο με βάση αυτή τη παράμετρο για τη συγκεκριμένη χρήση. Οι τιμές των συγκεντρώσεων των P_{gyr} και T_{out} είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του 1992 στις ανάλογες θέσεις (Stamatis 1999) αλλά κατά πολύ μεγαλύτερες από αντίστοιχες συγκεντρώσεις επιφανειακών υδάτων της ίδιας γεω-χημικής κλιματικής ζώνης (Skoulikidis 2006).

Τα NO_3^- αντανακλούν καθαρά ανθρωπογενή ρύπανση, κυρίως γεωργικής προέλευσης (εφαρμογή και έκπλυση αζωτούχων λιπασμάτων), όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα στην παράγραφο 12.4 αναφορικά με τις διάχυτες πηγές ρύπανσης. Ωστόσο, μπορεί να προέλθουν και από σημειακές πηγές ρύπανσης όπως είναι τα απόβλητα βιομηχανικών, κτηνοτροφικών μονάδων αλλά και αστικών λυμάτων. Στη περιοχή έρευνας η σειρά επίδρασης είναι η σειρά με την οποία αναφέρθηκαν οι πηγές προέλευσης, με τη γεωργία και τη χρήση των αζωτούχων λιπασμάτων να κυριαρχεί, καθώς πρόκειται για μια περιοχή έντονης αγροτικής δραστηριότητας.



Εικόνα 9.6. Χωροχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των ανιόντων για τα επιφανειακά ύδατα της υπολεκάνης Τυρνάβου (Πηνειός και Τιταρήσιος).

Με βάση το διάγραμμα Piper (Διάγραμμα 9.13) προκύπτει, ότι όλα τα επιφανειακά δείγματα, εκτός από το P_{out} της τρίτης περιόδου δειγματοληψίας (Σεπτέμβριος 2017), ανήκουν στην 1η ομάδα (βλ. παράγραφο 9.2) των φυσικών γαιοαλκαλικών – οξυανθρακικών νερών με υδροχημικό τύπο Ca-Mg-HCO₃. Στην ίδια ομάδα ανήκει και η συντριπτική πλειοψηφία των υπόγειων υδάτων, όπως ειπώθηκε στην αντίστοιχη παράγραφο (9.2). Το δείγμα P_{out} της τρίτης περιόδου ανήκει στην 4η ομάδα, με βάση το διαχωρισμό κατά Piper, την οποία χαρακτηρίζουν γαιοαλκαλικά – οξυανθρακικά νερά με υψηλό ποσοστό αλκαλίων και έχει υδροχημικό τύπο Mg-Ca-Na-HCO₃.



Διάγραμμα 9.13. Διάγραμμα Piper των επιφανειακών δειγμάτων όλων των περιόδων δειγματοληψίας για την υπολεκάνη Τυρνάβου

9.3.3 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Σε ένα υδάτινο περιβάλλον τα βαρέα μέταλλα, απαντώνται κυρίως σε στερεά φάση. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών αποτίθεται ως στερεό ίζημα στον πυθμένα και ένα μικρό μόνο μέρος παραμένει στο διάλυμα. Αυτό συμβαίνει γιατί στις συνήθεις τιμές του pH, από το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η διαλυτότητά τους, τα βαρέα μέταλλα παρουσιάζουν την ελάχιστη διαλυτότητα. Η θερμοκρασία, το δυναμικό οξειδοαναγωγής καθώς και η ροή του νερού είναι επίσης παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν τη διαλυτότητα των βαρέων μετάλλων σε ένα υδατικό περιβάλλον (Iwashita & Shimamura 2003).

Οι χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα αφορούσαν στη συγκέντρωση των διαλυμένων ποσοτήτων των βαρέων μετάλλων. Από τα ιχνοστοιχεία αυτά, αναλύονται στη συνέχεια ο χαλκός (Cu), ο σίδηρος (Fe) και το μαγγάνιο (Mn), καθώς παρουσιάζουν συγκεντρώσεις και εύρος κύμανσης, που μπορούν να σχολιαστούν. Οι συγκεντρώσεις αυτές για την περιοχή έρευνας μπορούν να συσχετισθούν κατά περίπτωση είτε με φυσικές διεργασίες, είτε με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως τα επεξεργασμένα απόβλητα βιομηχανικών μονάδων επεξεργασίας και η χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων στις καλλιέργειες.

Χαλκός (Cu)

Για τον Πηνειό ποταμό το εύρος κύμανσης του Cu είναι από 0.1 έως 2.9 μg/L, με μέση τιμή τα 1.3 μg/L, κατά το χρονικό διάστημα από Σεπτέμβριο του 2016 έως τον Απρίλιο του 2018. Για τον Τιταρήσιο το εύρος κύμανσης είναι μεγαλύτερο, μεταξύ 0.4 και 10.6 μg/L, κατά το ίδιο χρονικό διάστημα, με μέση τιμή τα 2.9 μg/L. Η μέθοδος μέτρησης με την οποία μετρήθηκαν τα βαρέα μέταλλα (μέθοδος φούρνου γραφίτη με φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης), έχουν ένα ελάχιστο όριο ποσοτικοποίησης για κάθε στοιχείο, κάτω από το οποίο η μέτρηση δεν είναι ακριβής. Για το Cu το όριο αυτό είναι 10 μg/L. Ωστόσο, για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας δεν θεωρείται μεγάλης σημασίας μια μικρή απόκλιση στη τιμή των βαρέων μετάλλων της τάξης αυτής και ειδικά για το Cu όπου το όριο ποσοιμότητας είναι 2000 μg/L (ΦΕΚ 3282B/19-9-2017). Σύμφωνα με παλαιότερη μελέτη (Karamanis et al. 2008), η μέση τιμή των συγκεντρώσεων χαλκού για τον Πηνειό ποταμό (σε τρία αντιπροσωπευτικά σημεία του άνω, μέσου και κάτω ρου του ποταμού) ήταν 3.7 μg/L για την περίοδο μετρήσεων από το Μάιο του 2004 έως και το Μάιο του 2006. Από το Διάγραμμα 9.14 προκύπτει ότι η μέση συγκέντρωση του Cu στα υπόγεια νερά είναι μεγαλύτερη έναντι των επιφανειακών για την ξηρή περίοδο, ενώ για την υγρή η συγκέντρωση του Τιταρήσιου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή των υπογείων.

Γενικότερα, οι πηγές προέλευσης του Cu μπορεί να είναι είτε κάποια χαλκούχα λιπάσματα ή φυτοπροστατευτικά σκευάσματα (ανθρωπογενής πηγή προέλευσης) είτε η διάβρωση γειτονικών οφιολιθικών πετρωμάτων ή/και σχιστολίθων. Στην περίπτωση της διάβρωσης γειτονικών πετρωμάτων που περιέχουν Cu, συνήθως οι συγκεντρώσεις είναι πολύ μεγαλύτερες αυτών που εμφανίζονται στα επιφανειακά ύδατα της περιοχής. Για το λόγο αυτό εκτιμάται ότι η πιθανότερη πηγή για την περιοχή είναι η χρήση χαλκούχων σκευασμάτων και η έκπλυσή τους στα δύο ποτάμια.



Διάγραμμα 9.14. Σύγκριση των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων (Cu, Fe, Mn) υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, για την υπολεκάνη Τυρνάβου (μέσες τιμές).

Σίδηρος (ολικός) (Fe)

Η συγκέντρωση του Fe στον Πηνεϊό ποταμό κυμαίνεται από 5.2 έως 97.4 µg/L, εντός της περιοχής έρευνας, με μέση τιμή τα 32.2 µg/L. Αντίστοιχα στον Τιταρήσιο η κύμανση είναι μικρότερη, μεταξύ 8.2 και 44.3 µg/L, με μέση τιμή τα 26.5 µg/L. Και στην περίπτωση του Fe το ελάχιστο όριο ποσοτικοποίησης, πάνω από το οποίο οι μετρήσεις θεωρούνται ακριβείς, είναι τα 10 µg/L ενώ το όριο ποσιμότητας, που θεσπίστηκε για την Ελλάδα (ΦΕΚ 3282B/19-9-2017) είναι τα 200 µg/L. Σε προηγούμενη μελέτη (Lekkas et al. 2004) η τιμή για τον Πηνεϊό ποταμό ξεπερνούσε τα 200 µg/L, ενώ τιμή παρόμοια με τη μέση τιμή (32.2 µg/L) της περιοχής έρευνας παρουσίαζε ο ποταμός Ασωπός, σύμφωνα πάντα με την ίδια μελέτη.

Από την Εικόνα 9.7, η οποία παρουσιάζει την χρονική και χωρική μεταβολή των Cu, Fe, Mn, στις θέσεις επιφανειακών μετρήσεων, φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σιδήρου εμφανίζονται, κατά κύριο λόγο, την ξηρή περίοδο έναντι της υγρής, ενώ δεν παρατηρείται κάποια χωρική συσχέτιση από θέση σε θέση. Επίσης, από το Διάγραμμα 9.14 προκύπτει ότι για την ξηρή περίοδο οι συγκεντρώσεις Fe είναι μεγαλύτερες στα επιφανειακά έναντι των υπόγειων υδάτων, ενώ για την υγρή περίοδο, η πτώση των συγκεντρώσεων των επιφανειακών, όπως αναφέρθηκε, έχει ως αποτέλεσμα οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις να κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα.

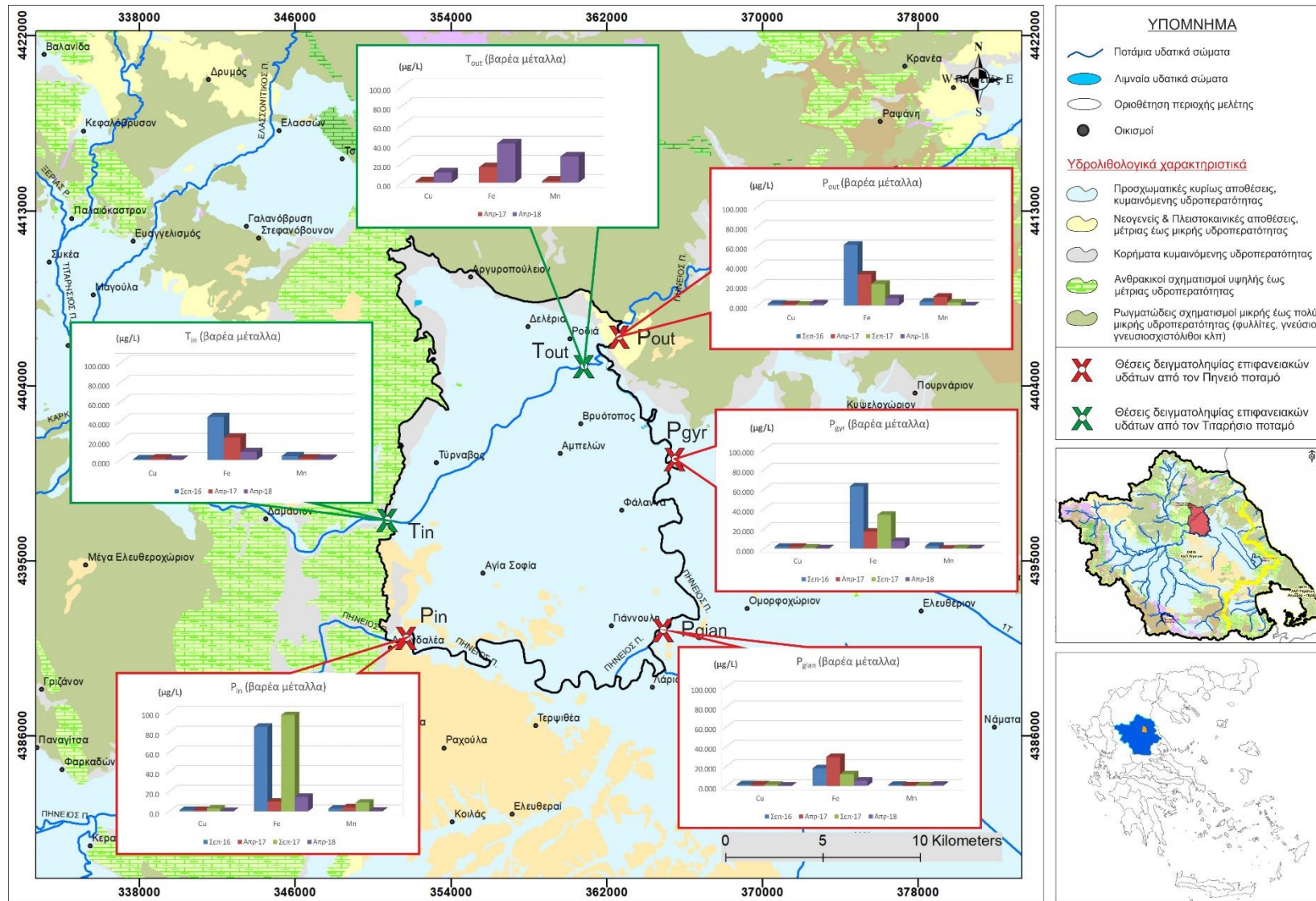
Αναφορικά με τις πηγές προέλευσης του Fe στα επιφανειακά νερά, αυτές μπορεί να είναι είτε κάποια αργιλικά ιζήματα στις κοίτες των ποταμών, είτε η αποσάθρωση γειτονικών υπερβασικών πετρωμάτων καθώς και η παρουσία οργανικής ύλης.

Μαγγάνιο (Mn)

Το μαγγάνιο στα επιφανειακά νερά της περιοχής έρευνας κυμαίνεται από 0-9 µg/L για τον Πηνεϊό και από 1.3-27.3 µg/L για τον Τιταρήσιο. Οι μέσες τιμές είναι 2.5 και 7.3 µg/L αντίστοιχα. Το όριο ποσοτικοποίησης των μετρήσεων μαγγανίου είναι 6.52 µg/L (φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης / μέθοδος φούρνου γραφίτη). Το ανώτατο όριο ποσιμότητας για την Ελλάδα καθορίζεται στα 50 µg/L (ΦΕΚ 3282B/19-9-2017). Σύμφωνα με παλαιότερη μελέτη (Karamanis et al. 2008), η μέση τιμή των συγκεντρώσεων μαγγανίου για τον Πηνεϊό ποταμό (σε τρία αντιπροσωπευτικά σημεία του άνω, μέσου και

κάτω ρου του ποταμού) ήταν 4μg/L για την περίοδο μετρήσεων από το Μάιο του 2004 έως και το Μάιο του 2006.

Από το Διάγραμμα 9.14 προκύπτει ότι οι μέσες συγκεντρώσεις Mn των υπογείων υδάτων είναι μεγαλύτερες έναντι αυτών των επιφανειακών τόσο για την ξηρή όσο και την υγρή περίοδο. Από την Εικόνα 9.7 το συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Mn, τόσο στον Πηνειό όσο και στον Τιταρήσιο, εμφανίζονται κατά την έξοδο τους από την υπολεκάνη στη περιοχή τις Ροδιάς. Με βάση και τα όσα ειπώθηκαν για το Mn στα υπόγεια νερά για τη χωρική του κατανομή (Εικόνα 8.24), προκύπτει ότι η περιοχή αυτή στην έξοδο των ποταμών από την υπολεκάνη, ανήκει στη ζώνη των υψηλών συγκεντρώσεων Mn για τα υπόγεια. Στη περίπτωση των υπόγειων βέβαια, υπήρχαν κάποιες συγκεντρώσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές των επιφανειακών, ωστόσο η πιθανή πηγή προέλευσης πρέπει να είναι η παρουσία των υπερβασικών πετρωμάτων στην ανατολική επέκταση της υπολεκάνης Τυρνάβου. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Καλλέργη (2000), υψηλές συγκεντρώσεις που έχουν κατά τόπους ανιχνευθεί στα υπόγεια και επιφανειακά νερά σχετίζονται και με ανθρώπινες δραστηριότητες. Στις δραστηριότητες αυτές εντάσσονται τόσο η εφαρμογή φωσφορικών λιπασμάτων όσο και τα λύματα που προέρχονται από μεταλλουργίες, χρώματα και γενικότερα αστικά λύματα (Siegel 2002). Σύμφωνα με τη Μελέτη Διαχείρισης Υδατικών Πόρων ΥΔ Θεσσαλίας (Καραβοκύρης κ.α. 2014), στην περιοχή έρευνας λειτουργούν δύο κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ), όπως θα ειπωθεί και στο 11^ο Κεφάλαιο, γεγονός που μπορεί να δικαιολογήσει την εμφάνιση των συγκεντρώσεων μαγγανίου στα επιφανειακά νερά της περιοχής.

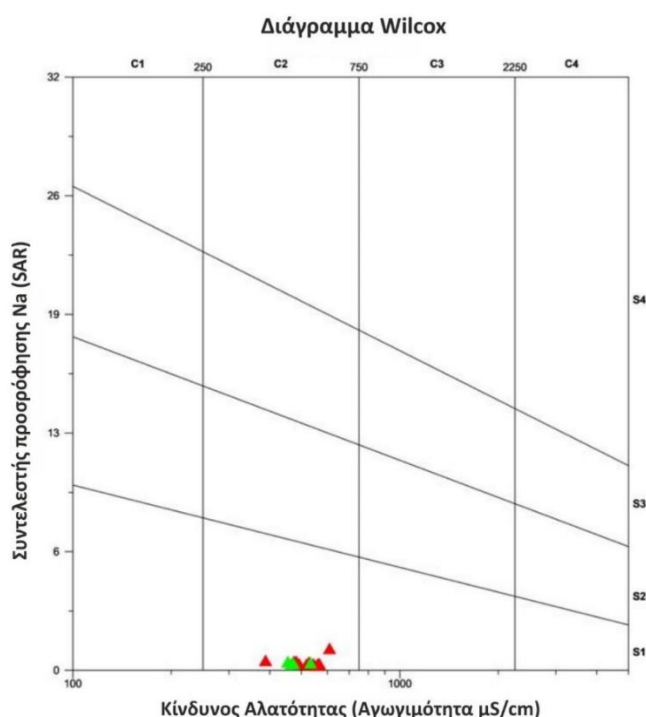


Εικόνα 9.7. Χωροχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των ανιόντων για τα επιφανειακά ύδατα της υπολεκάνης Τυρνάβου (Πηνειός και Τιταρήσιος).

9.3.4 ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ

Η έντονη γεωργική δραστηριότητα στην περιοχή έρευνας απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού άρδευσης, το οποίο προέρχεται κατά κύριο λόγο από τους υδροφόρους, όπως μαρτυρά και η ύπαρξη πολυάριθμων γεωτρήσεων στην περιοχή. Ωστόσο, κατά την περίοδο του καλοκαιριού, η χρήση των επιφανειακών υδάτων κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να καλυφθεί η αυξημένη ζήτηση νερού άρδευσης. Λόγω των συνεπειών που μπορεί να έχει η ποιότητα του αρδευτικού νερού και ιδιαίτερα η περιεκτικότητα σε νάτριο στα εδάφη και τις καλλιέργειες, ο λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR) υπολογίστηκε και στη περίπτωση αυτή των επιφανειακών υδάτων, όπως έγινε και για τα υπόγεια νερά. Ο συντελεστής SAR αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη ποιότητας, ωστόσο, όπως ειπώθηκε και για τα υπόγεια νερά, από μόνος του δεν χρήζει αυτομάτως ένα συγκεκριμένο νερό κατάλληλο για άρδευση, απαλλαγμένο από οποιουδήποτε άλλους περιορισμούς. Πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες, βασικότεροι από τους οποίους είναι το είδος της αρδευόμενης καλλιέργειας και ο τύπος του καλλιεργούμενου εδάφους.

Από την προβολή των δειγμάτων του Πηνειού και του Τιταρήσιου στο διάγραμμα Wilcox (Διάγραμμα 9.15) προκύπτει ότι όλα τα επιφανειακά αυτά δείγματα ανήκουν στην κατηγορία C2-S1. Η συγκεκριμένη κατηγορία αντιπροσωπεύει νερά χαμηλού κινδύνου αλκαλίωσης και μέσου κινδύνου αλατότητας.



Διάγραμμα 9.15. Κατάταξη επιφανειακών υδάτων Πηνειού (κόκκινα τρίγωνα) και Τιταρήσιου (πράσινα τρίγωνα) κατά Wilcox (1955).

10 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

10.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μετά την παράθεση και ταξινόμηση των αποτελεσμάτων των υδροχημικών δεδομένων, σημαντικό εργαλείο για την περαιτέρω ανάλυσή τους αποτελούν οι διάφορες στατιστικές μέθοδοι, οι οποίες έχουν το πλεονέκτημα να επιτρέπουν την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, με σκοπό την κατανόηση και τη σύγκριση διάφορων υδρογεωχημικών διεργασιών. Η στατιστική ανάλυση διαχρονικά έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών σε διάφορα πεδία επιστημών. Έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές (Παπαθεοδώρου και Φερεντίνος 1993, Jayakumar and Siraz 1996, Morell et al. 1996, Ceron et al. 2000, Voudouris et al. 2000, Reghunath et al. 2002, Panagoroulos et al. 2016) με ικανοποιητικά αποτελέσματα δίνοντας λύση στο πρόβλημα της διαχείρισης και της επεξεργασίας μεγάλου αριθμού μετρήσεων και δεδομένων.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά απλές στατιστικές μέθοδοι (βασικά περιγραφικά στατιστικά, ανάλυση συσχέτισης) και ακολούθως πιο σύνθετες (ανάλυση κύριων συνιστωσών, ανάλυση συστάδων, βηματική ανάλυση διακριτών βαθμίδων), έτσι ώστε να είναι πιο ολοκληρωμένη η στατιστική επεξεργασία των υδροχημικών δεδομένων. Κατά το παρελθόν, οι συγκεκριμένες στατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν σε παρόμοιες μελέτες, με ιδιαίτερα ενδιαφέροντα αποτελέσματα (Stamatis & Voudouris 2003, Πισινάρας 2008, Matiatos & Lappas 2013, Galazoulas et al. 2014, Elzamy et al. 2015, Liu et al. 2021).

10.2 ΒΑΣΙΚΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ

Με σκοπό τη διερεύνηση των υδροχημικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή έρευνας, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από τις χημικές αναλύσεις των δειγμάτων νερού που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των τεσσάρων περιόδων δειγματοληψίας (Σεπτέμβριος 2016 - Απρίλιος 2017 - Σεπτέμβριος 2017 - Απρίλιος 2018).

Η απλή αριθμητική αναφορά ενός πληθυσμού, όπως είναι η συγκέντρωση ενός εκ των παραμέτρων ενός δείγματος νερού, είναι μια ελλιπής πληροφορία και πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα στις μετέπειτα στατιστικές επεξεργασίες. Ο προσδιορισμός των βασικών περιγραφικών παραμέτρων ενός πληθυσμού, όπως το εύρος κύμανσης των τιμών, η διασπορά αυτών κ.ά., αποδίδουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της κατανομής του πληθυσμού, με αποτέλεσμα να εξάγονται χρήσιμες πληροφορίες για τον τρόπο που αυτός προέκυψε (Reimann and Filzmoser 1999).

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Minitab 15 Statistical Software, για το υπολογισμό των βασικών περιγραφικών στατιστικών. Συμπεριελήφθησαν όλα τα δείγματα των υπόγειων υδάτων που συλλέχθηκαν εντός της

υπολεκάνης Τυρνάβου. Δεδομένου ότι οι χρονικές διακυμάνσεις όλων των παραμέτρων των δειγμάτων, δεν παρουσιάζουν αξιόλογες μεταβολές από περίοδο σε περίοδο, θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές για κάθε μία από τις παραμέτρους που αναλύθηκαν. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό των περιγραφικών τους στατιστικών, είναι αυτές που εμφάνιζαν αξιοσημείωτο εύρος τιμών μεταξύ των δειγμάτων.

Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Κύρια ιόντα: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^-
- Ιχνοστοιχεία: Cu, Fe, Mn, Pb
- Φυσικοχημικές παράμετροι: pH, EC, TDS

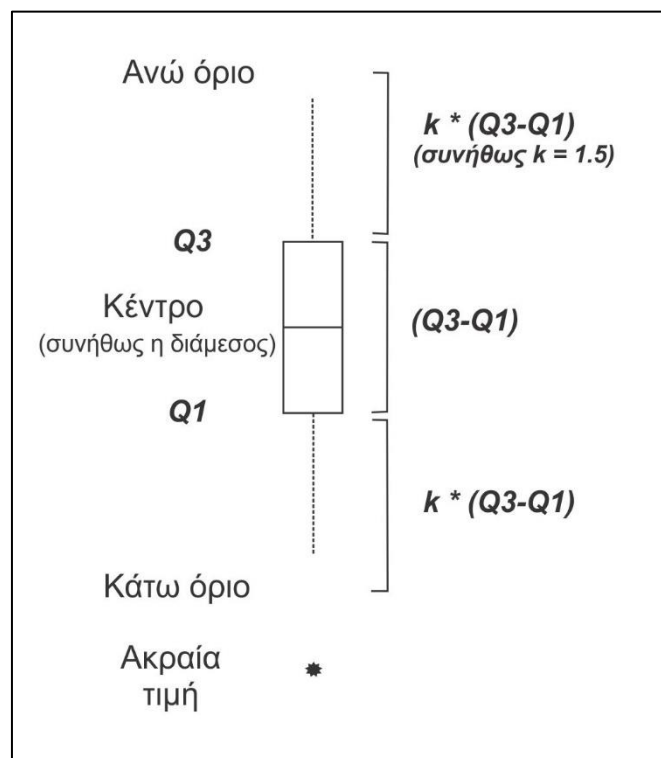
Οι βασικοί περιγραφικοί στατιστικοί δείκτες που υπολογίστηκαν για τις παραπάνω παραμέτρους αναλύονται στον Πίνακα 10.1 που ακολουθεί και στη συνέχεια αναφέρονται και τα στατιστικά διαγράμματα και η χωρική κατανομή για κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές.

Πίνακας 10.1. Βασικοί περιγραφικοί στατιστικοί δείκτες των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων.

A-squared (A²) – P-value (P)	Παράμετροι επιβεβαίωσης ή μη μιας κανονικής κατανομής σύμφωνα με τη μέθοδο Anderson-Darling. Συνήθως, εάν $P < 0.05$ η μηδενική υπόθεση της κανονικής κατανομής απορρίπτεται (Reinmann and Filzmoser 1999).
Mean (αριθμητικός μέσος)	Αποδίδει την αριθμητική μέση τιμή ενός συνόλου τιμών δεδομένων.
Standard deviation (τυπική απόκλιση)	Χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το μέτρο της διασποράς ενός συνόλου τιμών δεδομένων γύρω από τον μέσο όρο.
Variance (διακύμανση)	Αποδίδει το μέτρο της διασποράς ενός συνόλου τιμών γύρω από τον αριθμητικό μέσο.
Skewness (ασυμμετρία)	Αποτελεί μέτρο του βαθμού απόκλισης από την συμμετρική καμπύλη μιας κανονικής κατανομής (Skewness=0).
Kurtosis (κύρτωση)	Αποτελεί μέτρο του βαθμού απόκλισης από την κύρτωση που παρουσιάζει η καμπύλη μιας κανονικής κατανομής (Kurtosis=0).
N (πλήθος)	Είναι ο αριθμός που εκφράζει το σύνολο των τιμών μιας μεταβλητής.
Minimum (ελάχιστο)	Είναι η ελάχιστη τιμή από το σύνολο τιμών της μεταβλητής.
1st Quartile Q1 (1ο τεταρτημόριο)	Αποτελεί το όριο (τιμή) κάτω από το οποίο βρίσκεται το 25% των τιμών της παραμέτρου.
Median (διάμεσος)	Αποτελεί το όριο (τιμή) πάνω και κάτω από την οποία βρίσκεται το 50% των τιμών της παραμέτρου. Μπορεί να αποτελέσει δείκτη της αντιπροσωπευτικής τιμής των συγκεντρώσεων της παραμέτρου για την περιοχή έρευνας.
3rd Quartile Q3 (3ο τεταρτημόριο)	Αποτελεί το όριο (τιμή) κάτω από το οποίο βρίσκεται το 75% των τιμών της παραμέτρου.

Maximum (μέγιστο)	Είναι η μέγιστη τιμή από το σύνολο τιμών της μεταβλητής.
95% Confidence interval (95% διάστημα εμπιστοσύνης)	Αποτελεί το σημείο που οριοθετεί το διάστημα του συνόλου των τιμών (95%) που θεωρούνται φυσιολογικές. Αποτελεί μέτρο εκτίμησης των ακραίων τιμών (>95%), τιμών δηλαδή που ξεφεύγουν από τις φυσιολογικές και δικαιολογούν την ύπαρξη κάποιας διεργασίας. Έχει αποδειχθεί ότι στην περίπτωση συμμετρικών κατανομών, το 95% των τιμών βρίσκονται μεταξύ $b-2S$ και $b+2S$, όπου b η τιμή της διαμέσου και S η τυπική απόκλιση.

- Histogram – Ιστόγραμμα των τιμών της μεταβλητής με αποτυπωμένη την καμπύλη της κανονικής κατανομής
- Boxplot (Θηκόγραμμα) – Διάγραμμα με τη μορφή παραλληλόγραμμου, στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές του 3^{ου} και 4^{ου} τεταρτημόριου (πλευρές του παραλληλογράμμου), ο μέσος (κάθετη γραμμή εντός αυτού) και οι ακραίες τιμές max-min, ως αστερίσκοι. Για τον χαρακτηρισμό μιας τιμής ως ακραίας πρέπει αυτή να απέχει περισσότερο από $k*(Q3-Q1)$ (όπου $k=1.5$ συνήθως (Frigge et al. 1989) είτε κάτω από το Q1 είτε πάνω από το Q3 (Εικόνα 10.1).



Εικόνα 10.1. Τυπικό θηκόγραμμα (Frigge et al. 1989).

- 95% Confidence Intervals for mean and median – διάγραμμα που απεικονίζει το διάστημα εμπιστοσύνης (95%) για το μέσο και το διάμεσο

- Probability plot (Normal 95% - CI) – Διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας σε λογαριθμική κλίμακα, με την προσθήκη των διαστημάτων εμπιστοσύνης (95%).

Για κάθε αναλυόμενη παράμετρο εξήχθησαν χάρτες χωρικής κατανομής των τιμών τους, όπως αυτές προέκυψαν από τις μετρήσεις και αναλύσεις των τεσσάρων περιόδων δειγματοληψίας. Οι χάρτες αυτοί δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφορικής (ArcGIS 10.6.1), λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες τιμές των τεσσάρων περιόδων καθώς, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, δεν υπήρχαν σημαντικές μεταβολές στα αποτελέσματα από περίοδο σε περίοδο. Κάθε χάρτης χωρικής κατανομής, επισυνάπτεται και αναλύεται στο τέλος κάθε παραγράφου, στην οποία αναφέρεται η αντίστοιχη παράμετρος.

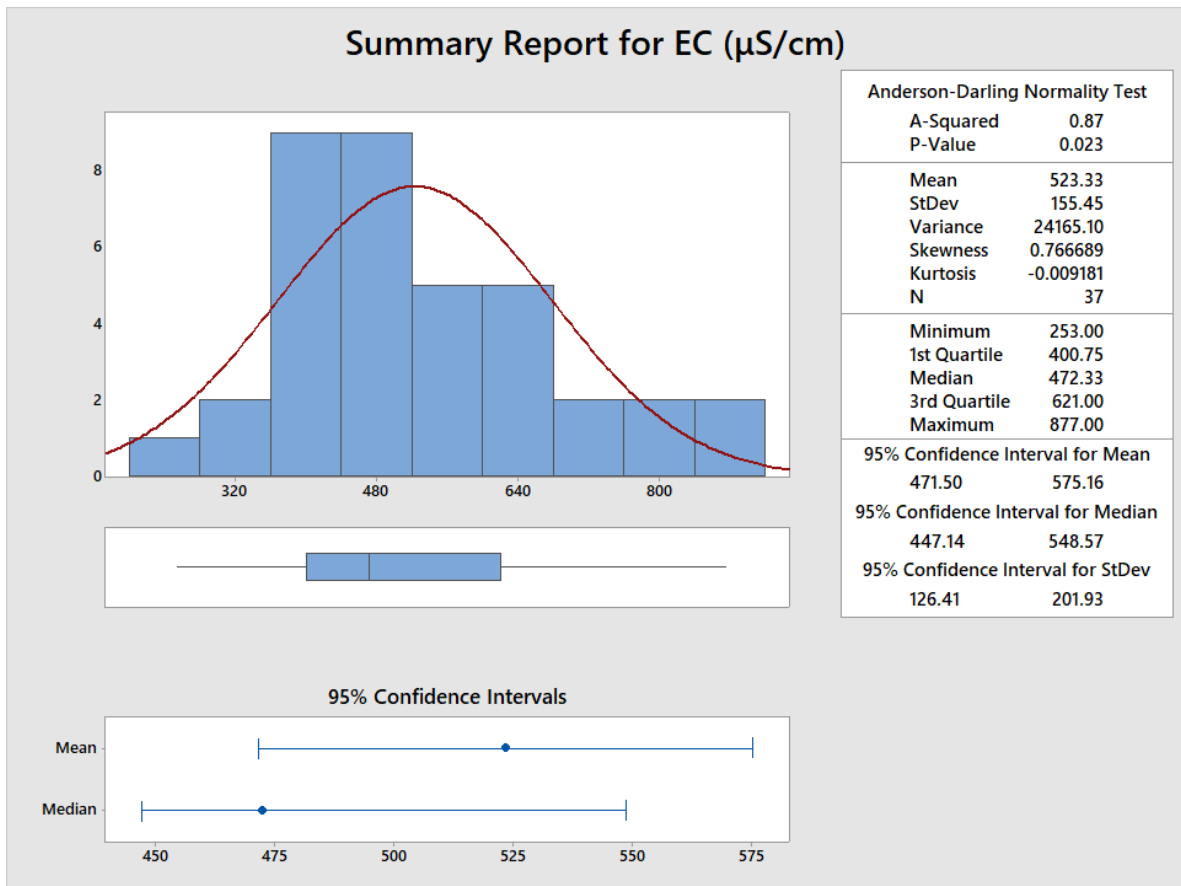
10.2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (EC)

Όπως φαίνεται από το ιστόγραμμα του Διαγράμματος 10.1 η μορφή της κατανομής του πληθυσμού (εργαστηριακές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας) είναι πολύ κοντά στην κανονική. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) η τιμή της P-value είναι ίση με 0.023

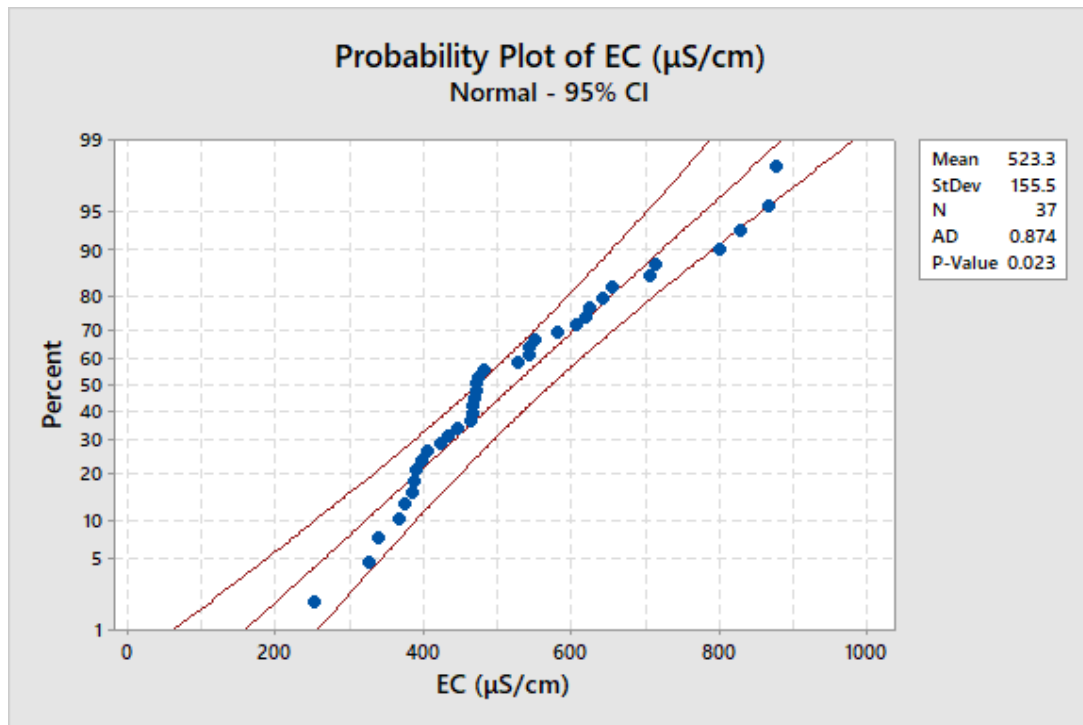
β) ασυμμετρία (Skewness): κοντά στο μηδέν, οπότε δεν υπάρχει ουσιαστική ασυμμετρία κατανομής προς κάποιον από τους δύο κλάδους

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ κοντά στο μηδέν, οπότε η κυρτότητα της καμπύλης προσομοιάζει με την κυρτότητα της καμπύλης της κανονικής κατανομής.



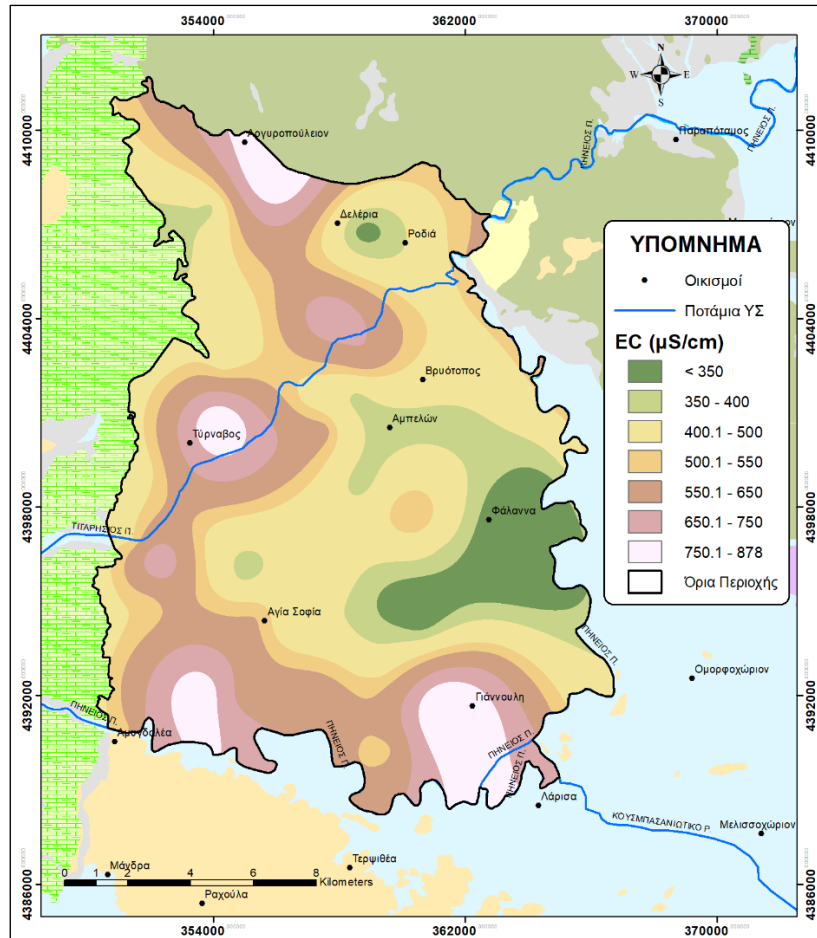
Διάγραμμα 10.1. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμο τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για την EC.

Από το ίδιο Διάγραμμα 10.1 φαίνεται ότι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι τιμές της EC είναι 877 $\mu\text{S/cm}$ και 253 $\mu\text{S/cm}$ αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 472.33 $\mu\text{S/cm}$. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 783.19 $\mu\text{S/cm}$ και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις LB260 (877 $\mu\text{S/cm}$), Γ3 (865.5 $\mu\text{S/cm}$), ΕΛ55 (828.75 $\mu\text{S/cm}$) και Λ43 (800 $\mu\text{S/cm}$), ενώ το κάτω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b-2S$) είναι 161.43 $\mu\text{S/cm}$ κάτω από το οποίο δεν βρίσκεται καμία τιμή. Στο θηκόγραμμα όλες οι παραπάνω τιμές δειγμάτων νερού των γεωτρήσεων, που ξεπερνούν το κατώφλι $b+2S$, θεωρούνται φυσιολογικές και δεν αποτυπώνονται ως ακραίες, καθώς δεν ξεπερνούν το $1.5 \cdot (Q3-Q1)$ πάνω από την τιμή $Q3$. Στο Διάγραμμα 10.2 απεικονίζεται η αθροιστική συχνότητα των τιμών της EC, σε λογαριθμική κλίμακα, βάσει του οποίου φαίνεται ότι τα δεδομένα αποτελούν ένα σύνθετο πληθυσμό καθώς διακρίνονται περισσότερες από μία ομάδες. Στο άνω άκρο του πληθυσμού βρίσκονται οι τιμές που υπερβαίνουν τα φυσιολογικά για την περιοχή όρια χωρίς όμως θα θεωρούνται ακραίες.



Διάγραμμα 10.2. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις EC. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης.

Η χωρική κατανομή των εργαστηριακών τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Εικόνα 10.2) είναι αντίστοιχη της κατανομής που προέκυψε από τα αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων, τα οποία παρουσιάστηκαν στη Παράγραφο 8.4.3. Λαμβάνοντας υπόψη και τη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 8.7.8, φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση των δύο αυτών παραμέτρων, καθώς οι θέσεις των μέγιστων τιμών της αγωγιμότητας ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις αντίστοιχες θέσεις μέγιστων συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων. Οι περιοχές αυτές είναι (α) τα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης κατά μήκος άξονα Β-Ν και (β) το ΝΑ τμήμα της υπολεκάνης.



Εικόνα 10.2. Χωρική κατανομή εργαστηριακών τιμών EC ($\mu\text{S/cm}$) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

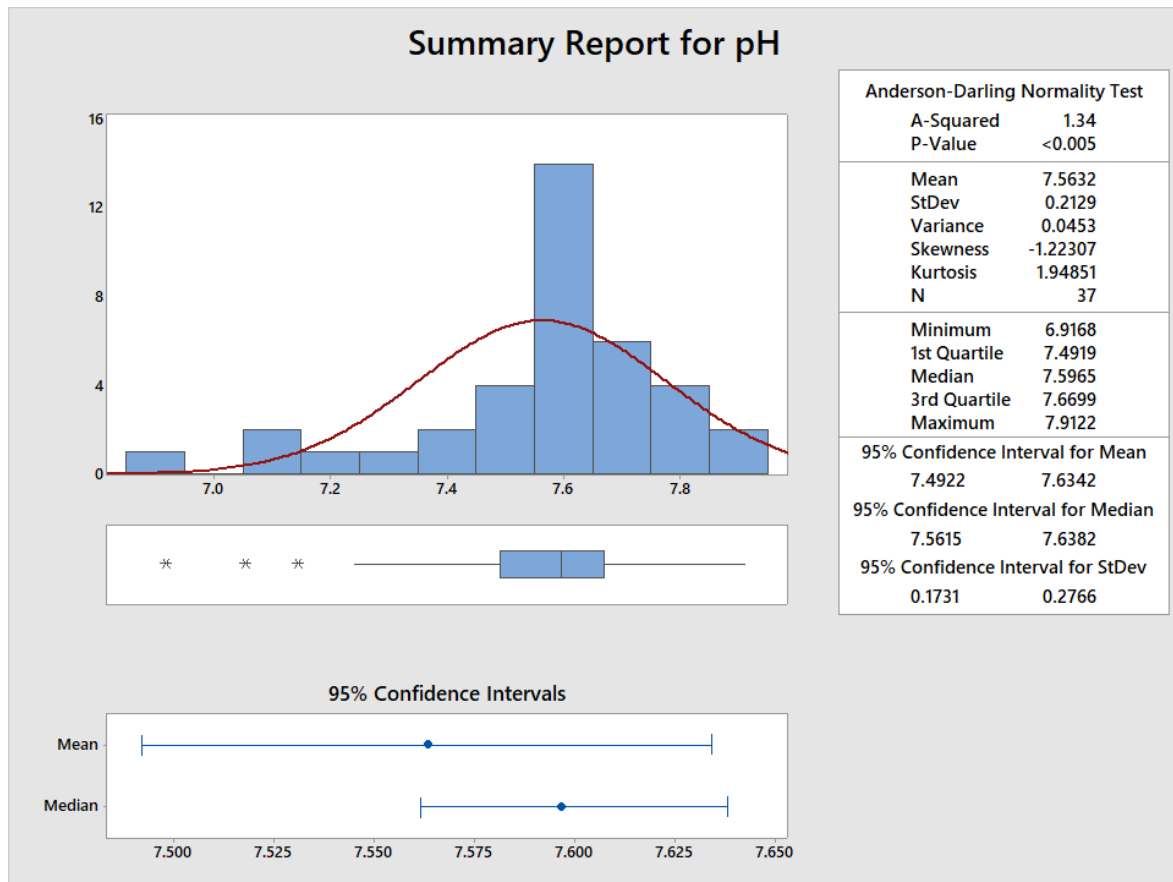
10.2.2 ΕΝΕΡΓΟΣ ΟΞΕΥΤΗΤΑ (pH)

Από το Διάγραμμα 10.3 φαίνεται ότι η κατανομή του πληθυσμού (εργαστηριακές τιμές pH) δεν χαρακτηρίζεται από κανονική κατανομή. Αυτό προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

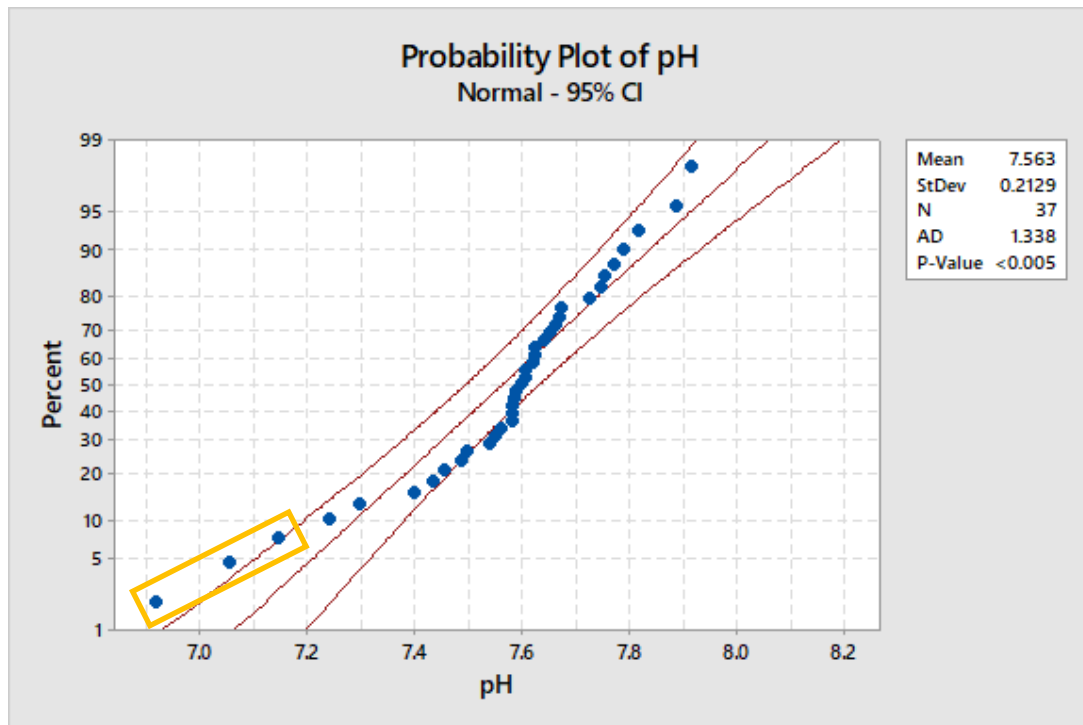
β) ασυμμετρία (Skewness): μικρότερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς τον αριστερό της κλάδο

γ) κύρτωση (Kurtosis): μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.



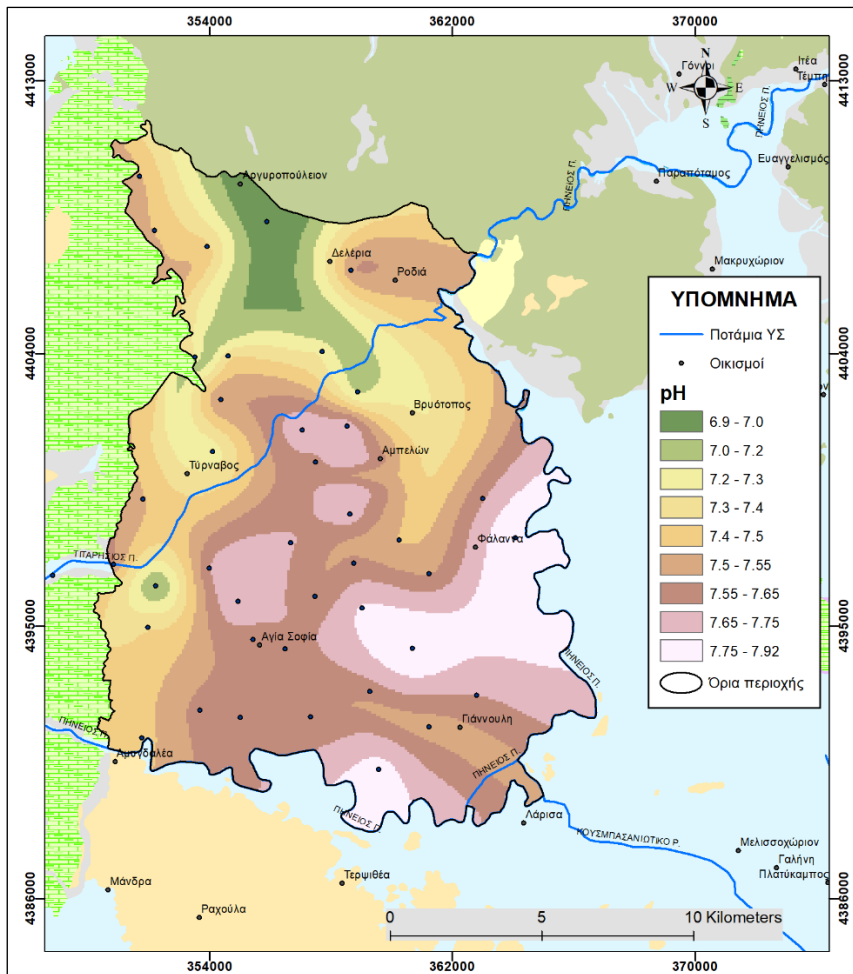
Διάγραμμα 10.3. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμο τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το pH.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι τιμές του pH, όπως αυτές προκύπτουν από το Διάγραμμα 10.3, είναι 7.91 και 6.92 αντίστοιχα ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 7.60. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 8.02 και δεν το ξεπερνά κανένα από τα δείγματα, ενώ το κάτω όριο φυσιολογικών τιμών ($b-2S$) είναι 7.17 κάτω από το οποίο βρίσκονται οι τιμές των δειγμάτων νερού των γεωτρήσεων AD2 (7.14), Λ76 (7.05) και Γ3 (6.92). Οι απόμακρες αυτές τιμές αποτυπώνονται στο ενσωματωμένο θηκόγραμμα του Διαγράμματος 10.3 με τη μορφή αστερίσκων και στη χωρική κατανομή των τιμών του pH (Εικόνα 10.3) με πράσινο χρώμα. Από το διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας (Διάγραμμα 10.4) παρατηρείται ότι τα δεδομένα αποτελούνται από ένα σύνθετο πληθυσμό, καθώς διακρίνονται περισσότερες από μια ομάδες. Εντός του πορτοκαλί πλαισίου διακρίνονται οι απόμακρες τιμές που αντιστοιχούν στις γεωτρήσεις AD2, Λ76 και Γ3.



Διάγραμμα 10.4. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις pH. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Από το χάρτη χωρικής κατανομής των τιμών του pH, με βάση το μέσο όρο των 4 δειγματοληψιών, καθώς δεν προέκυψαν ουσιαστικές μεταβολές μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων, προκύπτει ότι: στα ασβεστολιθικά κράσπεδα υπάρχουν σχετικά υψηλές τιμές, οι οποίες αρχικά μειώνονται ελαφρώς πηγαίνοντας προς τα ανατολικά, ενώ στη συνέχεια ακολουθούν μια ανοδική πορεία φτάνοντας στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της υπολεκάνης, αποκτώντας πιο αλκαλικό χαρακτήρα. Οι στατιστικά απόμακρες χαμηλές τιμές καταλαμβάνουν το βόρειο κομμάτι της υπολεκάνης και ένα μέρος του ΝΔ τμήματος αυτής. Οι περιοχές αυτές των πιο όξινων υδάτων ταυτίζονται με τις περιοχές όπου παρατηρούνται τα μεγαλύτερα προβλήματα νιτρορρύπανσης, καθώς κατά τη δημιουργία της νιτρικής ρίζας (NO_3^-), που αποτελεί τη σταθερή μορφή του αζώτου, παράγονται ιόντα υδρογόνου (H^+) αυξάνοντας έτσι την τιμή του pH.



Εικόνα 10.3. Χωρική κατανομή του pH εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

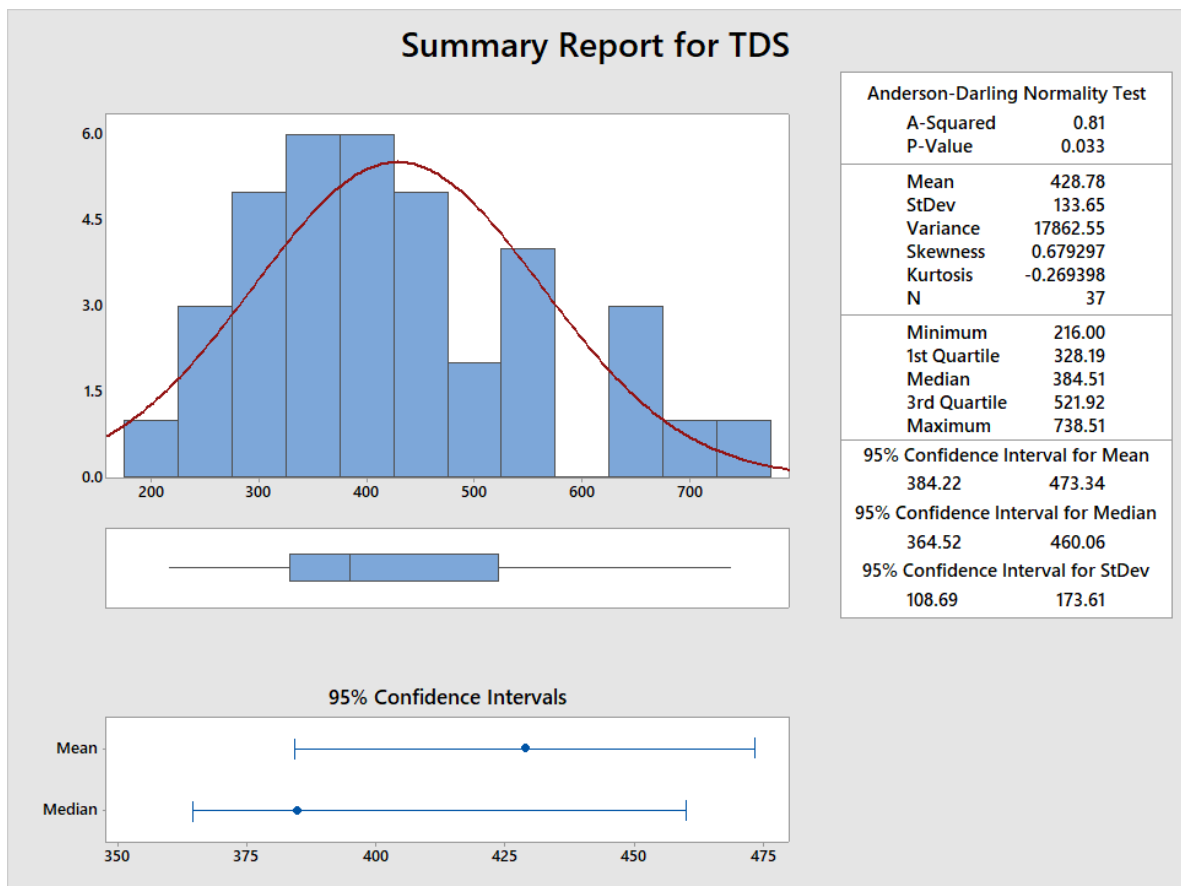
10.2.3 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ (TDS)

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 10.5 η μορφή της κατανομής του πληθυσμού (τιμές TDS) είναι πολύ κοντά την κανονική. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) η τιμή της P-value είναι ίση με 0.033

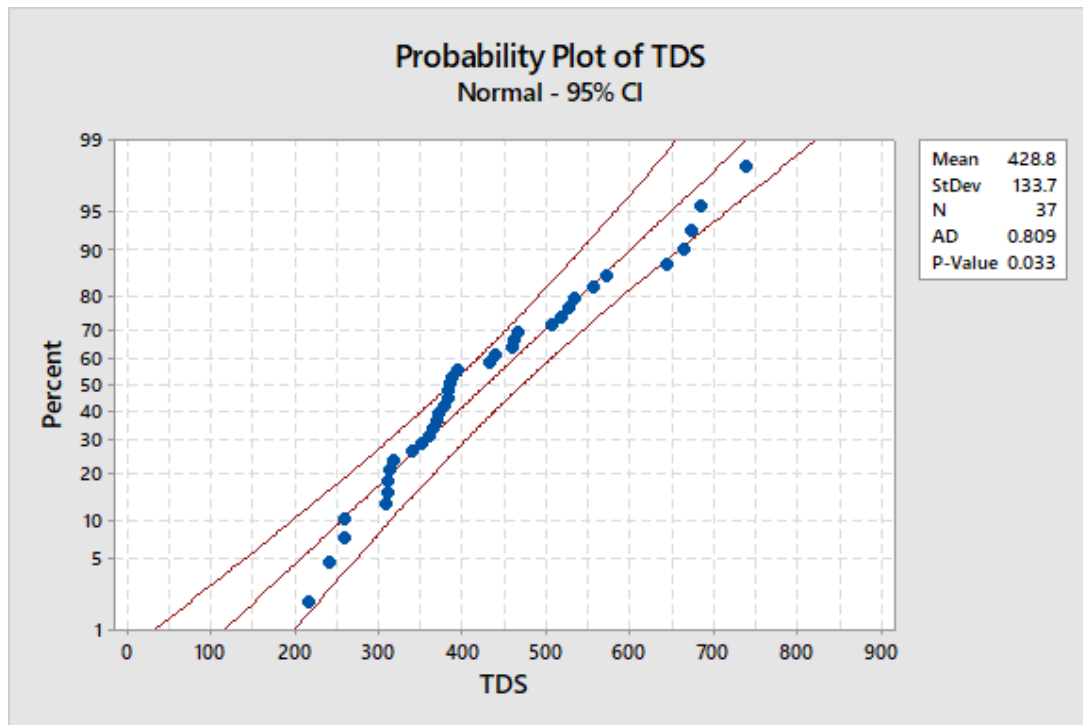
β) ασυμετρία (Skewness): κοντά στο μηδέν, οπότε δεν υπάρχει ουσιαστική ασυμετρία κατανομής προς κάποιον από τους δύο κλάδους

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ κοντά στο μηδέν, οπότε η κυρτότητα της καμπύλης προσομοιάζει με την κυρτότητα της καμπύλης της κανονικής κατανομής.



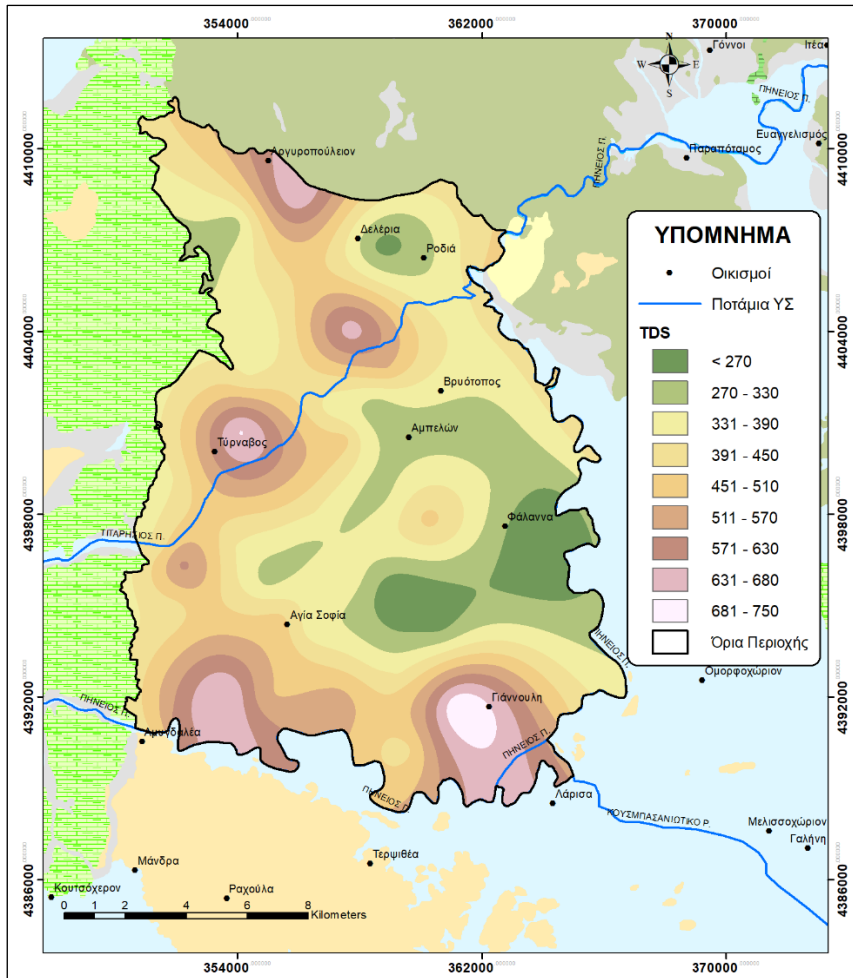
Διάγραμμα 10.5. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμο τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το TDS.

Από το ίδιο Διάγραμμα 10.5 φαίνεται ότι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι τιμές των συνολικών διαλυμένων στερεών είναι 738.51 (mg/L) και 216 (mg/L) αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 384.51 (mg/L). Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 651.81 (mg/L) και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις LB260 (738.51 mg/L), Γ3 (663.88 mg/L), ΕΛ55 (682.96 mg/L) και Λ43 (673.22 mg/L), ενώ το κάτω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b-2S$) είναι 117.21 mg/L κάτω από το οποίο δεν βρίσκεται καμία τιμή. Στο θηκόγραμμα όλες οι παραπάνω τιμές των γεωτρήσεων, που ξεπερνούν το κατώφλιο $b+2S$, θεωρούνται φυσιολογικές και δεν αποτυπώνονται ως ακραίες καθώς δεν ξεπερνούν το $1.5*(Q3-Q1)$ πάνω από την τιμή Q3. Στο Διάγραμμα 10.6 απεικονίζεται η αθροιστική συχνότητα των τιμών TDS, σε λογαριθμική κλίμακα, βάσει του οποίου φαίνεται ότι τα δεδομένα αποτελούν ένα σύνθετο πληθυσμό καθώς διακρίνονται περισσότερες από μία ομάδες. Στο άνω άκρο του πληθυσμού είναι οι τιμές που ξεφεύγουν από τα φυσιολογικά για την περιοχή όρια χωρίς όμως να θεωρούνται ακραίες.



Διάγραμμα 10.6. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις TDS. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης.

Η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων των ολικών διαλυμένων στερεών (Εικόνα 10.4), όπως αναμενόταν είναι αντίστοιχη με αυτήν της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, καθώς οι δύο αυτές παράμετροι έχουν γραμμική σχέση μεταξύ τους. Συνεπώς, οι περιοχές που εμφανίζουν τις χαμηλότερες, τις ενδιάμεσες και τις υψηλότερες τιμές των ολικών διαλυμένων στερεών, είναι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν και για την ηλεκτρική αγωγιμότητα.



Εικόνα 10.4. Χωρική κατανομή των TDS (mg/L) εντός της περιοχής έρευνας (μέσες τιμές των 4 δειγματοληψιών).

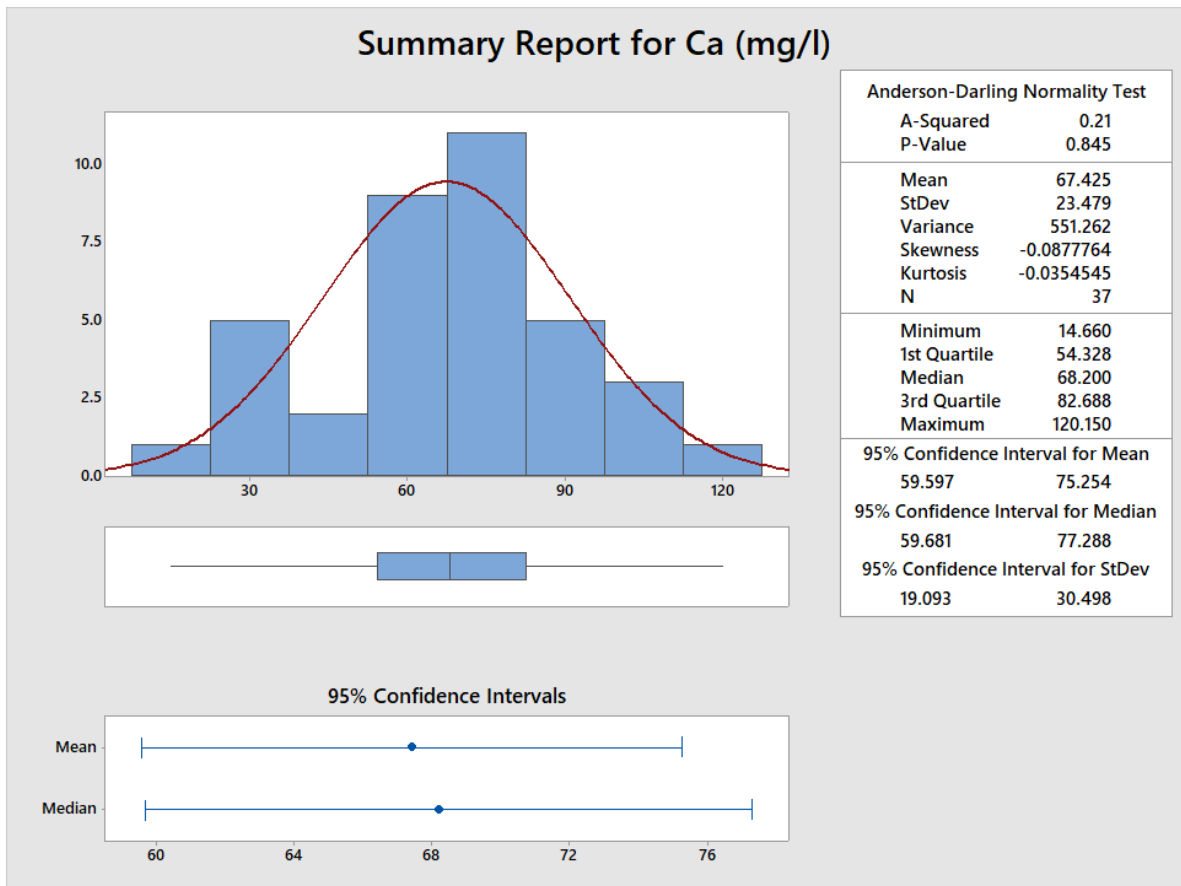
10.2.4 ΑΣΒΕΣΤΙΟ (Ca^{2+})

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 10.7 η κατανομή του πληθυσμού (συγκεντρώσεις ασβεστίου) τείνει προς την κανονική. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) η τιμή της P-value είναι ίση 0.845

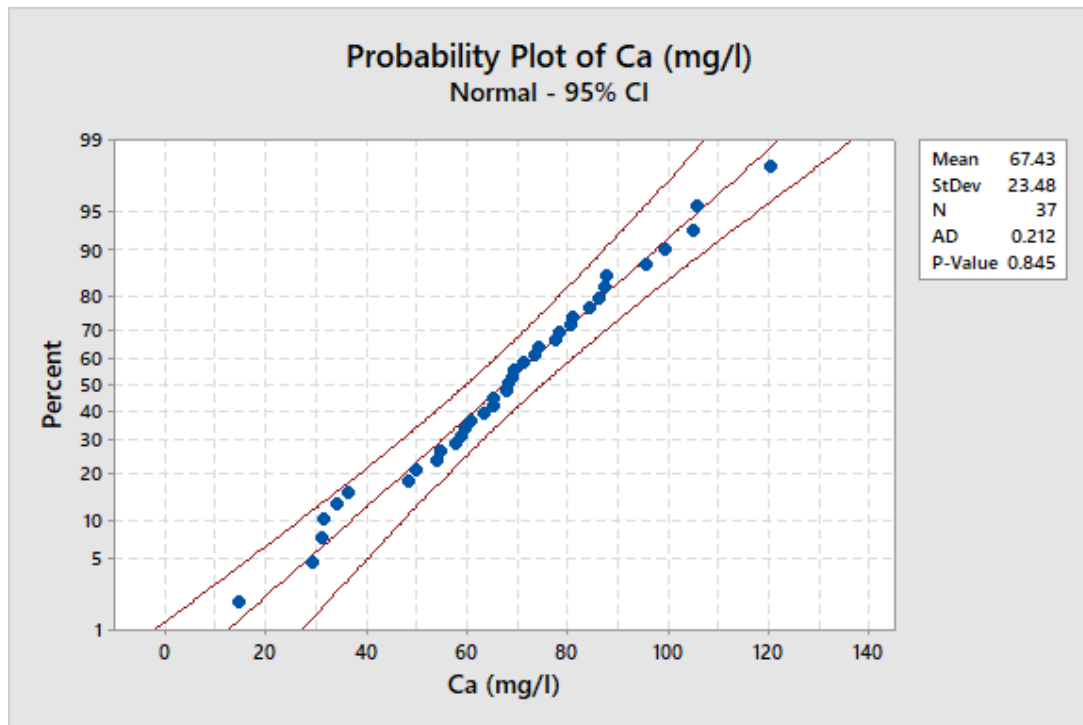
β) ασυμετρία (Skewness): πολύ κοντά στο μηδέν, οπότε δεν υπάρχει ασυμετρία κατανομής προς κάποιον από τους δύο κλάδους

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ κοντά στο μηδέν, οπότε η κυρτότητα της καμπύλης προσομοιάζει με την κυρτότητα της καμπύλης της κανονικής κατανομής.



Διάγραμμα 10.7. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμο τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Ca^{2+} .

Από το ίδιο Διάγραμμα 10.7 φαίνεται ότι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις του Ca είναι 120.15 mg/L και 14.66 mg/L αντίστοιχα ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 68.2 mg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 115.16 mg/L και το ξεπερνάει μόνο το δείγμα από τη γεώτρηση ΕΛ55 (120.15 mg/L), ενώ το κάτω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b-2S$) είναι 21.24 mg/L κάτω από το οποίο βρίσκεται μόνο το δείγμα από τη γεώτρηση Μ1 (14.66 mg/L). Στο Διάγραμμα 10.8 απεικονίζεται η αθροιστική συχνότητα των συγκεντρώσεων Ca, σε λογαριθμική κλίμακα, βάσει του οποίου φαίνεται ότι τα δεδομένα αποτελούν ένα σύνθετο πληθυσμό, καθώς διακρίνονται περισσότερες από μία ομάδες. Στα δύο άκρα του πληθυσμού είναι οι τιμές που ξεφεύγουν από τα φυσιολογικά για την περιοχή όρια. Η τιμή της διαμέσου αντιπροσωπεύει τον χαρακτήρα των ασβεστολιθικών πετρωμάτων που επικρατούν στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης. Οι διαφοροποιήσεις και ομαδοποιήσεις που προκύπτουν στον πληθυσμό, πιθανότατα σχετίζονται με τις περιοχικές χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την κίνηση και παραμονή του υπόγειου νερού καθώς και στο φαινόμενο της δολομιτίωσης, που ανάλογα με το μέγεθός του διαφοροποιεί χωρικά τις συγκεντρώσεις του ασβεστίου, αλλά και του μαγνησίου, όπως αναπτύχθηκε στην Παράγραφο 9.2 της υδρογεωχημικής ταξινόμησης.



Διάγραμμα 10.8. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Ca^{2+} . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης.

Για τη συγκέντρωση των Ca^{2+} δεν υπάρχει ανώτατο όριο για ένα πόσιμο υδατικό διάλυμα, καθώς υψηλές τιμές επιφέρουν αύξηση της σκληρότητας του νερού, χωρίς ουσιαστικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η χωρική κατανομή των τιμών του ασβεστίου παρουσιάσθηκε και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.7.1, Εικόνες 8.15 και 8.16).

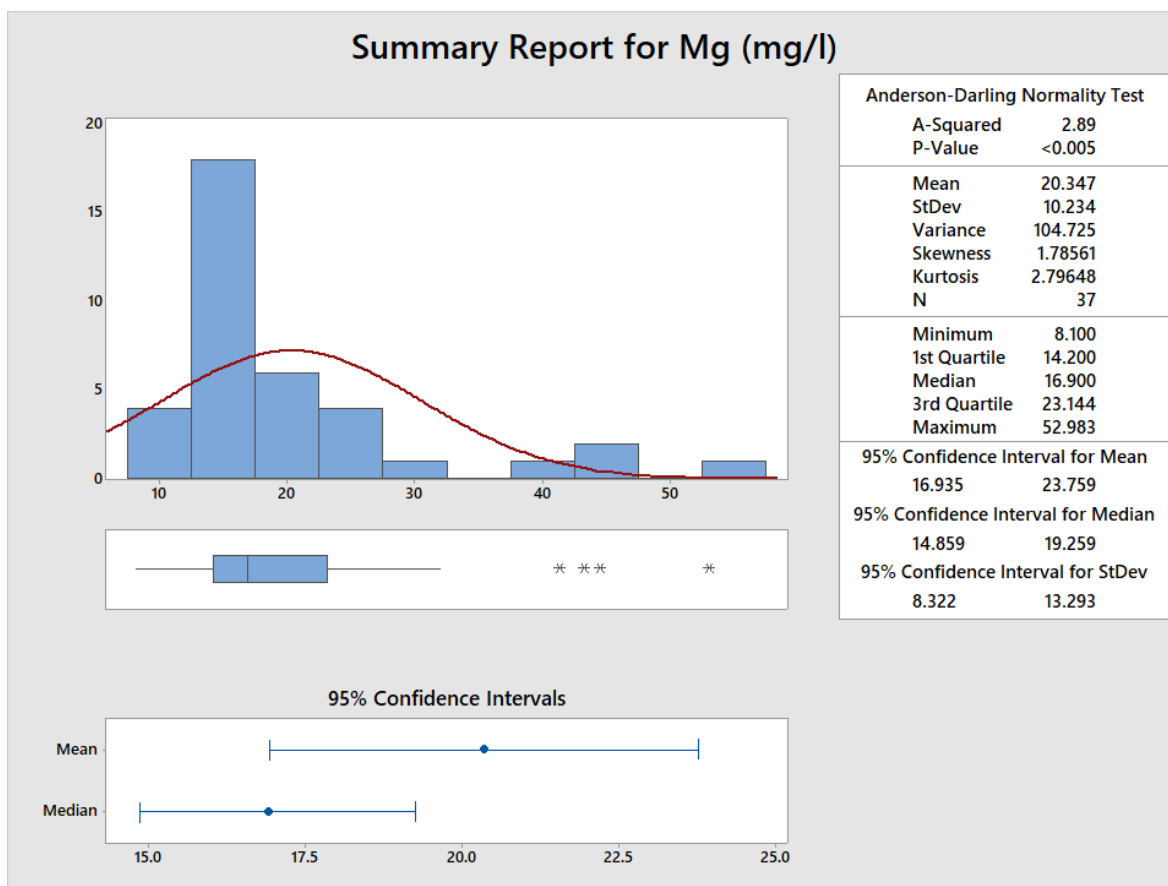
10.2.5 ΜΑΓΝΗΣΙΟ (Mg^{2+})

Από το Διάγραμμα 10.9 φαίνεται ότι η κατανομή των συγκεντρώσεων Mg δεν είναι κανονική κάτι που προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

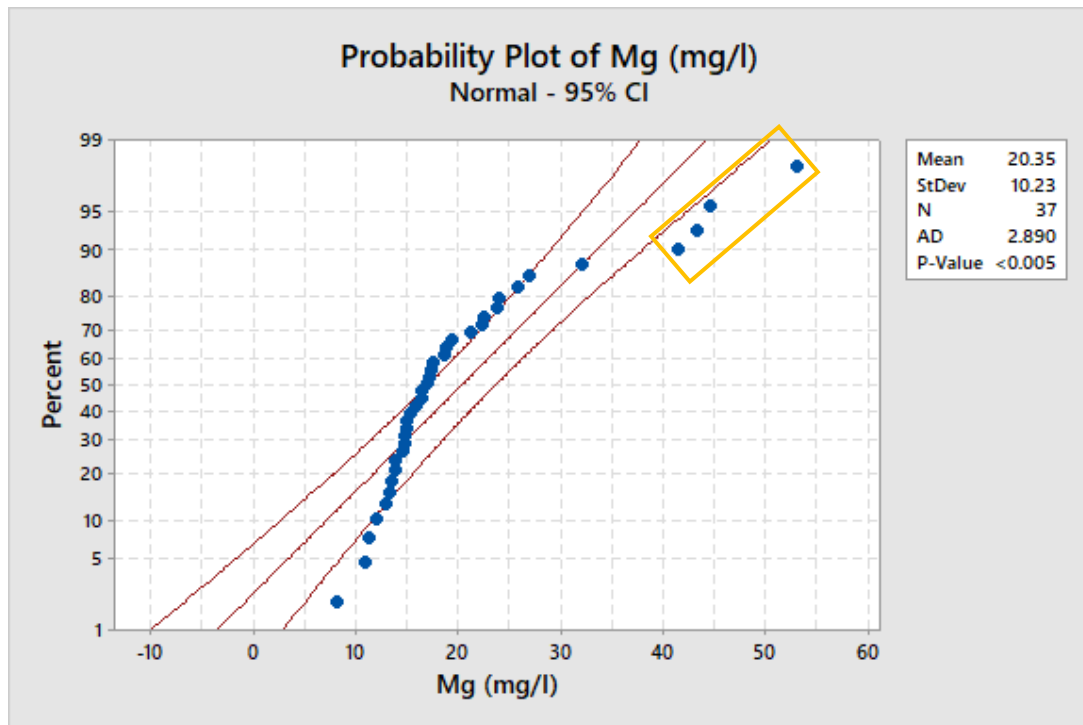
β) ασυμμετρία (Skewness): πολύ μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.



Διάγραμμα 10.9. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμο τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Mg^{2+} .

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις του Mg είναι 52.98 mg/L και 8.1 mg/L, αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 16.9 mg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 37.37 mg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις F1 (43.22 mg/L), LB260 (52.98 mg/L), LB268 (41.30 mg/L) και Γ3 (44.54 mg/L). Από το θηκόγραμμα του Διαγράμματος 10.9 οι απόμακρες αυτές τιμές απεικονίζονται με τη μορφή αστερίσκων. Στο Διάγραμμα 10.10 παρατηρείται ότι τα δεδομένα αποτελούνται από ένα σύνθετο πληθυσμό, καθώς διακρίνονται περισσότερες από μία ομάδες, ενώ παράλληλα διακρίνονται και οι απόμακρες τιμές (μέσα στο πορτοκαλί ορθογώνιο πλαίσιο). Η τιμή της διαμέσου αντιπροσωπεύει τον κυρίαρχο χαρακτήρα των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή, με επικράτηση των ασβεστόλιθων και την επίδραση της δολομιτίωσης. Οι διαφοροποιήσεις και ομαδοποιήσεις που προκύπτουν στον πληθυσμό, καθώς και οι απόμακρες τιμές σχετίζονται με τα παραπάνω αίτια, καθώς και με τις κατά τόπους χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την κίνηση και παραμονή του υπόγειου νερού.



Διάγραμμα 10.10. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Mg^{2+} . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Συνιστώμενη συγκέντρωση μαγνησίου αποτελούν τα 30mg/L, ενώ το ανώτερο επίπεδο για το πόσιμο νερό είναι τα 50mg/L, σύμφωνα με την Οδηγία 98/93/EC (1998). Υψηλές συγκεντρώσεις Mg^{2+} επιφέρουν αλλοιώσεις μόνο στη γεύση και τη σκληρότητα του νερού χωρίς ουσιαστικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Αναφορικά με τη χωρική κατανομή των τιμών των συγκεντρώσεων μαγνησίου, αυτή παρουσιάσθηκε και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.7.2, Εικόνες 8.17 και 8.18).

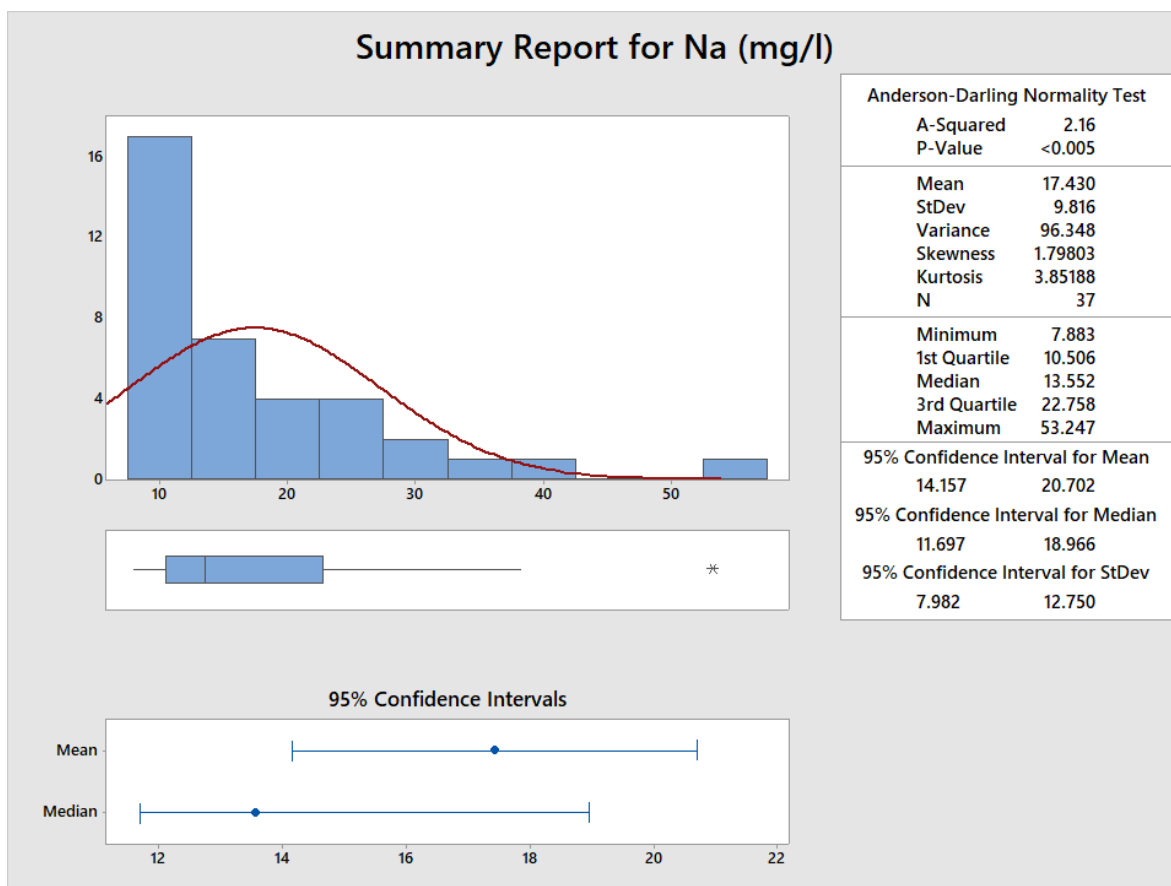
10.2.6 NATΡΙΟ (Na^+)

Από το Διάγραμμα 10.11 φαίνεται ότι η κατανομή των συγκεντρώσεων Na δεν είναι κανονική κάτι που προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

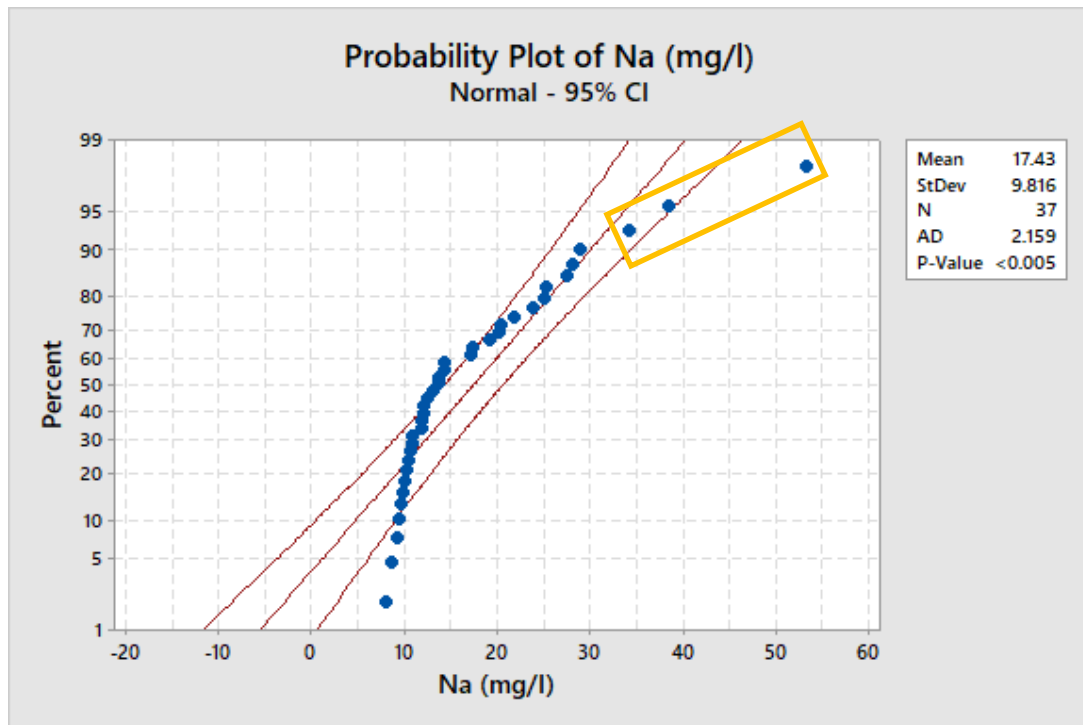
β) ασυμμετρία (Skewness): πολύ μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.



Διάγραμμα 10.11. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμο τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Na⁺.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις του Na είναι 53.25 mg/L και 7.88 mg/L αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 13.55 mg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 33.18 mg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις LB257 (53.25 mg/L), LB260 (38.33 mg/L) και LB268 (34.18 mg/L). Από το θηκόγραμμα του Διαγράμματος 10.11 φαίνεται ότι μόνο η τιμή της LB257 (53.25 mg/L) θεωρείται ως ακραία. Ουσιαστικά οι τιμές των άλλων δύο γεωτρήσεων δεν ξεπερνούν το $k^*(Q3-Q1)$, όπου $k=1.5$, πάνω από την τιμή του Q3. Από το Διάγραμμα 10.12 παρατηρείται ότι τα δεδομένα αποτελούνται σε γενικές γραμμές από έναν ενιαίο πληθυσμό με εξαίρεση τις τρεις τελευταίες απόμακρες τιμές (μέσα στο πορτοκαλί ορθογώνιο πλαίσιο), οι οποίες αντιστοιχούν στις γεωτρήσεις που προαναφέρθηκαν παραπάνω. Οι τρεις αυτές γεωτρήσεις συνδέονται και χωρικά, καθώς καταλαμβάνουν το NA τμήμα της υπολεκάνης και ουσιαστικά είναι αυτές που διαμορφώνουν τον υδροχημικό τύπο σε αυτό το τμήμα της υπολεκάνης.



Διάγραμμα 10.12. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Na^+ . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Το ανώτατο όριο συγκεντρώσεων Na^+ , σύμφωνα με το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017, ορίζεται στα 200 mg/L. Υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να επιφέρουν, μόνο στην περίπτωση μακροχρόνιας κατανάλωσης, υψηλή αρτηριακή πίεση και επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό σύστημα του ανθρώπινου οργανισμού. Η χωρική κατανομή των ιόντων Na^+ παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.7.3, Εικόνες 8.19 και 8.20), εμφανίζοντας χαρακτηριστική αύξηση προς το A-NA τμήμα της περιοχής έρευνας.

10.2.7 ΚΑΛΙΟ (K^+)

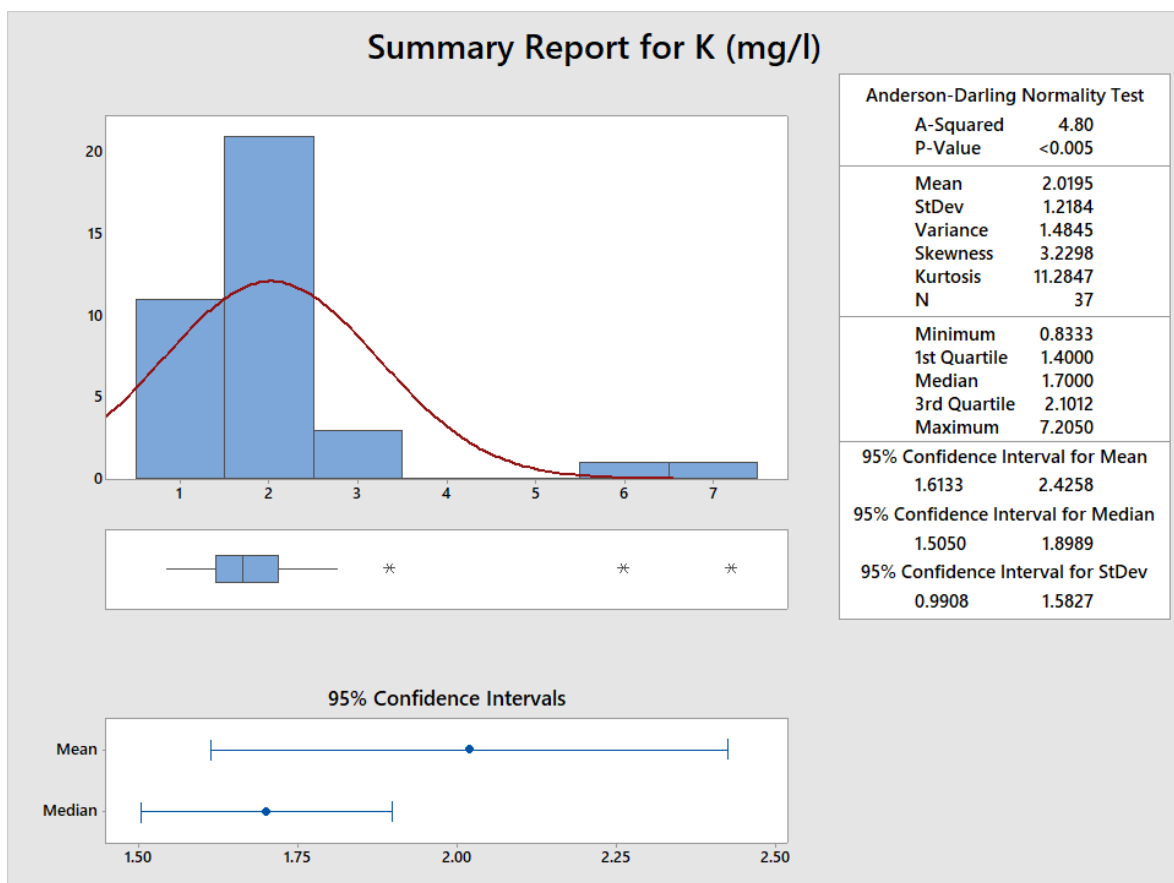
Από το Διάγραμμα 10.13 φαίνεται ότι η κατανομή των συγκεντρώσεων K δεν είναι κανονική κάτι που προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

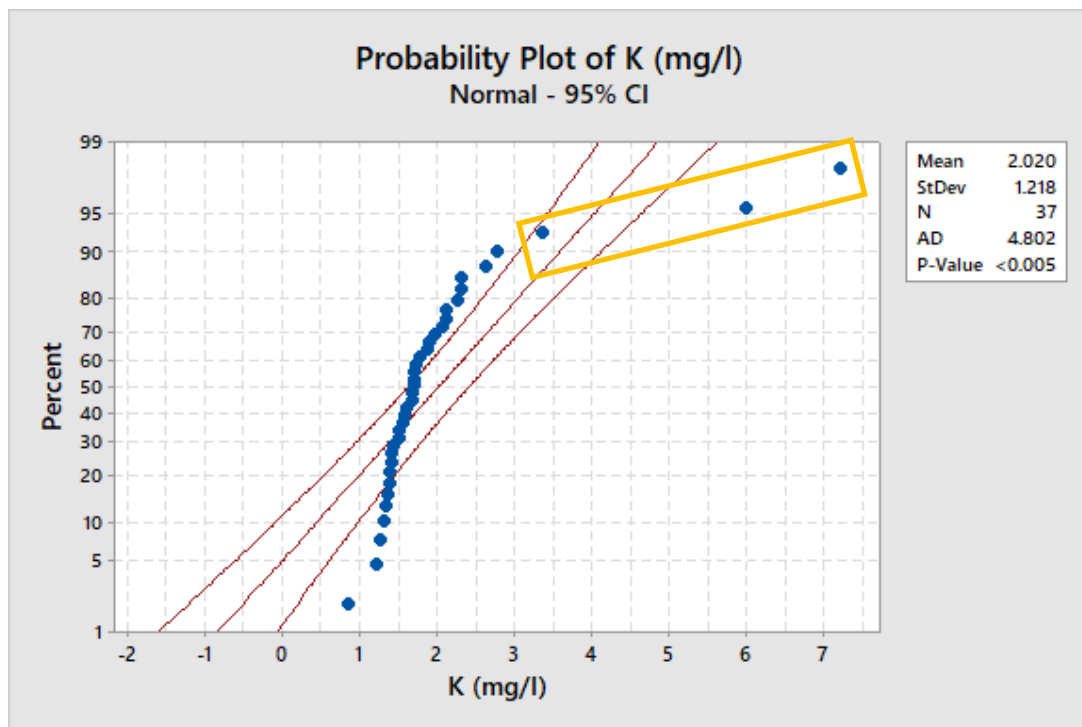
β) ασυμμετρία (Skewness): πολύ μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.

Από το ίδιο διάγραμμα (10.13) φαίνεται ότι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις του Κ είναι 7.21 mg/L και 0.83 mg/L αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 1.7 mg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών (b+2S) είναι 4.14 mg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις ΕΛ55 (7.21 mg/L) και Λ41 (5.98 mg/L). Στο θηκόγραμμα του Διαγράμματος 10.13, οι απόμακρες αυτές τιμές απεικονίζονται με τη μορφή αστερίσκων. Σημειώνεται ότι η τιμή της γεώτρησης Γ3 (3.35 mg/L) θεωρείται απόμακρη χωρίς να ξεπερνάει το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών (b+2S), ξεπερνάει όμως το $1.5 \cdot (Q3 - Q1)$ πάνω από την τιμή του Q3. Από το διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας (Διάγραμμα 10.14), παρατηρείται ότι τα δεδομένα αποτελούνται σε γενικές γραμμές από έναν ενιαίο πληθυσμό με εξαίρεση τις τρεις τελευταίες απόμακρες τιμές (μέσα στο πορτοκαλί ορθογώνιο πλαίσιο), οι οποίες αντιστοιχούν στις γεωτρήσεις Γ3, ΕΛ55 και Λ41.



Διάγραμμα 10.13. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Κ⁺.



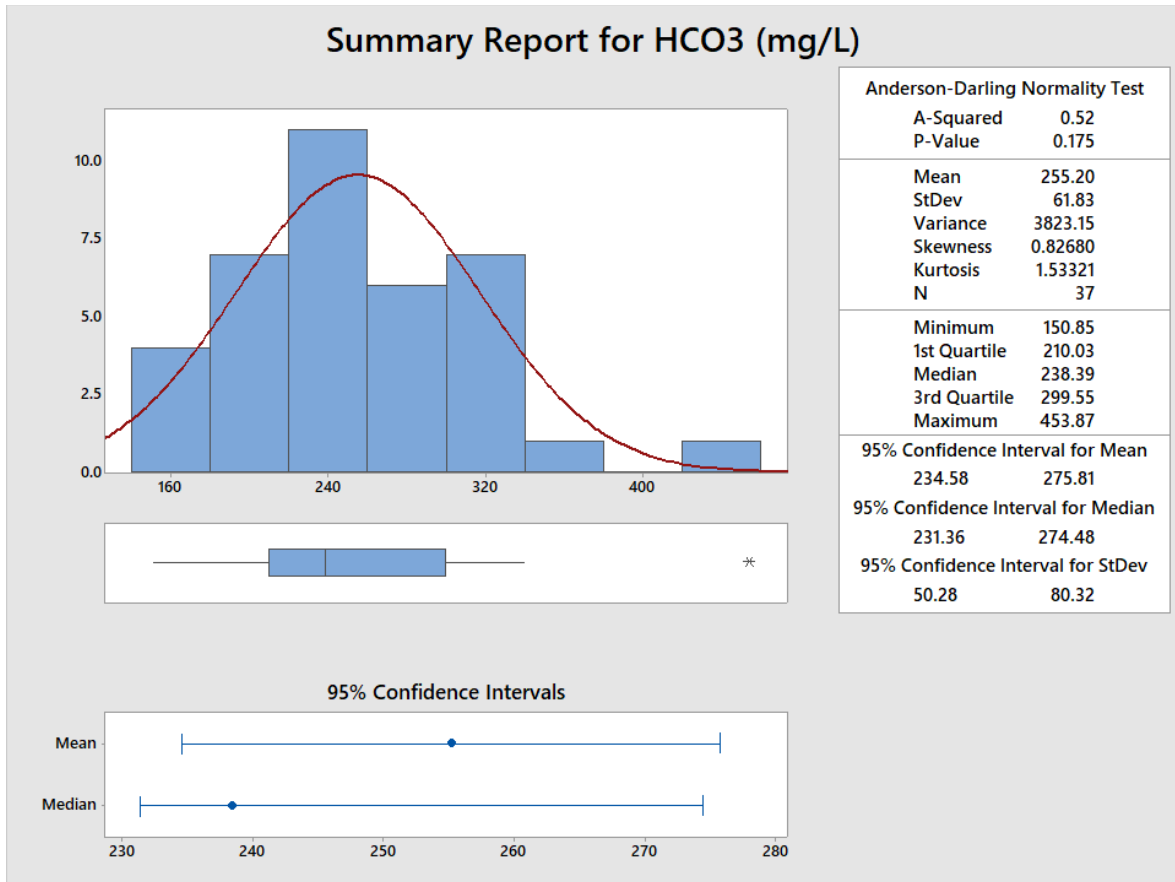
Διάγραμμα 10.14. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις K^+ . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Τα ιόντα καλίου δεν αποτελούν κίνδυνο για τον άνθρωπο, παρά μόνο σε εξειδικευμένες περιπτώσεις σπάνιων ασθενειών ή/και με παράλληλη κατανάλωση ειδικών φαρμακευτικών αγωγών (WHO 2008). Το ανώτερο όριο ποσιμότητας έχει θεσπιστεί στα 12 mg/L. Η χωρική κατανομή των τιμών των συγκεντρώσεων καλίου, παρουσιάσθηκε και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.7.4, Εικόνες 8.21 και 8.22).

10.2.8 ΟΞΙΝΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (HCO_3^-)

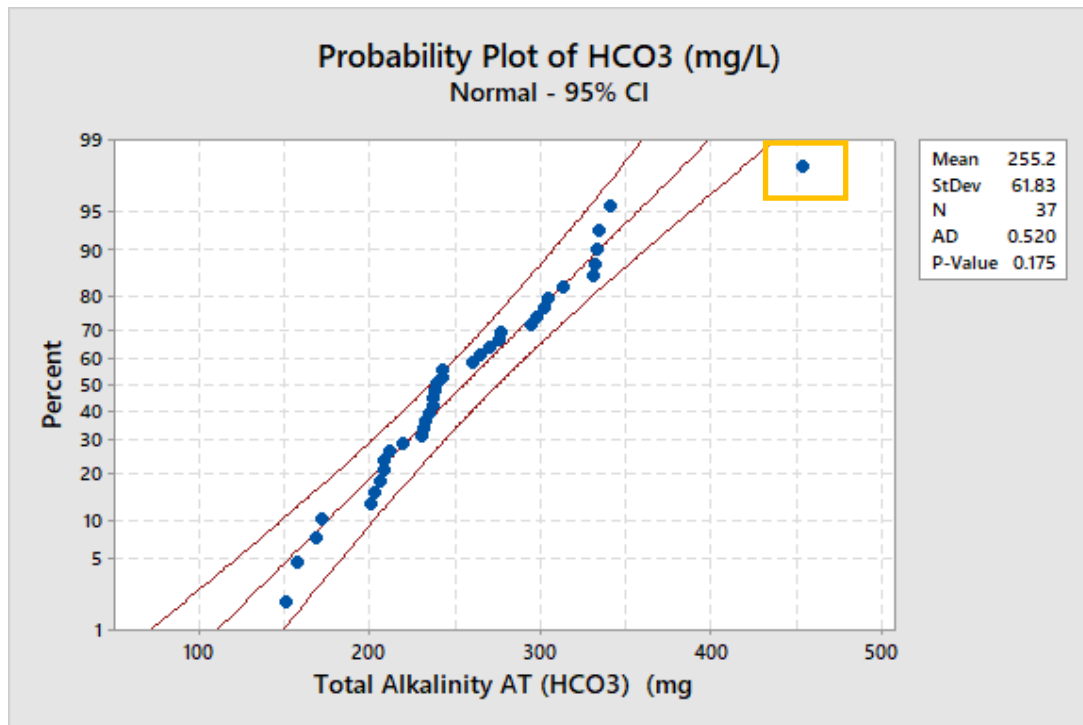
Από το Διάγραμμα 10.15 και με βάση την τιμή της P-value (0.175) βγαίνει το συμπέρασμα ότι η κατανομή των συγκεντρώσεων HCO_3^- είναι κανονική. Οι τιμές της ασυμμετρίας (skewness) και της κυρτότητας (kurtosis) που είναι >0, απλά υποδηλώνουν την απόκλιση από την ιδανική κανονική κατανομή, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν παρουσιάζει τα συμμετρικά της χαρακτηριστικά. Θετική τιμή της ασυμμετρίας (0.83) υποδηλώνει κατανομή ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο και αντίστοιχα θετική τιμή της κύρτωσης (1.53) υποδηλώνει ότι η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής. Από το ίδιο διάγραμμα (10.15) φαίνεται ότι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις του HCO_3^- είναι 453.87 mg/L και 150.85 mg/L, αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 238.39 mg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 362.05 mg/L και το ξεπερνάει μόνο το δείγμα από τη γεώτρηση F1 (453.87 mg/L), ενώ

το κάτω όριο των φυσιολογικών τιμών (b-2S) είναι 114.73 mg/L κάτω από το οποίο δεν βρίσκεται κανένα από τα δείγματα των γεωτρήσεων.



Διάγραμμα 10.15. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα HCO₃⁻.

Στο θηκόγραμμα του Διαγράμματος 10.15 η απόμακρη τιμή της γεώτρησης F1 απεικονίζεται με αστερίσκο. Από το διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας (Διάγραμμα 10.16) προκύπτει ότι τα δεδομένα αποτελούνται από έναν σύνθετο πληθυσμό, καθώς υπάρχουν περισσότερες από μία ομάδες. Διακρίνεται επίσης η ακραία τιμή της γεώτρησης F1 στο επάνω και δεξιό τμήμα του διαγράμματος. Η τιμή της διαμέσου αντιπροσωπεύει την διάλυση των ασβεστολιθικών σχηματισμών, που απαντώνται στα δυτικά κράσπεδα της περιοχής και τροφοδοτούν το υπόγειο υδατικό σύστημα της υπολεκάνης.



Διάγραμμα 10.16. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις HCO₃⁻. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο η απόμακρη τιμή.

Δεν υπάρχει θεσπισμένο ανώτατο όριο για τις συγκεντρώσεις των όξινων ανθρακικών καθώς δεν θεωρούνται επικίνδυνοι ρύποι και ως εκ τούτου δεν έχουν αναφερθεί επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Όσον αφορά στη χωρική κατανομή των τιμών των συγκεντρώσεων των όξινων ανθρακικών, αυτή παρουσιάστηκε και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.7.5, Εικόνες 8.23 και 8.24).

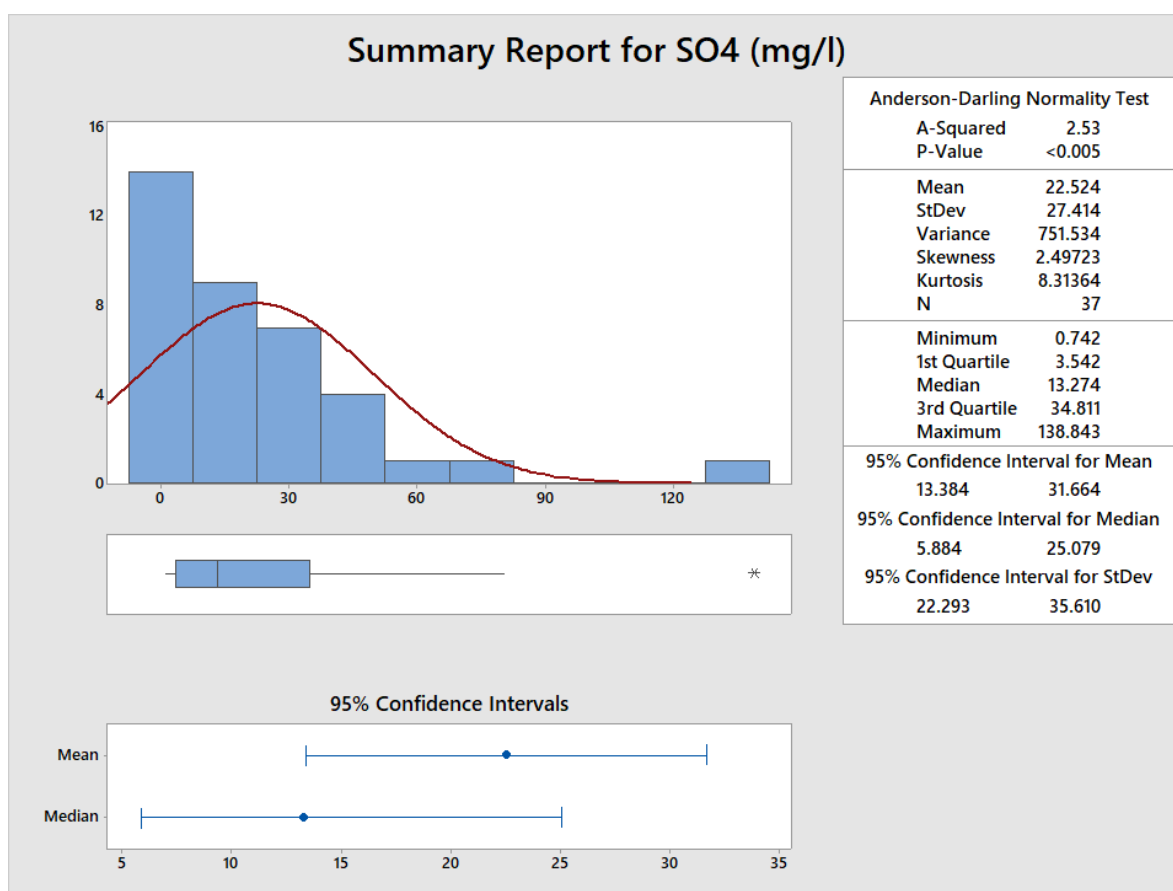
10.2.9 ΘΕΙΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (SO₄²⁻)

Από το ιστόγραμμα του Διαγράμματος 10.17 παρατηρείται ότι η κατανομή του πληθυσμού των θειικών ιόντων δεν είναι κανονική κάτι που προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

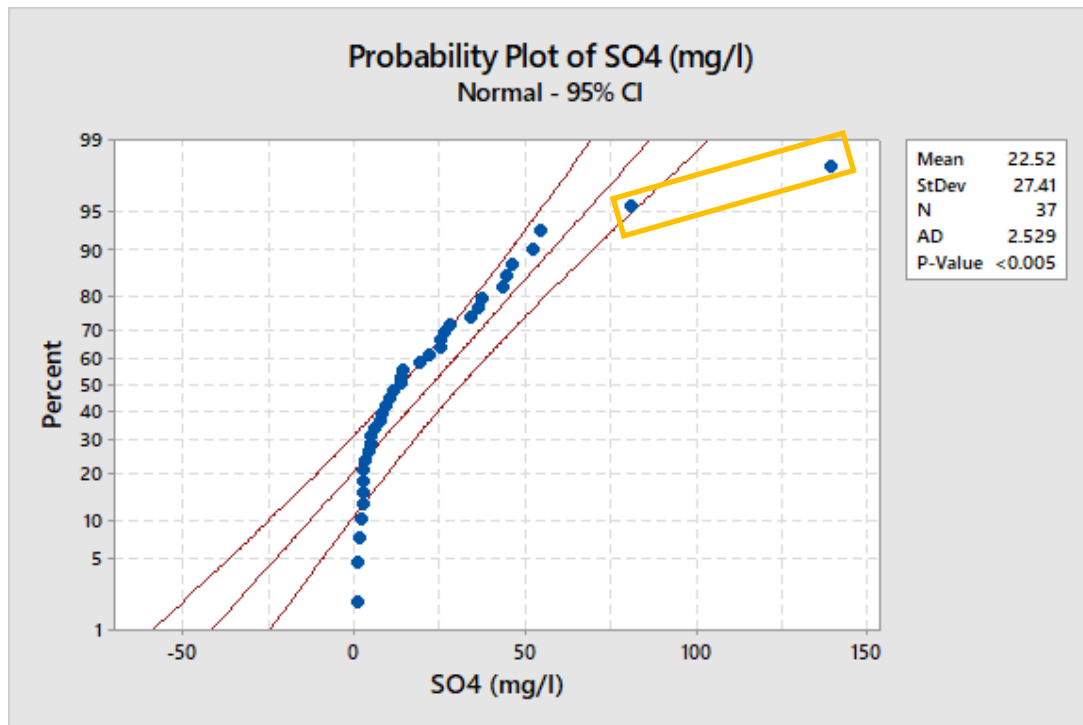
- α) P-value: μικρότερη από 0.005
- β) ασυμμετρία (Skewness): πολύ μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο
- γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις των θειικών ιόντων, όπως αυτές προκύπτουν από το Διάγραμμα 10.17, είναι 138.84 mg/L και 0.74 mg/L

αντίστοιχα ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 13.27 mg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών (b+2S) είναι 68.10 mg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις LB260 (138.84 mg/L) και LB268 (80.68 mg/L). Στο θηκόγραμμα του ίδιου διαγράμματος η απόμακρη τιμή της γεώτρησης LB260 απεικονίζεται με τη μορφή αστερίσκου, ενώ η τιμή της γεώτρησης LB268, αν και ξεπερνάει το όριο φυσιολογικών τιμών (b+2S), δεν θεωρείται ακραία κι αυτό γιατί δεν ξεπερνά το $1.5*(Q3-Q1)$ πάνω από την τιμή Q3. Από το διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας του Διαγράμματος 10.18 παρατηρούμε ότι τα δεδομένα αποτελούνται από έναν ενιαίο πληθυσμό, με εξαίρεση τις δύο απόμακρες τιμές που αντιστοιχούν στις γεωτρήσεις LB260 και LB268.



Διάγραμμα 10.17. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα SO_4^{2-} .



Διάγραμμα 10.18. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις SO_4^{2-} . Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Η παραμετρική τιμή, που έχει θεσπιστεί τόσο από το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017 για την Ελλάδα, όσο και από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) για τα SO_4^{2-} , είναι 250 mg/L, ενώ όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μέγιστη συγκέντρωση θειικών στην περιοχή δεν ξεπερνά τα 140 mg/L. Η χωρική κατανομή των θειικών ιόντων παρουσιάσθηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.7.6, Εικόνες 8.25 και 8.26).

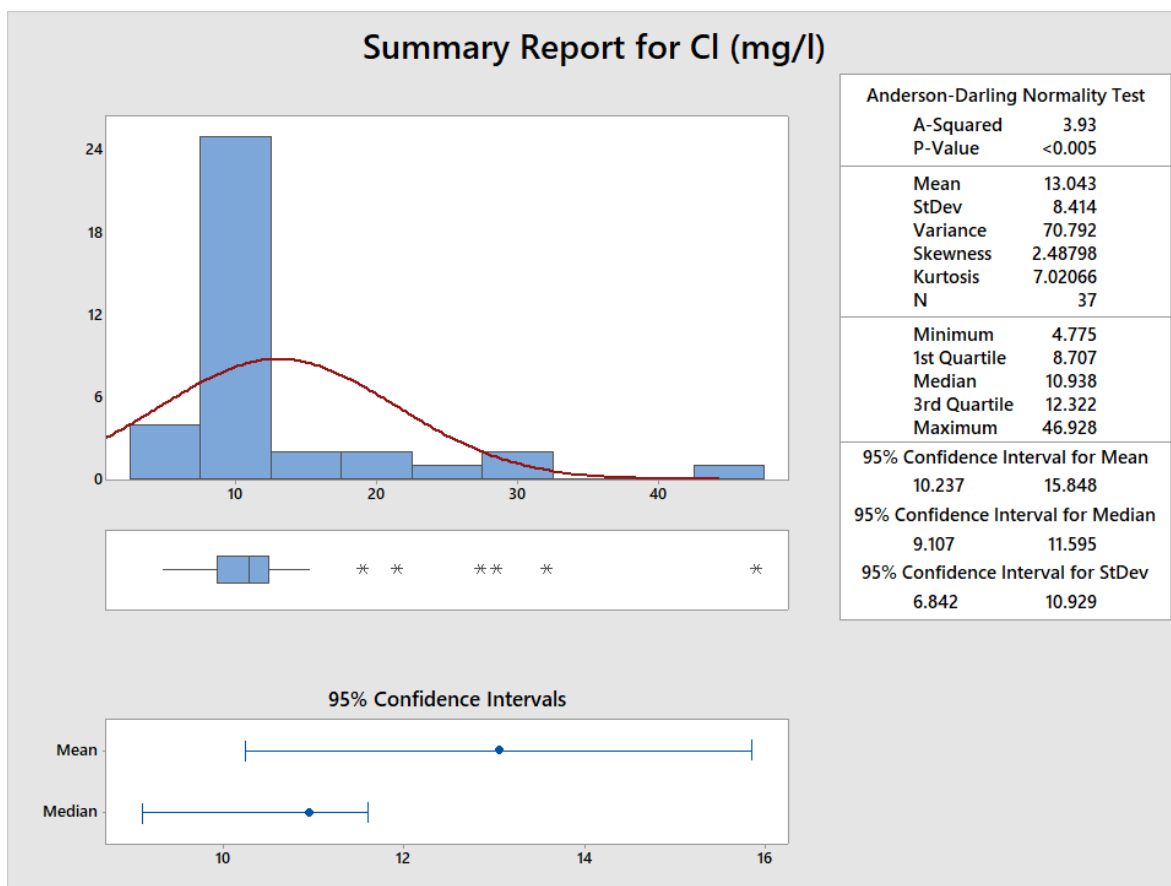
10.2.10 ΧΛΩΡΙΟ (Cl)

Οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 10.19 δεν αποτελούν κανονική κατανομή, όπως προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

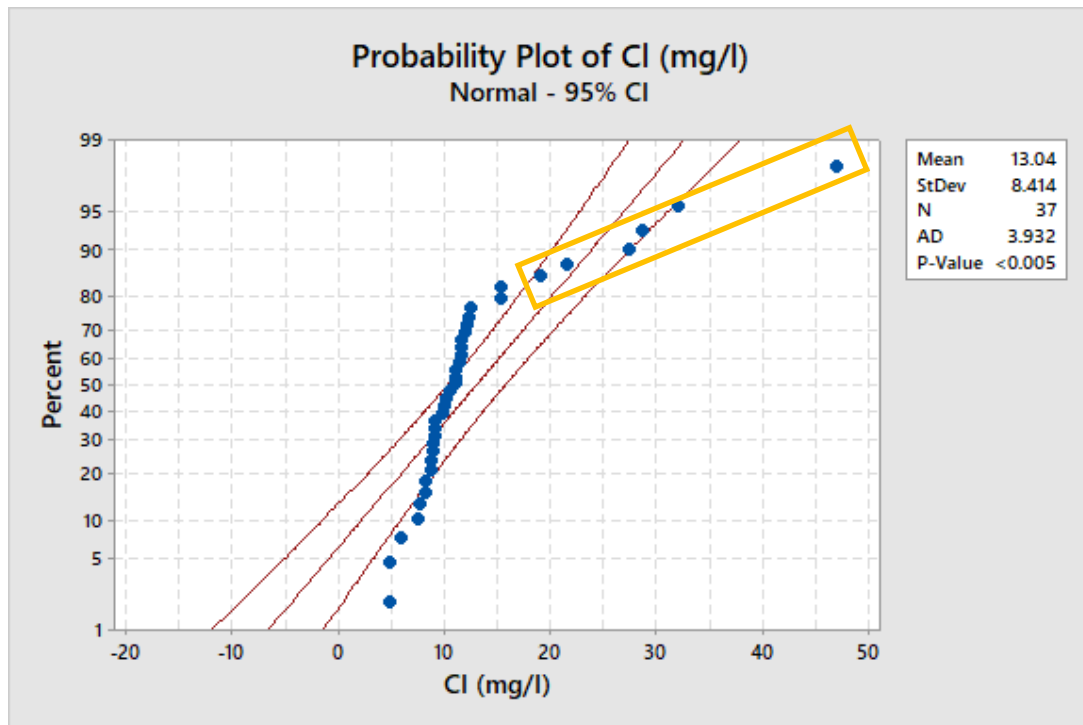
β) ασυμμετρία (Skewness): πολύ μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.



Διάγραμμα 10.19. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα Cl.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων, όπως αυτές προκύπτουν από το παραπάνω Διάγραμμα 10.19, είναι 46.93 mg/L και 4.78 mg/L, αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 10.94 mg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 27.77 mg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις LB260 (28.51 mg/L), Γ3 (46.93 mg/L) και ΕΛ55 (32.02 mg/L). Από το αντίστοιχο θηκόγραμμα φαίνεται ότι υπάρχουν επιπλέον απόμακρες τιμές εκτός των παραπάνω τριών γεωτρήσεων (LB260, Γ3, ΕΛ55), οι οποίες είναι οι LB139 (18.97 mg/L), Λ43 (21.45 mg/L) και LB268 (27.34 mg/L). Οι τιμές αυτές δεν ξεπερνούν το όριο φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) αλλά θεωρούνται απόμακρες καθώς ξεπερνούν το $1.5*(Q3-Q1)$ πάνω από την τιμή Q3. Από το διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας του Διαγράμματος 10.20 παρατηρείται ότι τα δεδομένα αποτελούνται από έναν σύνθετο πληθυσμό, καθώς διακρίνονται περισσότερες από μια ομάδες. Εντός του πορτοκαλί πλαισίου διακρίνονται οι απόμακρες τιμές που αντιστοιχούν στις προαναφερθείσες γεωτρήσεις LB260, Γ3 και ΕΛ55, οι οποίες ξεπερνούν το ανώτερο όριο φυσιολογικών τιμών αλλά και εκείνες των γεωτρήσεων LB139, Λ43 και LB268 που θεωρούνται απόμακρες, για το λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω, χωρίς να ξεπερνούν το κατώφλι.



Διάγραμμα 10.20. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Cl⁻. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Το Cl⁻ αποτελεί βασικό συστατικό των υπογείων υδάτων, κυρίως λόγω της αφθονίας με την οποία υπάρχει στη φύση. Θεωρείται συντηρητικό στοιχείο, αφού δεν συμμετέχει σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και δεν προσροφάται σε επιφάνειες οξειδίων και οργανικών υλικών (Fetter 1993), επομένως κινείται με την μέση γραμμική ταχύτητα του υπόγειου νερού. Δεν είναι επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, παρά μόνο σε υψηλές συγκεντρώσεις δημιουργεί προβλήματα στη γεύση του νερού. Το θεσπισμένο όριο για το χλώριο ανέρχεται σε 250mg/L, τιμή που δεν υπάρχει σε κανένα από τα αναλυθέντα δείγματα στην περιοχή έρευνας. Όσον αφορά στη χωρική κατανομή των τιμών των συγκεντρώσεων χλωρίου, αυτή παρουσιάσθηκε και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.7.7, Εικόνες 8.27 και 8.28).

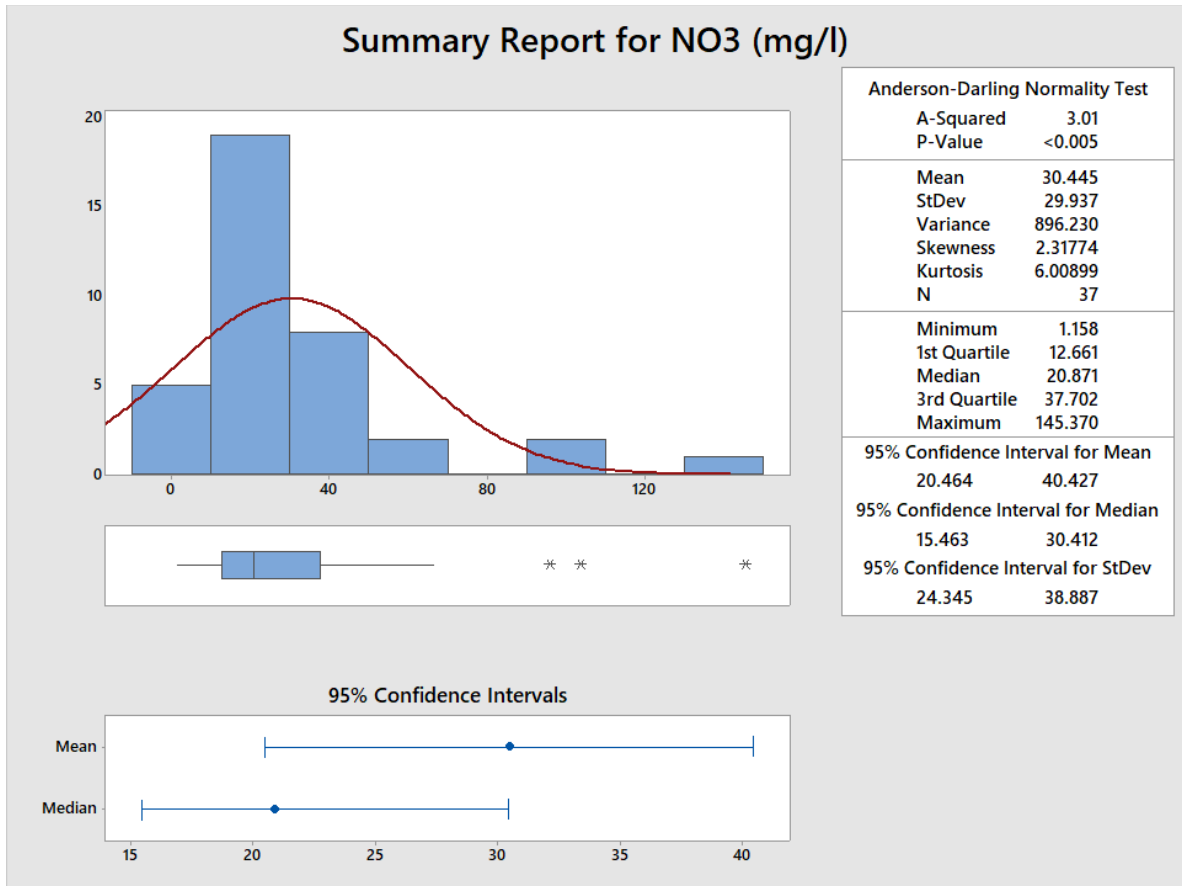
10.2.11 ΝΙΤΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (NO₃⁻)

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10.21 δεν αποτελούν κανονική κατανομή, όπως προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

β) ασυμμετρία (Skewness): μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

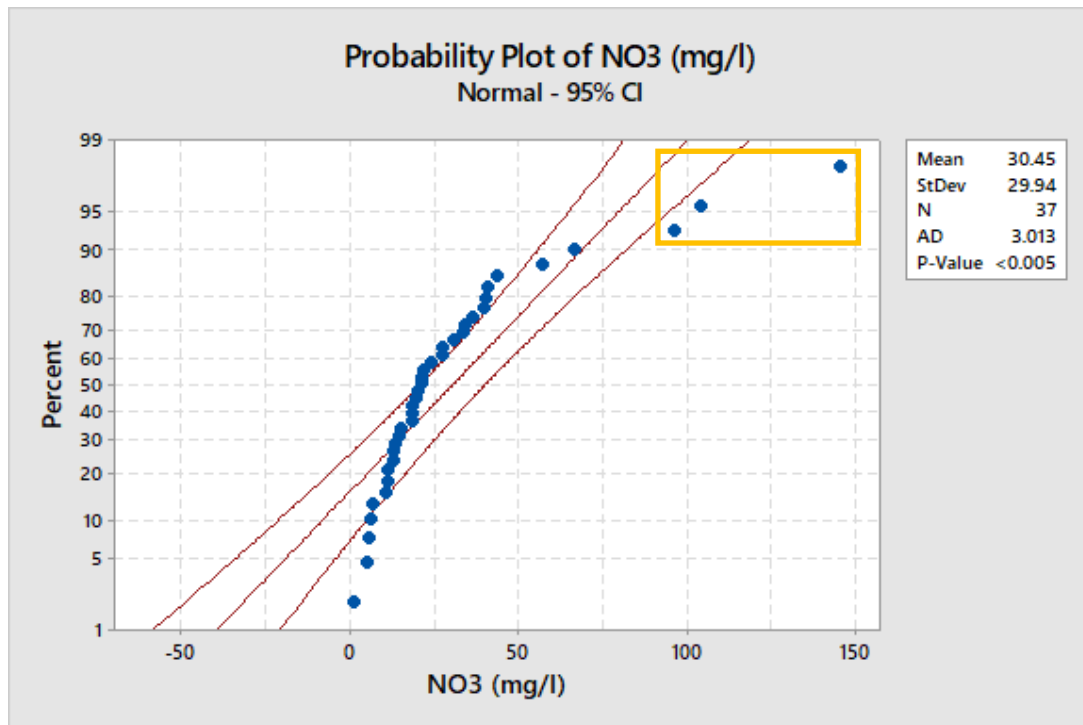
γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.



Διάγραμμα 10.21. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμο τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα NO₃⁻.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων, όπως αυτές προκύπτουν από το Διάγραμμα 10.21, είναι 145.37 mg/L και 1.16 mg/L αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 20.87 mg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών (b+2S) είναι 80.75 mg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις Λ43 (95.9 mg/L), ΕΛ55 (103.64 mg/L) και Γ3 (145.37 mg/L). Οι ακραίες αυτές τιμές αποτυπώνονται στο θηκόγραμμα του ίδιου διαγράμματος με τη μορφή αστερίσκων.

Οι αυξημένες αυτές τιμές των νιτρικών ιόντων προέρχονται πιθανότατα από την έντονη αγροτική δραστηριότητα τόσο γεωργική όσο και κτηνοτροφική, που αποτελεί βασική πηγή ρύπανσης των υπόγειων υδάτων από αζωτούχες ενώσεις. Οι συνέπειες από την κατανάλωση νερού με υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, είναι αρκετά σοβαρές, ιδιαίτερα στις μικρότερες ηλικίες. Η ανώτερη παραμετρική τιμή έχει μεταβληθεί, σε σχέση με την αρχική θέσπισή της το 1957, από 100 mg/L σε 50 mg/L (σύμφωνα και με το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017 για την Ελλάδα).



Διάγραμμα 10.22. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις NO₃⁻. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Από το Διάγραμμα 10.22 παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων αποτελούνται από ένα σύνθετο πληθυσμό, καθώς υπάρχουν περισσότερες από μία ομάδες με τις απόμακρες τιμές να περικλείονται εντός τους ορθογωνίου πλαισίου. Η χωρική κατανομή των γεωτρήσεων, των οποίων οι τιμές αποκλίνουν με βάση τη στατιστική ανάλυση, δημιουργεί μια κατακόρυφη ζώνη παράλληλη με τα κράσπεδα στο δυτικό τμήμα της υπολεκάνης (Κεφάλαιο 8, Παράγραφος 8.7.8, Εικόνες 8.29 και 8.30), ενώ στο ΝΑ τμήμα αυτής υπάρχουν γεωτρήσεις, που ενώ τα δείγματα νερού από αυτές υπερβαίνουν το θεσπισμένο όριο των 50 mg/L, δεν τους αποδίδεται ο στατιστικός όρος ακραία τιμή. Η παρουσία των αυξημένων αυτών συγκεντρώσεων, στις συγκεκριμένες περιοχές, έχει αποδοθεί σε μία σειρά παραγόντων, οι οποίοι αναφέρονται στο Κεφάλαιο 12, όπου αναλύονται οι ασκούμενες πιέσεις στην περιοχή έρευνας.

10.2.12 ΧΑΛΚΟΣ (Cu)

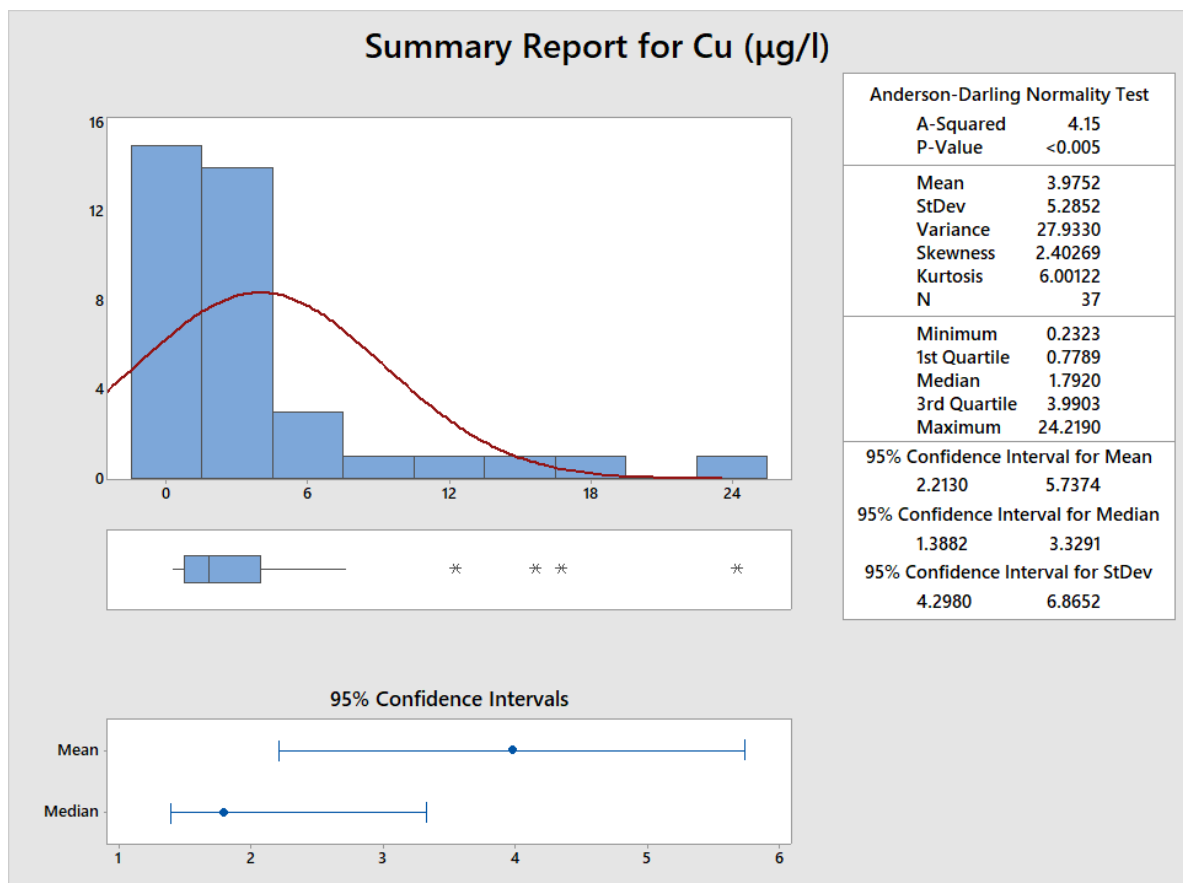
Οι συγκεντρώσεις χαλκού, όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 10.23 δεν αποτελούν κανονική κατανομή, όπως προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

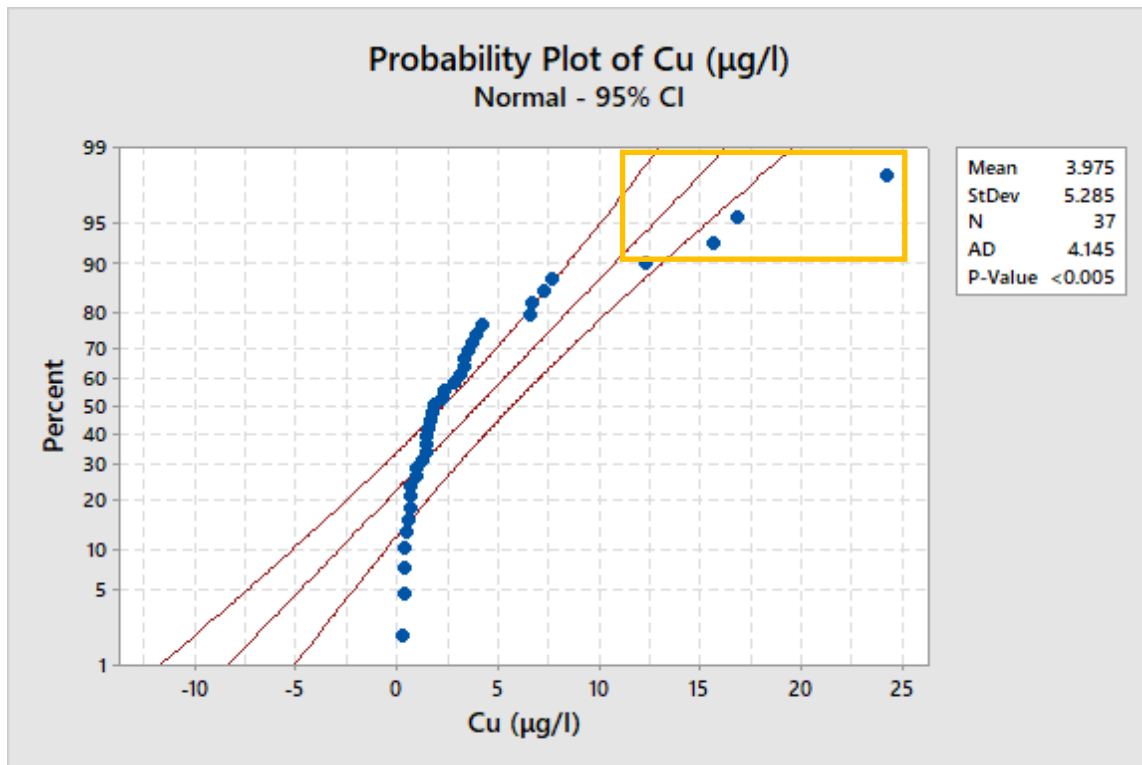
β) ασυμμετρία (Skewness): μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις χαλκού, όπως αυτές προκύπτουν από το Διάγραμμα 10.23, είναι 24.22 μg/L και 0.23 μg/L αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 1.79 μg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών (b+2S) είναι 12.36 μg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις LB110 (24.22 μg/L), LB148 (16.77 μg/L) και Λ41 (15.66 μg/L). Οι ακραίες αυτές τιμές αποτυπώνονται στο αντίστοιχο θηκόγραμμα του ίδιου διαγράμματος με τη μορφή αστερίσκων. Η τιμή της γεώτρησης SR39 (12.24 μg/L) είναι πολύ κοντά στο ανώτερο όριο χωρίς όμως να το ξεπερνά. Αποτυπώνεται και αυτή ως απόμακρη καθώς ξεπερνά κατά πολύ το $1.5 \cdot (Q3 - Q1)$ πάνω από την τιμή Q3. Από το Διάγραμμα 10.24 προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις του χαλκού αποτελούνται από έναν σύνθετο πληθυσμό, καθώς υπάρχουν περισσότερες από μία διακριτές ομάδες. Εντός του πλαισίου φαίνονται οι απόμακρες τιμές που αντιστοιχούν στις προαναφερθείσες 4 γεωτρήσεις (LB110, LB148, Λ41 και SR39).



Διάγραμμα 10.23. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για τα ιόντα Cu.



Διάγραμμα 10.24. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Cu. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Η ανώτερη επιτρεπτή τιμή για το πόσιμο νερό, αναφορικά με τη συγκέντρωση του Cu, είναι 2000 µg/L (ΦΕΚ 3282B/19-9-2017). Οι τιμές που εντοπίστηκαν στα δείγματα της περιοχής είναι πολύ μικρότερες αυτού του ορίου, ωστόσο επειδή παρουσίαζαν κάποια διακύμανση κατασκευάστηκε ο χάρτης της χωρικής τους κατανομής (Κεφάλαιο 8, Παράγραφος 8.8.1, Εικόνες 8.31 και 8.32).

10.2.13 ΣΙΔΗΡΟΣ (ΟΛΙΚΟΣ) (Fe)

Οι συγκεντρώσεις σιδήρου, όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 10.25, δεν αποτελούν κανονική κατανομή, γεγονός που αποτυπώνεται και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

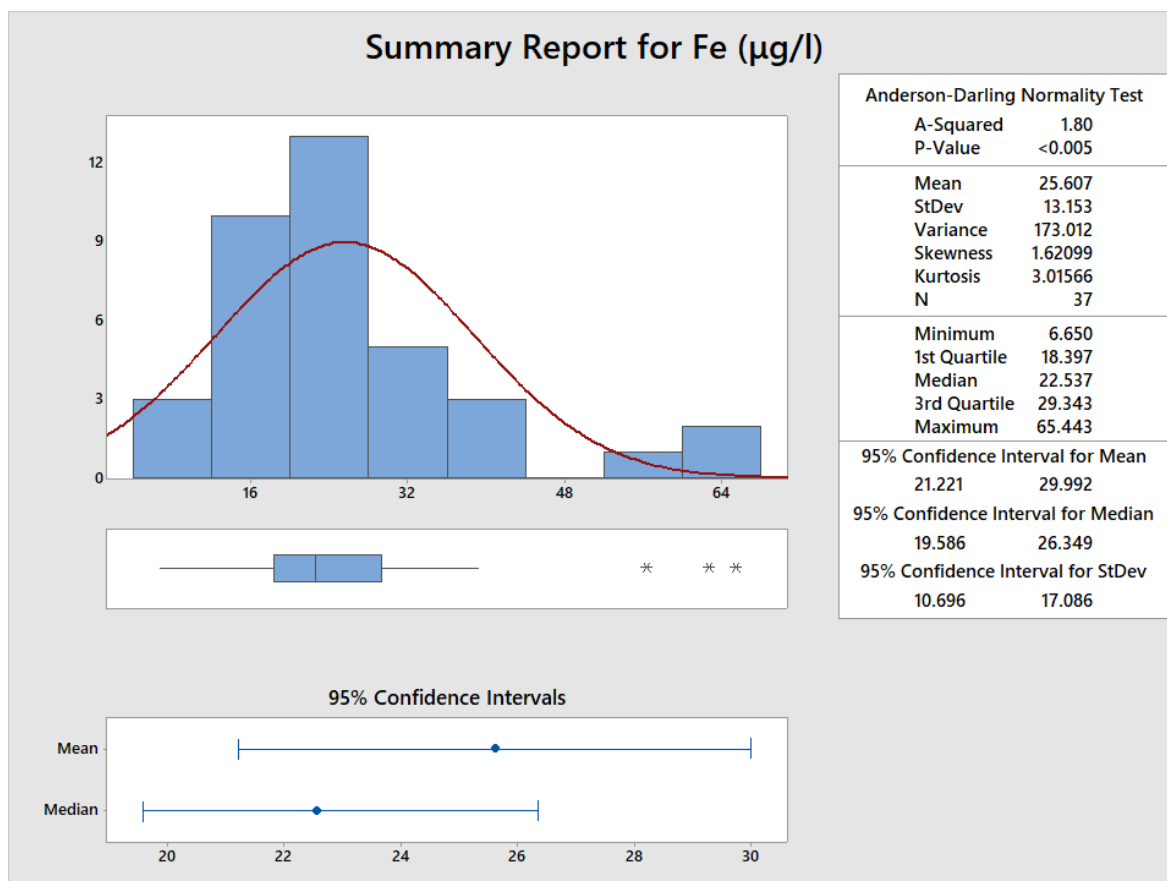
α) P-value: μικρότερη από 0.005

β) ασυμμετρία (Skewness): μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

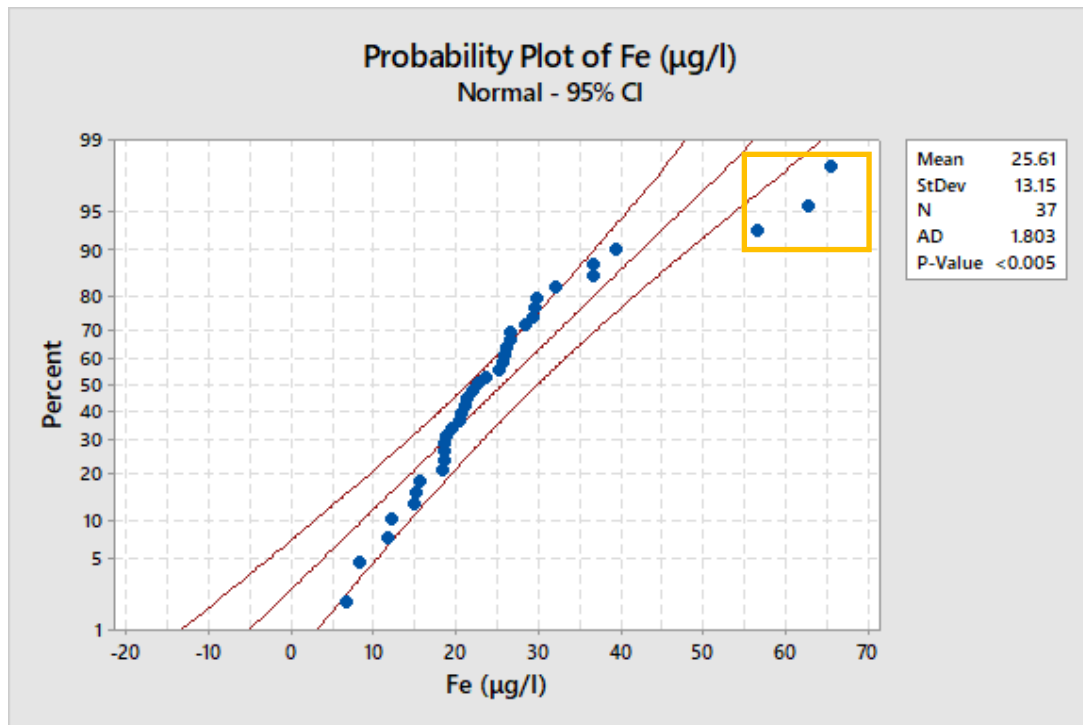
γ) κύρτωση (Kurtosis): μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις σιδήρου, όπως αυτές προκύπτουν από το Διάγραμμα 10.25, είναι 65.44 µg/L και 6.65 µg/L, αντίστοιχα, ενώ η

τιμή της διαμέσου είναι 22.54 $\mu\text{g/L}$. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 48.84 $\mu\text{g/L}$ και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις F1 (65.44 $\mu\text{g/L}$), K1 (62.74 $\mu\text{g/L}$) και SR39 (56.36 $\mu\text{g/L}$). Στο ενσωματωμένο θηκόγραμμα του ίδιου διαγράμματος, οι απόμακρες αυτές τιμές απεικονίζονται με αστερίσκους. Από το διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας (Διάγραμμα 10.26) παρατηρείται ότι τα δεδομένα αποτελούνται, σε γενικές γραμμές, από έναν ενιαίο πληθυσμό με εξαίρεση τις τρεις τελευταίες απόμακρες τιμές (μέσα στο πορτοκαλί ορθογώνιο πλαίσιο), οι οποίες αντιστοιχούν στα δείγματα των γεωτρήσεων F1, K1 και SR39.



Διάγραμμα 10.25. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το Fe.



Διάγραμμα 10.26. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Fe. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Το ανώτατο επιτρεπτό όριο για τη συγκέντρωση του Fe στο πόσιμο νερό είναι τα 200 µg/L (ΦΕΚ 3282B/19-9-2017), κάτι το οποίο απέχει πολύ από τις μέγιστες συγκεντρώσεις που ανιχνεύτηκαν στα δείγματα της περιοχής έρευνας. Όσον αφορά στη χωρική κατανομή των τιμών των συγκεντρώσεων σιδήρου, αυτή παρουσιάσθηκε και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.8.2, Εικόνες 8.33 και 8.34).

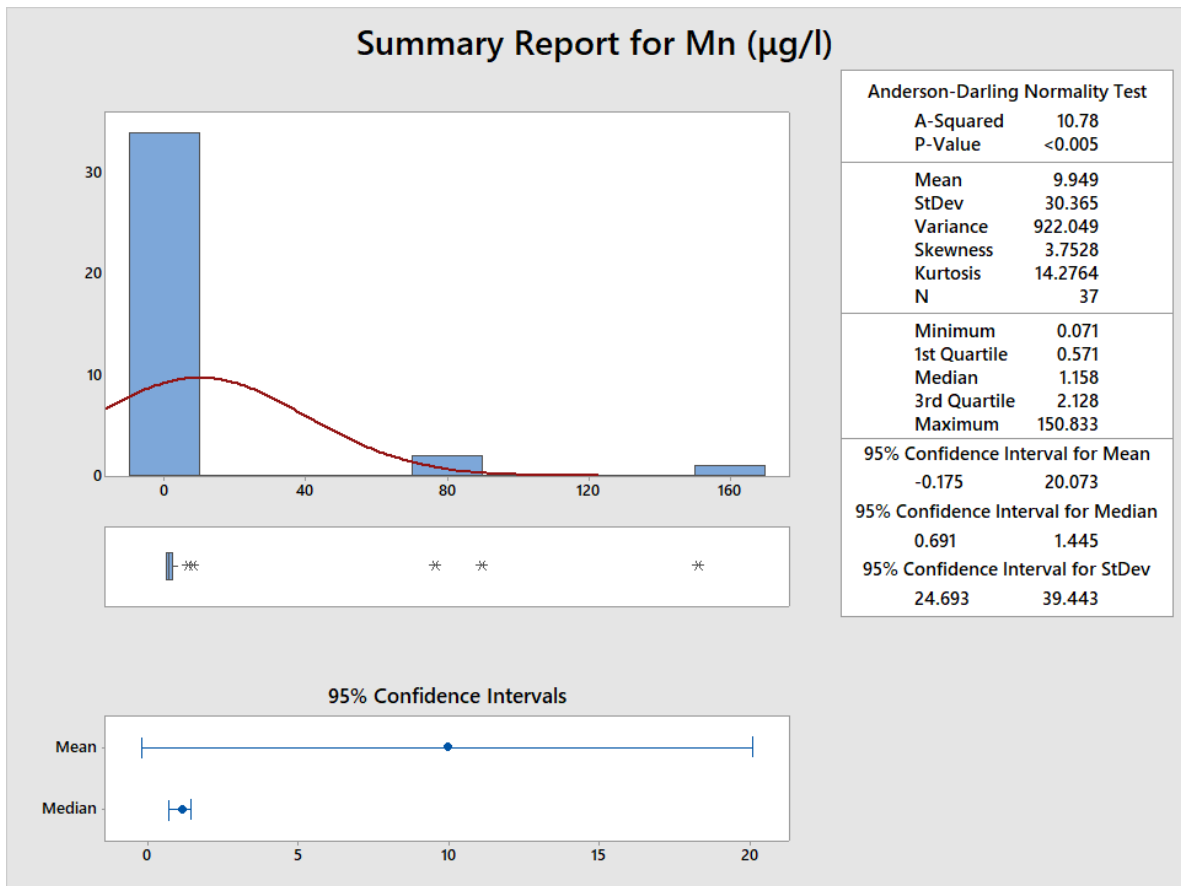
10.2.14 ΜΑΓΓΑΝΙΟ (Mn)

Στο Διάγραμμα 10.27 φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις μαγγανίου δεν αποτελούν κανονική κατανομή, όπως προκύπτει και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

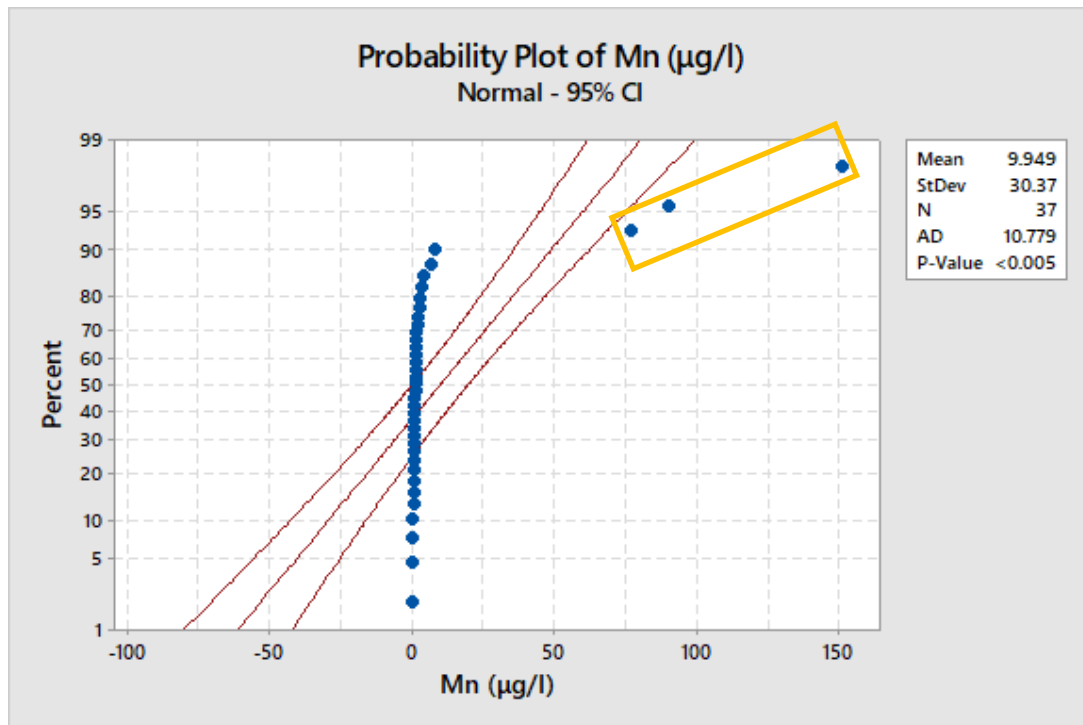
β) ασυμμετρία (Skewness): μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

γ) κύρτωση (Kurtosis): πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.



Διάγραμμα 10.27. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστόγραμμα τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το Mn.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις μαγγανίου, όπως αυτές προκύπτουν από το Διάγραμμα 10.27, είναι 150.83 µg/L και 0.07 µg/L, αντίστοιχα, ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 1.16 µg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 61.89 µg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις K1 (150.83 µg/L), F1 (89.7 µg/L) και AD3 (76.69 µg/L). Οι ακραίες αυτές τιμές αποτυπώνονται στο ενσωματωμένο θηκόγραμμα του με τη μορφή αστερίσκων. Οι τιμές των δειγμάτων των γεωτρήσεων LB251 (8.13 µg/L) και M1 (6.5 µg/L) δεν ξεπερνούν το όριο των φυσιολογικών τιμών ωστόσο αποτυπώνονται ως απόμακρες τιμές στο θηκόγραμμα καθώς ξεπερνούν το $1.5 \cdot (Q3-Q1)$ πάνω από την τιμή Q3. Από το διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας (Διάγραμμα 10.28) παρατηρείται ότι τα δεδομένα αποτελούνται από έναν ενιαίο πληθυσμό με εξαίρεση τις τρεις τελευταίες ακραίες τιμές (μέσα στο πορτοκαλί ορθογώνιο πλαίσιο), οι οποίες αντιστοιχούν στις γεωτρήσεις K1, F1 και AD3.



Διάγραμμα 10.28. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Mn. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Σε γενικές γραμμές η συντριπτική πλειοψηφία των συγκεντρώσεων του μαγγανίου κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Εξαιρέση αποτελούν οι ακραίες τιμές των γεωτρήσεων που ήδη αναφέρθηκαν. Το ανώτατο επιτρεπτό όριο, όπως αυτό θεσπίστηκε για την Ελλάδα από το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017, στο πόσιμο νερό για το Mn είναι 50 µg/L. Τόσο η έλλειψη όσο και η υπερβολική λήψη μαγγανίου μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα δυσλειτουργίας στον ανθρώπινο οργανισμό, όπως αστάθεια, τρέμουλο κ.α. (WHO 2008). Η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων του μαγγανίου παρουσιάστηκε και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 8 (Παράγραφος 8.8.3, Εικόνες 8.35 και 8.36).

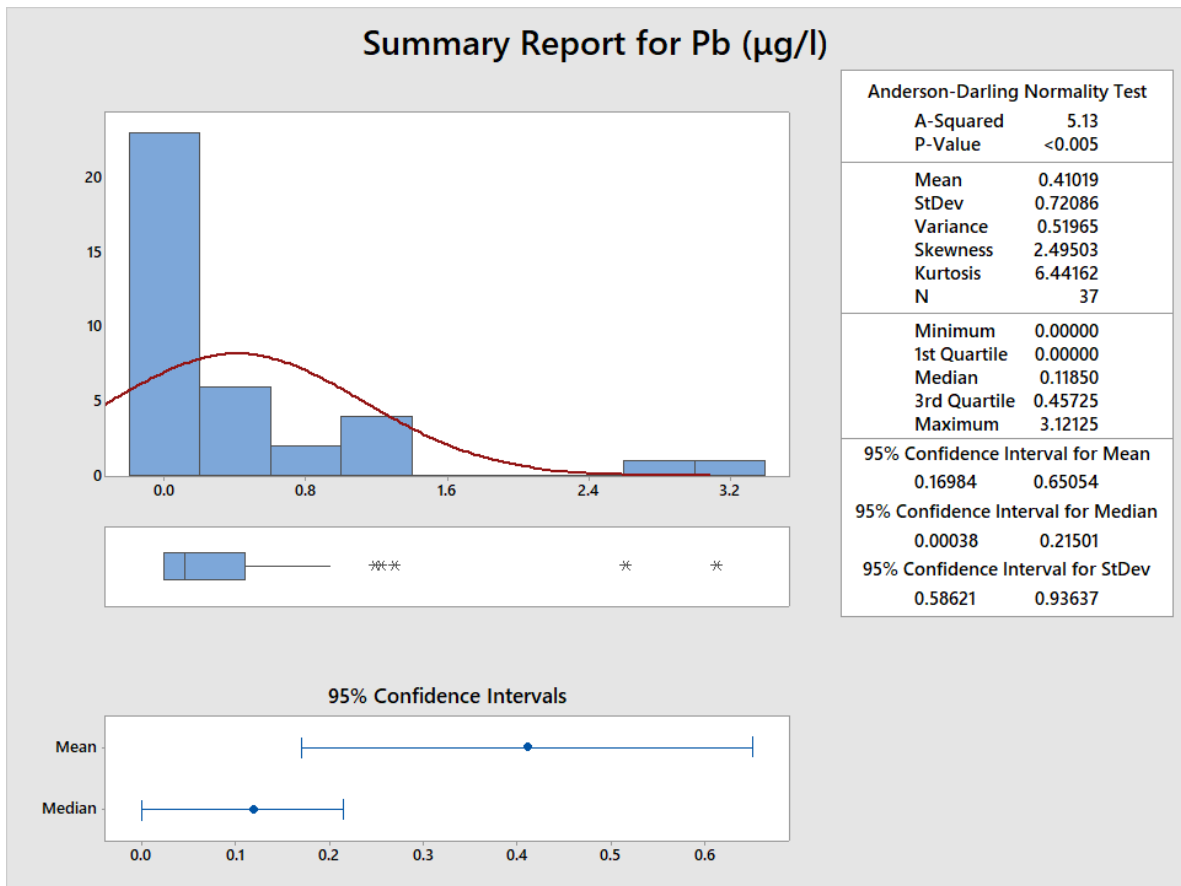
10.2.15 ΜΟΛΥΒΔΟΣ (Pb)

Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 10.29, οι συγκεντρώσεις μόλυβδου δεν αποτελούν κανονική κατανομή. Αυτό φαίνεται και από τις τιμές των παρακάτω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων:

α) P-value: μικρότερη από 0.005

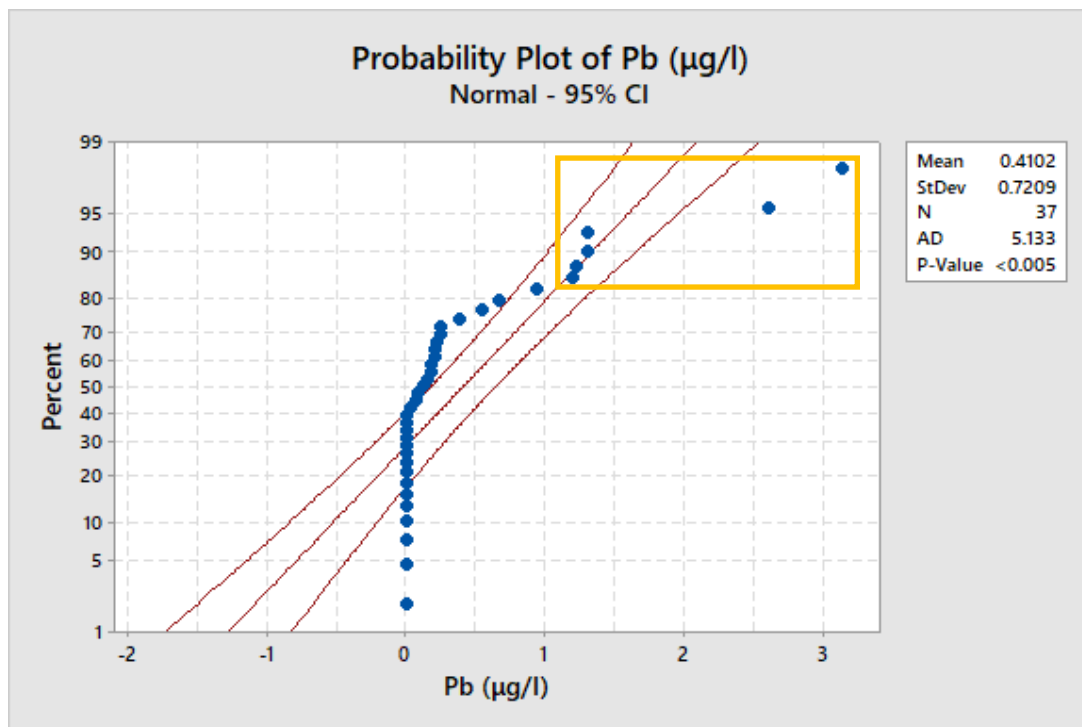
β) ασυμμετρία (Skewness): μεγαλύτερη από το 0 οπότε η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς το δεξιό της κλάδο

γ) κύρτωση (Kurtosis): μεγαλύτερη από το μηδέν, οπότε η κατανομή έχει κυρτότητα μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής.



Διάγραμμα 10.29. Πίνακας στατιστικών περιγραφικών παραμέτρων και στατιστικά διαγράμματα (Ιστογράμμο τιμών, θηκόγραμμα, διάγραμμα απεικόνισης διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% για το μέσο και το διάμεσο) για το Pb.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις μόλυβδου, όπως αυτές προκύπτουν από το Διάγραμμα 10.29, είναι 3.12 µg/L και 0.00 µg/L αντίστοιχα ενώ η τιμή της διαμέσου είναι 0.12 µg/L. Το άνω όριο των φυσιολογικών τιμών ($b+2S$) είναι 1.56 µg/L και το ξεπερνούν τα δείγματα από τις γεωτρήσεις AD3 (2.61 µg/L) και ΕΛ55 (3.12 µg/L). Οι ακραίες αυτές τιμές αποτυπώνονται στο ενσωματωμένο θηκόγραμμα του Διαγράμματος 10.29 με τη μορφή αστερίσκων. Επιπλέον, οι τιμές των δειγμάτων νερού από τις γεωτρήσεις AD2 (1.3µg/L), 75Λ (1.3 µg/L), LB110 (1.19 µg/L) και SR39 (1.22 µg/L) δεν ξεπερνούν όριο φυσιολογικών τιμών ωστόσο αποτυπώνονται ως απόμακρες τιμές στο θηκόγραμμα καθώς ξεπερνούν το $1.5*(Q3-Q1)$ πάνω από την τιμή Q3. Από το διάγραμμα πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας (Διάγραμμα 10.30) προκύπτει ότι τα δεδομένα αποτελούνται από ένα σύνθετο πληθυσμό, καθώς διακρίνονται περισσότερες από μιας ομάδες. Εντός του πορτοκαλί πλαισίου διακρίνονται οι ακραίες τιμές που αντιστοιχούν σε δείγματα από τις προαναφερθείσες γεωτρήσεις AD3 και ΕΛ55, οι οποίες ξεπερνούν το ανώτερο όριο φυσιολογικών τιμών αλλά και εκείνες των γεωτρήσεων AD2, 75Λ, LB110 και SR39 που θεωρούνται απόμακρες, για το λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω, χωρίς να ξεπερνούν το κατώφλι.



Διάγραμμα 10.30. Διάγραμμα πιθανοτήτων για τις συγκεντρώσεις Pb. Απεικονίζει πιθανότητες και αθροιστική συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, με ενσωματωμένες τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν να διαστήματα εμπιστοσύνης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο οι απόμακρες τιμές.

Το ανώτατο επιτρεπτό όριο, όπως αυτό θεσπίστηκε για την Ελλάδα από το ΦΕΚ 3282B/19-9-2017, στο πόσιμο νερό για τον Pb είναι 10 µg/L. Ο μόλυβδος είναι γνωστός για τις τοξικές του ιδιότητες, όταν αυτός λαμβάνεται σε υψηλές συγκεντρώσεις (αναιμία, ανωμαλίες στο κεντρικό νευρικό σύστημα κ.α.). Επίσης η ανεπάρκεια μολύβδου από πειράματα σε ζώα, έδειξε ότι προκαλεί μειωμένο ρυθμό ανάπτυξης και προβλήματα στο μεταβολισμό του σιδήρου. Με βάση τις συγκεντρώσεις του μολύβδου στην περιοχή έρευνας δεν προκύπτει κάτι ανησυχητικό για το υπόγειο νερό δεδομένου ότι η μέγιστη συγκέντρωση που ανιχνεύτηκε ήταν 3.12 µg/L. Η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων του μολύβδου παρουσιάστηκε στις Εικόνες 8.37 και 8.38 (Κεφάλαιο 8, Παράγραφος 8.8.4).

10.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ (CORRELATION ANALYSIS)

Η ανάλυση συσχέτισης αποτελεί μία τεχνική στατιστικής ανάλυσης, η οποία διερευνά το βαθμό διασύνδεσης μεταξύ δύο παραμέτρων, χωρίς όμως αυτές να διαχωρίζονται σε εξαρτημένη και ανεξάρτητη μεταβλητή. Για το λόγο αυτό, ο ισχυρός βαθμός συσχέτισης των δύο μεταβλητών δε σημαίνει αιτιότητα, ότι δηλαδή η μία μεταβλητή προκαλεί την άλλη, αλλά υπάρχει το ενδεχόμενο μία τρίτη παράμετρος να επηρεάζει και τις δύο αυτές μεταβλητές και να προκαλείται με αυτόν τον τρόπο η συσχέτισή τους.

Υπάρχουν αρκετοί συντελεστές με τους οποίους μπορεί να εφαρμοσθεί η συγκεκριμένη τεχνική ανάλυσης. Ο πιο διαδεδομένος από όλους είναι ο συντελεστής γραμμικής

συσχέτισης, κατά Pearson (r) και είναι αυτός που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα μελέτη. Αποτελεί έναν αριθμητικό δείκτη της συσχέτισης μεταξύ των δύο παραμέτρων και παίρνει τιμές από -1 (τέλεια αρνητική συσχέτιση) έως $+1$ (τέλεια θετική συσχέτιση). Θετική συσχέτιση συνεπάγεται αύξηση των τιμών της μίας μεταβλητής όταν αυξάνονται οι τιμές της άλλης και αρνητική συσχέτιση συνεπάγεται αύξηση των τιμών της μίας μεταβλητής με ταυτόχρονη μείωση των τιμών της άλλης. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν ως όρια συσχέτισης, οι τιμές που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα σε παρόμοιες μελέτες και τα οποία θεωρούνται ασφαλή για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων (Liu et al. 2003, Tziritis 2008, Shyu et al. 2011). Τα όρια αυτά φαίνονται παρακάτω.

$0.50 \leq r \leq 0.75$	(μέτρια θετική συσχέτιση)
$0.75 \leq r \leq 1.00$	(ισχυρή θετική συσχέτιση)
$-0.50 \geq r \geq -0.75$	(μέτρια αρνητική συσχέτιση)
$-0.75 \geq r \geq -1.00$	(ισχυρή αρνητική συσχέτιση)

Γενικά, στα υδατικά συστήματα εμφανίζονται τρεις διαφορετικού τύπου συσχετίσεις μεταξύ των υδροχημικών παραμέτρων (Douglas & Leo 1977, Rao et al. 1996, Λάμπας 2018):

(α) μια ισχυρά ανταγωνιστική σχέση μεταξύ ιόντων που έχουν ίδιο φορτίο και διαφορετικό σθένος,

(β) μια ισχυρή χημική συγγένεια μεταξύ ιόντων με αντίθετα φορτία και ίδιο σθένος και

(γ) μια μη ανταγωνιστική σχέση μεταξύ ιόντων με το ίδιο είδος φορτίου και το ίδιο σθένος.

Στους Πίνακες 10.2 έως 10.5 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης συσχέτισης των υδροχημικών δεδομένων της περιοχής μελέτης, για κάθε μία από τις 4 περιόδους δειγματοληψίας.

Πίνακας 10.2. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των υδροχημικών δεδομένων για την 1η περίοδο δειγματοληψίας (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2016). Με έντονη πορτοκαλί απόχρωση μέτρια συσχέτιση (θετική ή αρνητική) ενώ με κόκκινη απόχρωση ισχυρή συσχέτιση (θετική ή αρνητική).

	pH	EC	K	Na	Ca	Mg	CaCO ₃	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	NH ₄	NO ₂	B	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	TDS	
pH	1.000																				
EC	-0.596	1.000																			
K	-0.410	0.418	1.000																		
Na	-0.100	0.635	0.164	1.000																	
Ca	-0.698	0.779	0.553	0.111	1.000																
Mg	-0.272	0.867	0.216	0.809	0.425	1.000															
CaCO ₃	-0.605	0.965	0.480	0.491	0.885	0.798	1.000														
Cl	-0.473	0.760	0.498	0.595	0.507	0.751	0.724	1.000													
HCO ₃	-0.528	0.849	0.367	0.502	0.748	0.678	0.847	0.399	1.000												
SO ₄	-0.181	0.775	0.233	0.739	0.417	0.841	0.711	0.620	0.557	1.000											
NO ₃	-0.614	0.739	0.534	0.321	0.712	0.534	0.749	0.806	0.440	0.397	1.000										
NH ₄	-0.348	0.105	0.275	-0.034	0.348	-0.093	0.184	0.140	0.219	0.014	0.130	1.000									
NO ₂	0.097	-0.142	-0.060	0.276	-0.338	-0.050	-0.251	-0.053	-0.184	-0.056	-0.164	-0.285	1.000								
B	-0.382	0.209	0.386	0.246	0.365	-0.009	0.238	0.120	0.232	0.165	0.196	0.484	0.188	1.000							
Cu	0.071	-0.127	-0.061	-0.079	0.023	-0.047	-0.009	-0.102	-0.019	-0.103	-0.101	0.406	-0.160	0.156	1.000						
Fe	-0.190	-0.064	-0.078	-0.145	0.100	-0.161	-0.016	-0.105	-0.084	-0.015	-0.183	0.281	0.223	0.380	0.143	1.000					
Mn	-0.014	0.236	-0.127	0.284	0.173	0.324	0.282	0.115	0.290	0.207	0.100	0.076	0.059	0.213	0.361	0.016	1.000				
Pb	-0.334	-0.075	0.310	-0.214	0.235	-0.231	0.038	-0.027	-0.020	-0.152	0.030	0.533	0.011	0.518	0.216	0.479	0.074	1.000			
Cd	0.006	0.092	-0.084	0.081	0.161	0.175	0.198	-0.021	0.237	0.052	-0.019	0.293	-0.151	0.216	0.824	-0.001	0.740	0.104	1.000		
TDS	-0.576	0.986	0.486	0.640	0.807	0.845	0.972	0.738	0.881	0.772	0.735	0.183	-0.168	0.267	-0.066	-0.095	0.270	-0.029	0.150	1.000	

Πίνακας 10.3. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των υδροχημικών δεδομένων για την 2η περίοδο δειγματοληψίας (Απρίλιος-Μάιος 2017). Με έντονη πορτοκαλί απόχρωση μέτρια συσχέτιση (θετική ή αρνητική) ενώ με κόκκινη απόχρωση ισχυρή συσχέτιση (θετική ή αρνητική).

	pH	EC	K	Na	Ca	Mg	CaCO ₃	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	NH ₄	NO ₂	B	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	TDS	
pH	1.000																				
EC	-0.700	1.000																			
K	-0.356	0.510	1.000																		
Na	-0.128	0.421	0.180	1.000																	
Ca	-0.701	0.784	0.512	-0.040	1.000																
Mg	-0.551	0.819	0.285	0.599	0.470	1.000															
CaCO ₃	-0.742	0.926	0.485	0.261	0.906	0.800	1.000														
Cl	-0.531	0.726	0.473	0.481	0.492	0.657	0.650	1.000													
HCO ₃	-0.643	0.777	0.404	0.267	0.717	0.764	0.855	0.325	1.000												
SO ₄	-0.276	0.676	0.195	0.701	0.355	0.804	0.628	0.599	0.479	1.000											
NO ₃	-0.625	0.759	0.477	0.241	0.705	0.515	0.727	0.826	0.370	0.432	1.000										
NH ₄	-0.130	0.107	-0.045	-0.005	-0.080	0.286	0.083	-0.123	0.327	0.019	-0.072	1.000									
NO ₂	-0.201	0.189	0.046	0.201	-0.017	0.465	0.212	-0.073	0.542	0.150	-0.134	0.548	1.000								
B	-0.161	0.052	0.052	0.263	0.006	0.088	0.046	-0.009	0.153	-0.018	-0.121	-0.151	-0.015	1.000							
Cu	0.027	-0.142	0.003	-0.189	-0.007	-0.171	-0.087	-0.184	-0.044	-0.263	-0.078	0.087	-0.123	-0.060	1.000						
Fe	0.091	-0.151	0.048	0.175	-0.232	0.028	-0.144	-0.135	-0.023	0.071	-0.139	0.354	0.246	-0.134	0.123	1.000					
Mn	-0.082	0.012	-0.107	0.146	-0.200	0.300	0.008	-0.166	0.322	0.029	-0.214	0.817	0.745	-0.020	-0.041	0.529	1.000				
Pb	-0.194	0.277	0.673	0.135	0.325	0.021	0.231	0.298	0.212	-0.015	0.234	-0.097	-0.075	0.127	0.081	-0.080	-0.071	1.000			
Cd	0.092	-0.013	-0.091	0.061	-0.032	0.088	0.021	0.034	-0.037	0.105	-0.077	0.049	-0.037	-0.054	-0.123	-0.033	-0.034	-0.056	1.000		
TDS	-0.711	0.946	0.501	0.446	0.814	0.871	0.972	0.692	0.873	0.720	0.723	0.141	0.294	0.065	-0.126	-0.065	0.094	0.245	-0.009	1.000	

Πίνακας 10.4. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των υδροχημικών δεδομένων για την 3η περίοδο δειγματοληψίας (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2017). Με έντονη πορτοκαλί απόχρωση μέτρια συσχέτιση (θετική ή αρνητική) ενώ με κόκκινη απόχρωση ισχυρή συσχέτιση (θετική ή αρνητική).

	pH	EC	K	Na	Ca	Mg	CaCO ₃	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	NH ₄	NO ₂	B	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	TDS	
pH	1.000																				
EC	-0.432	1.000																			
K	-0.363	0.552	1.000																		
Na	0.268	0.429	0.085	1.000																	
Ca	-0.596	0.727	0.526	-0.191	1.000																
Mg	-0.160	0.837	0.290	0.551	0.336	1.000															
CaCO ₃	-0.486	0.949	0.511	0.178	0.853	0.778	1.000														
Cl	-0.297	0.734	0.460	0.380	0.399	0.683	0.645	1.000													
HCO ₃	-0.331	0.795	0.445	0.260	0.657	0.635	0.790	0.223	1.000												
SO ₄	-0.117	0.653	0.244	0.430	0.351	0.758	0.654	0.656	0.262	1.000											
NO ₃	-0.556	0.646	0.514	0.091	0.568	0.365	0.581	0.819	0.193	0.387	1.000										
NH ₄	-0.008	0.312	0.160	0.092	0.101	0.400	0.289	-0.120	0.693	-0.112	-0.191	1.000									
NO ₂	0.204	0.004	0.060	0.500	-0.377	0.124	-0.183	-0.110	0.171	-0.172	-0.294	0.345	1.000								
B	0.169	0.381	0.228	0.857	-0.131	0.376	0.121	0.227	0.365	0.159	0.067	0.273	0.656	1.000							
Cu	-0.119	0.072	0.491	-0.178	0.222	-0.012	0.142	0.006	0.089	0.017	0.098	-0.084	-0.146	-0.115	1.000						
Fe	-0.155	0.174	0.242	-0.089	0.119	0.176	0.177	-0.084	0.451	-0.163	-0.079	0.668	0.139	0.089	0.089	1.000					
Mn	-0.073	-0.143	0.076	-0.028	-0.280	0.007	-0.183	-0.166	0.056	-0.176	-0.264	0.332	0.656	0.168	-0.118	0.230	1.000				
Pb	-0.126	-0.059	0.083	-0.091	0.029	-0.113	-0.044	-0.003	-0.057	-0.071	0.014	-0.049	-0.098	-0.085	0.191	0.638	-0.053	1.000			
Cd	0.010	0.102	-0.073	0.045	0.047	0.155	0.117	0.213	-0.122	0.330	0.140	-0.255	-0.284	-0.193	0.038	-0.002	-0.317	0.295	1.000		
TDS	-0.429	0.991	0.559	0.387	0.754	0.830	0.963	0.671	0.836	0.660	0.594	0.360	-0.024	0.348	0.094	0.212	-0.122	-0.056	0.079	1.000	

Πίνακας 10.5. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των υδροχημικών δεδομένων για την 4η περίοδο δειγματοληψίας (Απρίλιος-Μάιος 2018). Με έντονη πορτοκαλί απόχρωση μέτρια συσχέτιση (θετική ή αρνητική) ενώ με κόκκινη απόχρωση ισχυρή συσχέτιση (θετική ή αρνητική).

	pH	EC	K	Na	Ca	Mg	CaCO ₃	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	NH ₄	NO ₂	B	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	TDS	
pH	1.000																				
EC	-0.634	1.000																			
K	-0.335	0.556	1.000																		
Na	-0.078	0.393	0.197	1.000																	
Ca	-0.526	0.907	0.551	0.074	1.000																
Mg	-0.696	0.841	0.299	0.506	0.581	1.000															
CaCO ₃	-0.651	0.983	0.514	0.251	0.948	0.810	1.000														
Cl	-0.614	0.796	0.528	0.453	0.555	0.813	0.718	1.000													
HCO ₃	-0.451	0.764	0.329	0.137	0.838	0.566	0.825	0.251	1.000												
SO ₄	-0.389	0.726	0.345	0.532	0.582	0.700	0.693	0.527	0.580	1.000											
NO ₃	-0.509	0.886	0.536	0.459	0.704	0.804	0.822	0.912	0.415	0.634	1.000										
NH ₄	-0.315	0.006	-0.126	0.393	-0.212	0.302	-0.034	0.072	0.063	-0.045	-0.060	1.000									
NO ₂	-0.258	0.061	-0.066	0.200	-0.045	0.327	0.096	-0.056	0.289	0.130	-0.121	0.534	1.000								
B	0.088	-0.010	0.007	-0.099	0.034	-0.038	0.010	-0.012	-0.020	0.137	-0.026	-0.088	-0.053	1.000							
Cu	0.131	0.023	0.109	-0.025	0.049	0.012	0.040	0.001	0.031	-0.019	0.042	-0.042	0.177	-0.098	1.000						
Fe	-0.054	0.008	-0.215	0.190	-0.143	0.240	-0.009	0.036	0.062	-0.090	0.008	0.637	0.340	-0.201	0.110	1.000					
Mn	0.093	-0.178	-0.150	0.271	-0.275	-0.083	-0.230	-0.159	-0.079	-0.164	-0.178	0.736	-0.009	-0.035	-0.059	0.450	1.000				
Pb	0.090	-0.273	-0.095	-0.227	-0.237	-0.203	-0.250	-0.116	-0.328	-0.293	-0.172	-0.026	-0.161	-0.130	0.415	0.373	-0.070	1.000			
Cd	-0.241	0.297	0.268	-0.094	0.338	0.251	0.342	0.211	0.247	0.488	0.253	-0.209	0.124	0.027	0.106	-0.113	-0.336	0.007	1.000		
TDS	-0.582	0.978	0.514	0.381	0.914	0.816	0.978	0.673	0.862	0.783	0.806	0.010	0.136	0.001	0.032	0.016	-0.159	-0.311	0.336	1.000	

Από τους παραπάνω πίνακες μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

α) όσον αφορά την EC, σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας παρατηρείται ισχυρή θετική συσχέτιση με τα Ca^{2+} , Mg^{2+} , CaCO_3 , HCO_3^- και TDS, μέση προς ισχυρή θετική συσχέτιση με τα NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- και μέση θετική συσχέτιση με το K^+ εκτός της πρώτης περιόδου, όπου η μέση αυτή συσχέτιση παρουσιάζεται με το Na^+ . Τέλος, μέση αρνητική συσχέτιση παρουσιάζει με το pH. Τα κύρια ιόντα με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις είναι αυτά που συνεισφέρουν στην τιμή της EC σε ένα υδατικό διάλυμα, οπότε δικαιολογείται η ισχυρή συσχέτιση των κύριων ιόντων με αυτήν.

β) τα Cl^- και στις τέσσερις περιόδους παρουσιάζουν ισχυρή θετική συσχέτιση με τα NO_3^- και μέτρια θετική συσχέτιση με τα SO_4^{2-} και τα TDS. Η ανθρωπογενής ρύπανση είναι η κοινή αιτία των συσχετίσεων αυτών, καθώς η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει έντονη αγροτική δραστηριότητα με συστηματική χρήση αζωτούχων, φωσφορούχων και χλωριούχων λιπασμάτων.

γ) τα Mg^{2+} παρουσιάζουν συνολικά μια ισχυρή θετική συσχέτιση με το CaCO_3 , τα SO_4^{2-} και τα TDS καθώς και μία μέτρια (και κάποιες φορές ισχυρή) θετική συσχέτιση με τα Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- και τα Na^+ . Οι δολομικές εμφανίσεις στα ανθρακικά πετρώματα της περιοχής δικαιολογούν την ισχυρή συσχέτιση του μαγνησίου με το CaCO_3 , ενώ Mg^{2+} και SO_4^{2-} συνυπάρχουν σε διάφορα εδαφοβελτιωτικά προϊόντα.

δ) τα Ca^{2+} παρουσιάζουν συνολικά (i) ισχυρή θετική συσχέτιση με το CaCO_3 , τα HCO_3^- και τα TDS (ii) μέτρια έως ισχυρή θετική συσχέτιση με τα NO_3^- (iii) μέτρια θετική συσχέτιση με τα K^+ και (iv) μέτρια αρνητική συσχέτιση με το pH. Η διαλυτοποίηση του CaCO_3 αποτελεί βασική χημική διεργασία που λαμβάνει χώρα στην περιοχή έρευνας, με αποτέλεσμα την ισχυρή συσχέτιση Ca^{2+} , CaCO_3 , HCO_3^- . Επίσης, η συσχέτιση Ca^{2+} με τα NO_3^- αποδίδεται στην κοινή παρουσία τους σε αζωτούχα λιπάσματα και εδαφοβελτιωτικά, αλλά και στον εντοπισμό τους σε κοινές ζώνες, για διαφορετικούς λόγους: Ca^{2+} στα δυτικά κράσπεδα της λεκάνης λόγω της ανάπτυξης του ανθρακικού καρστικού συστήματος, NO_3^- στην ίδια ζώνη λόγω έντονης καλλιεργητικής δραστηριότητας σε μια ζώνη φρεάτιας υδροφορίας.

ε) Το CaCO_3 , εκτός των συσχετίσεων που ήδη αναφέρθηκαν, παρουσιάζει ισχυρή θετική συσχέτιση με τα TDS, μέτρια έως ισχυρή θετική συσχέτιση με τα HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} και μέτρια αρνητική συσχέτιση με το pH. Οι ισχυρές συσχετίσεις του CaCO_3 με HCO_3^- και NO_3^- αποδίδονται στην διαλυτοποίηση των ανθρακικών πετρωμάτων και σε λιπάσματα, κατ'αντιστοιχία με τις ίδιες συσχετίσεις του ασβεστίου. Επίσης, το θειικό ασβέστιο χρησιμοποιείται πολύ συχνά για τη βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους, την παροχή θρεπτικών στοιχείων αλλά και τη ρύθμιση του pH, γεγονός στο οποίο αποδίδονται και οι συσχετίσεις CaCO_3 - SO_4^{2-} και CaCO_3 -pH.

στ) Τέλος, (i) τα Na^+ παρουσιάζουν μέτρια θετική συσχέτιση με τα SO_4^{2-} (ii) τα TDS μέτρια έως ισχυρή συσχέτιση με τα NO_3^- καθώς και μέτρια αρνητική συσχέτιση με το pH, (iii) τα K^+ παρουσιάζουν μέτρια θετική συσχέτιση με τα NO_3^- και (iv) το Mn παρουσιάζει ανά περίοδο μέτρια έως ισχυρή συσχέτιση είτε με τα NO_2^- είτε με τα NH_4^+ είτε και με τα δύο. Η συσχέτιση

του Na^+ με τα SO_4^{2-} , σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν και στην υδροχημική ταξινόμηση (Παράγραφος 9.2), αποδίδεται στην επικράτηση φαινομένων ανάμειξης και ιοντοεναλλαγής στα νερά υδροχημικού τύπου 2, τα οποία καταλαμβάνουν το ανατολικό τμήμα της περιοχής. Η σχέση K-NO_3^- αποδίδεται σε λιπάσματα που εφαρμόζονται ως πηγή καλίου με την παρουσία των νιτρικών ιόντων να διευκολύνει την απορρόφησή του. Τέλος, η συσχέτιση Mn με NO_2^- και NH_4^+ σχετίζεται με τις διαφορετικές οξειδοαναγωγικές συνθήκες των υδροφόρων. Αν και δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με τη συσχέτιση του Mn με τα υπόγεια ύδατα, τεκμηριώνεται ωστόσο (Christensen et al. 2000, Tziritis et al. 2016) ότι το Mn^{4+} δρα ως οξειδωτικό μέσο σε αναγωγικό περιβάλλον, στο οποίο μπορεί να υπάρχουν μεγάλες ποσότητες NH_4^+ . Επίσης, τα NO_2^- αποτελούν το προϊόν του πρώτου σταδίου της νιτροποίησης κατά το οποίο η οξείδωση της αμμωνίας οδηγεί στην παραγωγή τους.

10.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Ο χημισμός των υπόγειων υδάτων εξαρτάται από πλήθος παραγόντων μεταξύ των οποίων η λιθολογία, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, το τοπογραφικό ανάγλυφο, η τεκτονική, το κλίμα κ.α. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η πολυπαραγοντική αυτή εξάρτηση της χημικής σύστασης δημιουργεί μια σύνθετη χωρική και χρονική μεταβλητότητα με αποτέλεσμα να γίνεται ακόμα δυσκολότερο το έργο της ερμηνείας των χημικών αποτελεσμάτων. Ένα χρήσιμο, αλλά και σύγχρονο, εργαλείο για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση πολυμεταβλητών στατιστικών τεχνικών στα δεδομένα που προκύπτουν από τις χημικές αναλύσεις των υπόγειων υδάτων (Guler et al. 2012, Voutsis et al. 2015, Tziritis et al. 2017).

Η πολυπαραμετρική στατιστική ανάλυση είναι μια μέθοδος απλοποίησης, διαχείρισης και εκτίμησης των δεδομένων, με σκοπό την εξαγωγή και αξιολόγηση χημικών σχέσεων, μεταξύ των διάφορων δειγμάτων που τις αποτελούν (Barzegar et al. 2016, Walter et al. 2019, Chai et al. 2020). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εφαρμόστηκαν, με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου IBM SPSS Statistics 18, οι εξής τεχνικές πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης:

α) Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis)

β) Ανάλυση συμπλέγματος (Cluster Analysis),

οι οποίες και αποτελούν τις δύο βασικότερες μεθόδους πολυπαραμετρικής ανάλυσης.

Όπως προέκυψε από την ανάλυση των περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων, οι οποίες αναλύθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, η συντριπτική πλειοψηφία των παραμέτρων των δειγμάτων δεν χαρακτηρίζονται από ομαλή κατανομή των πληθυσμών τους. Σε αυτήν την περίπτωση, η εφαρμογή των μεθόδων που αναφέρθηκαν, μπορεί να μη δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα ή/και να δώσει αποτελέσματα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα (Reinmann and Filzmoser 1999). Λύση στο πρόβλημα αυτό, όπως

αναφέρεται στη συνέχεια, δίνεται με τη χρήση της μεθόδου κανονικοποίησης των αναλύσεων των δειγμάτων, τα αποτελέσματα της οποίας είναι αρκετά ικανοποιητικά σε περιπτώσεις μη κανονικής κατανομής πληθυσμών.

10.4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ (PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS)

Γενικά με τη μέθοδο της Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών γίνεται προσπάθεια να μειωθεί ο αριθμός των μεταβλητών (variables), τις οποίες επιθυμούμε να αναλύσουμε. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με την εξαγωγή ενός νέου μικρού αριθμού μεταβλητών, οι οποίες έχουν την ιδιότητα να είναι γραμμικοί συνδυασμοί (linear combinations) των αρχικών μεταβλητών και παράλληλα να μη συσχετίζονται μεταξύ τους. Οι νέες αυτές μεταβλητές ονομάζονται Κύριες Συνιστώσες (Principal Components).

Ως μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (ΑΚΣ) έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στην περίπτωση της διαχείρισης υδροχημικών δεδομένων. Πολλοί ερευνητές (Chatfield & Collins 1980, Wold et al. 1987, Pisinaras 2008, Jolliffe 2011, Rasmus & Smilde 2014, Vrouhakis et al. 2019b) διαχρονικά χρησιμοποίησαν τη μέθοδο αυτή σε εργασίες και μελέτες με στόχο την εύρεση ενός μικρού αριθμού συνιστωσών, οι οποίες εξηγούν τη διακύμανση των αναλυτικών δεδομένων, που προέρχονται από τη μέτρηση των τιμών των παραμέτρων σε έναν ορισμένο αριθμό δειγμάτων. Έτσι με τη χρήση της μεθόδου ΑΚΣ οι μετρούμενες υδροχημικές παράμετροι ομαδοποιούνται ανάλογα με τη διακύμανσή τους και με τον τρόπο αυτό δύναται να εντοπισθούν πιθανές διεργασίες ή/και πηγές που τις επηρεάζουν (Olmez 1989, Deverel & Millard 1988).

Με βάση την ΑΚΣ ο αρχικός πίνακας των δεδομένων, ο οποίος αποτελείται από ορισμένο αριθμό δειγμάτων και υδροχημικών παραμέτρων μετασχηματίζεται στο γινόμενο δύο νέων πινάκων. Οι δύο νέοι αυτοί πίνακες είναι ο πίνακας των φορτίων (loadings) και ο πίνακας των επιδόσεων (scores). Φορτία ονομάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των αρχικών μεταβλητών και των κύριων συνιστωσών και δείχνουν την ένταση της δράσης που αναπτύσσουν οι αρχικές μεταβλητές για τη δημιουργία των συνιστωσών, σε πόσο βαθμό είναι δηλαδή, υπεύθυνες γι' αυτές. Η ένταση της σχέσης είναι εξαιρετικά ισχυρή σε τιμές κοντά στο ± 1 (ισχυρή θετική ή αρνητική συσχέτιση) και ασήμαντη σε τιμές κοντά στο μηδέν. Έτσι, όσο υψηλότερα είναι τα φορτία τόσο σημαντικότερες είναι οι υποψήφιος μεταβλητές για το σχηματισμό των κύριων συνιστωσών. Οι τιμές του πίνακα των επιδόσεων αποτελούν μέτρο της επιρροής της κάθε κύριας συνιστώσας σε κάθε δείγμα.

Πριν την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι απαραίτητο να ελεγχθεί αν το σύνολο των δεδομένων είναι ικανοποιητικό για την εφαρμογή της. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται ο έλεγχος Kaiser-Meyer-Olkin (δείκτης ΚΜΟ) και ο έλεγχος της σφαιρικότητας του Bartlett. Ο δείκτης ΚΜΟ είναι μια στατιστική δοκιμή που αξιολογεί το κοινό εύρος διακύμανσης των μεταβλητών. Οι τιμές κύμανσης του δείκτη είναι από 0 έως 1 και για την ικανοποιητική εφαρμογή της μεθόδου πρέπει ΚΜΟ > 0.5, ενώ όσο ο δείκτης

πλησιάζει τη μονάδα τόσο τα δεδομένα θεωρούνται επαρκέστερα. Ο έλεγχος σφαιρικότητας του Bartlett αποδίδει το κατά πόσο ο πίνακας των συντελεστών συσχέτισης (correlation matrix) είναι πίνακας ταυτότητα, υποδεικνύοντας έτσι ότι οι μεταβλητές δεν παρουσιάζουν κάποια σχέση μεταξύ τους. Με βάση το γεγονός ότι η μέθοδος των κύριων συνιστωσών βασίζεται στην αλληλοσυσχέτιση των μεταβλητών, κάτι που αποτελεί και προϋπόθεση για την εφαρμογή της, ο πίνακας των συντελεστών συσχέτισης των μεταβλητών δεν θα πρέπει να είναι ταυτότητα. Το επίπεδο της στατιστικής σημαντικότητας υποδηλώνει ότι η μήτρα συσχετίσεων δεν είναι ταυτοτική (πρέπει $\text{sig} < 0.05$) και η μέθοδος ΑΚΣ είναι κατάλληλη στατιστική τεχνική για την ανάλυση των δεδομένων (Cattell 1978), καθώς πιθανότατα υπάρχουν σημαντικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών.

Δεδομένου ότι οι τιμές των μεταβλητών που αφορούν τη χημική σύσταση του υπόγειου νερού έχουν μεγάλο εύρος τιμών (π.χ. από λίγα μg έως και χιλιάδες mg), θα πρέπει πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε πολυμεταβλητής στατιστικής μεθόδου τα δεδομένα να μετασχηματιστούν με βάση μια κοινή κλίμακα (Reimann et al. 2011). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός “z score” μέσα από το SPSS, με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$Z_x = \frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \quad (10.1)$$

όπου: Z_x η μετασχηματισμένη τιμή της μεταβλητής x_i

\bar{x} η μέση τιμή της μεταβλητής x_i

S_x η τυπική απόκλιση της μεταβλητής x_i

Με βάση τον μετασχηματισμό αυτό, οι νέες μεταβλητές που θα προκύψουν έχουν μέσο όρο μηδέν και τυπική απόκλιση ίση με τη μονάδα.

Όλες οι συνιστώσες που θα προκύψουν από την εφαρμογή της μεθόδου ερμηνεύουν το σύνολο της διακύμανσης αλλά δεν είναι όλες σημαντικές. Κύρια συνεισφορά έχουν αυτές που εκπροσωπούν ικανοποιητικά τα δεδομένα, καλύπτοντας ουσιαστικά το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής διακύμανσης. Το κριτήριο για την επιλογή μιας κύριας συνιστώσας και το χαρακτηρισμό της ως «σημαντικής» είναι ο κανόνας του Kaiser (Kaiser 1960, Zwick & Velicer 1986). Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό σημαντικές είναι οι κύριες συνιστώσες των οποίων οι ιδιοτιμές (eigenvalues) είναι μεγαλύτερες από τη μονάδα. Η ιδιοτιμή μιας κύριας συνιστώσας εξηγεί την διασπορά των αρχικών δεδομένων που προκαλείται από ισάριθμες αρχικές μεταβλητές με την ιδιοτιμή.

Δύναται κάποιες φορές κατά την εφαρμογή της ΑΚΣ, να χρησιμοποιείται κάποια μέθοδος περιστροφής των αξόνων των κύριων συνιστωσών, ως εργαλείο ερμηνείας των αποτελεσμάτων, κι αυτό γιατί τα αρχικά αποτελέσματα μπορεί να είναι συγκεχυμένα και όχι πλήρως κατανοητά. Ουσιαστικά εφαρμόζεται περιστροφή της μήτρας των κύριων συνιστωσών για την διευκόλυνση της ερμηνείας τους. Αποτέλεσμα της περιστροφής είναι οι τιμές των φορτίων των κοινών παραγόντων να προσεγγίζουν είτε το μηδέν είτε να

απέχουν πολύ από αυτό. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος περιστροφής που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της ανάλυσης υδροχημικών δεδομένων είναι η τεχνική της μεγιστοποίησης της διακύμανσης των παραγοντικών φορτίων (περιστροφή Varimax). Αν η διακύμανση η οποία προκύπτει, έχει υψηλή τιμή, τότε κάποια φορτία τείνουν προς το μηδέν και κάποια προς τη μονάδα. Έτσι, η φιλοσοφία της περιστροφής της διακύμανσης στηρίζεται στη μεγιστοποίηση του αθροίσματος των διακυμάνσεων για όλους τους παράγοντες. Μολονότι μεταβάλλεται η μήτρα των κύριων συνιστωσών, οι κοινές διακυμάνσεις των συνιστωσών και το εξηγούμενο ποσοστό της ολικής διακύμανσης δεν μεταβάλλονται. Ωστόσο, το ποσοστό της διακύμανσης που εξηγείται από κάθε κύρια συνιστώσα, μεταβάλλεται γιατί η περιστροφή ανακατανέμει την εξηγούμενη διακύμανση στις εξατομικευμένες συνιστώσες. Έτσι, διαφορετικές μέθοδοι περιστροφής μπορεί να οδηγήσουν σε αναγνώριση διαφορετικών κύριων συνιστωσών.

Στην παρούσα διατριβή εφαρμόσθηκε η μέθοδος ΑΚΣ δύο φορές:

α) στο μέσο όρο των συγκεντρώσεων των δειγμάτων υπόγειου νερού από τις δύο υγρές περιόδους (Απρίλιος-Μάιος 2017 και Απρίλιος-Μάιος 2018) για τις παραμέτρους: pH, EC, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , Cu, Fe, Mn.

β) στο μέσο όρο των συγκεντρώσεων των δειγμάτων υπόγειου νερού από τις δύο ξηρές περιόδους (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2016 και Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2018) για τις παραμέτρους: pH, EC, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , Cu, Fe, Mn.

Σημειώνεται ότι οι παράμετροι NO_2^- , B, Pb και Cd δεν χρησιμοποιήθηκαν στην όλη διαδικασία της εφαρμογής της μεθόδου, καθώς όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των υδροχημικών αναλύσεων παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές και χωρίς ιδιαίτερη διακύμανση.

α) Αφού πρώτα μετασχηματίστηκαν τα δεδομένα με βάση τον Τύπο 10.1, πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος ΚΜΟ, ο οποίος έδωσε μία τιμή $0.661 > 0.5$, γεγονός που υποδεικνύει ότι το σύνολο των δεδομένων είναι κατάλληλο για την εφαρμογή της μεθόδου ΑΚΣ. Ως δεύτερο κριτήριο για την εφαρμογή της μεθόδου, ο έλεγχος σφαιρικότητας του Bartlett έδωσε μία τιμή μικρότερη από 0.05, υποδεικνύοντας έτσι ότι πιθανότατα υπάρχουν σημαντικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Από την εφαρμογή της μεθόδου της ανάλυσης κύριων συνιστωσών προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.6. Για την περιοχή προσδιορίσθηκαν τέσσερις κύριες συνιστώσες, οι οποίες περιγράφουν το 78.01 % της συνολικής διακύμανσης.

Πίνακας 10.6. Αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών για τα υδροχημικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (Απρίλιος-Μάιος 2017 και Απρίλιος-Μάιος 2018).

Συνιστώσες	Αρχικές Ιδιοτιμές			Τετραγωνικά Φορτία Περιστροφής		
	Σύνολο	Διακύμανση %	Αθροιστική Διακύμανση %	Σύνολο	Διακύμανση %	Αθροιστική Διακύμανση %
1	5.763	38.419	38.419	4.770	31.803	31.803
2	3.191	21.271	59.689	3.411	22.738	54.541
3	1.761	11.740	71.429	2.252	15.011	69.552
4	0.995	6.627	78.056	1.276	8.504	78.056
5	0.920	6.132	84.188			
6	0.810	5.402	89.590			
7	0.524	3.495	93.085			
8	0.458	3.055	96.141			
9	0.274	1.828	97.968			
10	0.175	1.165	99.133			
11	0.067	0.444	99.577			
12	0.038	0.256	99.832			
13	0.015	0.098	99.930			
14	0.011	0.070	100.000			
15	0.000	0.000	100.000			

	Κύριες Συνιστώσες			
	1	2	3	4
pH	-0.777	-0.111	0.052	0.143
EC	0.637	0.723	0.048	0.190
K	0.629	0.050	-0.080	-0.026
Na	-0.224	0.727	0.354	0.450
Ca	0.894	0.044	-0.296	-0.082
Mg	0.509	0.755	0.164	-0.009
CaCO3	0.873	0.400	-0.127	-0.062
Cl	0.455	0.774	-0.095	0.053
HCO3	0.783	-0.142	0.365	0.311
SO4	-0.054	0.946	-0.030	0.047
NO3	0.788	0.184	-0.186	-0.084
NH4	-0.161	0.208	0.633	0.596
Cu	0.034	-0.103	0.207	-0.666
Fe	-0.089	-0.047	0.810	-0.311
Mn	-0.128	0.090	0.840	0.016

Η πρώτη κύρια συνιστώσα (ΚΣ1) ερμηνεύει το 38.42% της συνολικής διακύμανσης και παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με το pH, το Ca^{2+} , το CaCO_3 , τα HCO_3^- και τα NO_3^- και μέτρια συσχέτιση με την EC και το K^+ . Η συνιστώσα αυτή σχετίζεται: (i) με την παρουσία υδάτων τροφοδοσίας λόγω των υψηλών φορτίσεων που παρουσιάζουν πρωτίστως το ασβέστιο και τα όξινα ανθρακικά, γεγονός που συνάδει με την διαλυτοποίηση του ανθρακικού ασβεστίου των ασβεστόλιθων στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης, (ii) με την νιτρορρύπανση λόγω της υψηλής τιμής φόρτισης των νιτρικών ιόντων γεγονός που συνδέεται με την υπερβολική χρήση αζωτούχων λιπασμάτων (ειδικά σε μια ζώνη όπου αναπτύσσονται συνθήκες φρεάτιας υδροφορίας, κοντά στα δυτικά κράσπεδα και (iii) την αλατότητα των υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης εξαιτίας των επιστροφών αρδεύσεων γεγονός που υποδεικνύεται από την μέση προς υψηλή τιμή φόρτισης που παρουσιάζει η ηλεκτρική αγωγιμότητα (η οποία άλλωστε αποτελεί δείκτη αλατότητας που με τη σειρά της χαρακτηρίζει τα εφαρμοζόμενα λιπάσματα). Αποτελεί μία συνδυαστική συνιστώσα που συνδέεται τόσο με χημικές διεργασίες όσο και με ανθρωπογενείς επιδράσεις λόγω της έντονης αγροτικής δραστηριότητας στη συγκεκριμένη περιοχή.

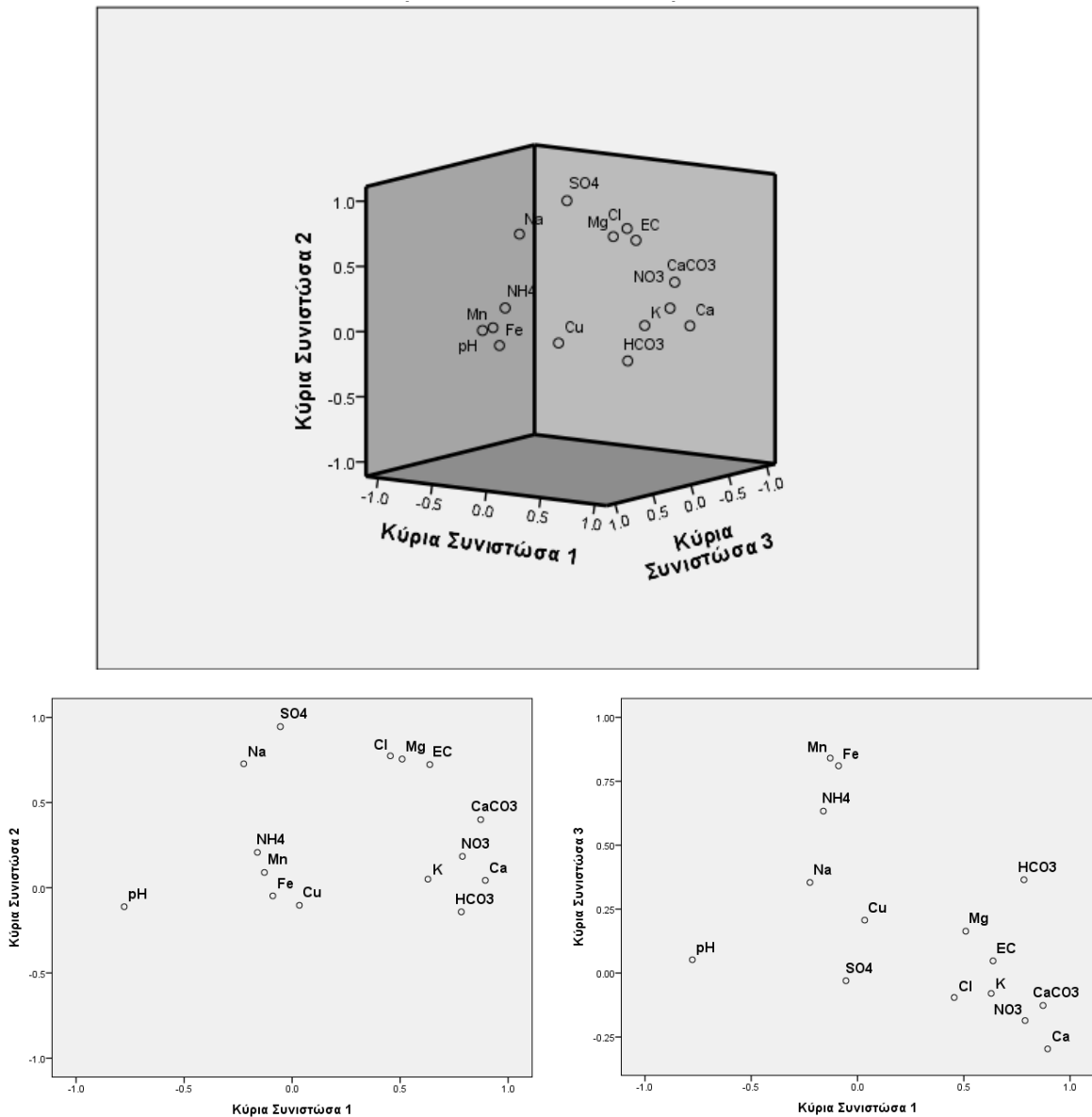
Η δεύτερη κύρια συνιστώσα (ΚΣ2) ερμηνεύει το 21.27% της συνολικής διακύμανσης και παρουσιάζει πολύ υψηλή συσχέτιση με τα SO_4^{2-} και υψηλή με την EC, το Na^+ , το Mg^{2+} και το Cl^- . Η συνιστώσα αυτή θα μπορούσε να ειπωθεί ότι προσομοιάζει με την ΚΣ1, καθώς η υψηλή φόρτιση που παρουσιάζει το νάτριο, το χλώριο και η ηλεκτρική αγωγιμότητα δίνουν τη διάσταση της αλατότητας της ΚΣ1. Η υψηλή φόρτιση του μαγνησίου θα μπορούσε να ειπωθεί ότι σχετίζεται με τη διαλυτοποίηση του δολομίτη των ανθρακικών πετρωμάτων στα δυτικά κράσπεδα, όπως αντίστοιχα συμβαίνει με το ασβέστιο στην ΚΣ1. Τέλος, η πολύ υψηλή φόρτιση σε θειικά ιόντα συνδέεται με τη χρήση φωσφορικών λιπασμάτων που δίνει τη διάσταση της ανθρωπογενούς ρύπανσης της ΚΣ1.

Η τρίτη συνιστώσα (ΚΣ3), η οποία εξηγεί το 11.74% της συνολικής διακύμανσης, παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με το Fe και το Mn και μέτρια συσχέτιση με τα NH_4^+ . Η συνιστώσα αυτή πιθανότατα σχετίζεται με τις διαφορετικές οξειδοαναγωγικές συνθήκες των υδροφόρων. Αν και δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με τη συσχέτιση του Mn με τα υπόγεια ύδατα, τεκμηριώνεται ωστόσο (Christensen et al. 2000, Tziritis et al. 2016) ότι τόσο το Mn^{4+} όσο και ο Fe^{3+} δρουν, εκτός των άλλων, ως οξειδωτικά μέσα σε αναγωγικά περιβάλλοντα, τα οποία για παράδειγμα μπορεί να περιέχουν μεγάλες ποσότητες NH_4^+ .

Η τέταρτη και τελευταία συνιστώσα (ΚΣ4) εξηγεί το 6.63% της συνολικής διακύμανσης και παρουσιάζει μέτρια προς υψηλή συσχέτιση με τον Cu. Η συνιστώσα αυτή κατά πάσα πιθανότητα σχετίζεται με τη χρήση υπερφωσφορικών λιπασμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε γεωργικές εκτάσεις και περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις Cu, Zn και Cd ως προσμείξεις (Nouri et al. 2008).

Στο Διάγραμμα 10.5 απεικονίζεται πρώτα το τρισδιάστατο διάγραμμα συσχέτισης των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών για τις 3 πρώτες συνιστώσες και στη συνέχεια τα δισδιάστατα διαγράμματα των ίδιων συνιστωσών ανά δύο. Η απόσταση μεταξύ των παραμέτρων σε αυτά τα διαγράμματα καθορίζει και τη συσχέτιση μεταξύ τους,

δηλαδή όσο μικρότερη απόσταση έχουν μεταξύ τους τόσο περισσότερο συσχετίζονται και παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά.



Διάγραμμα 10.31. Τρισδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών για τις τρεις Κύριες Συνιστώσες (Υγρή περίοδος).

β) Κατά ανάλογο τρόπο, στην περίπτωση των ξηρών περιόδων, τα δεδομένα μετασχηματίστηκαν με βάση τον Τύπο 10.1 και πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος KMO, ο οποίος έδωσε τιμή $0.582 > 0.5$, γεγονός που υποδεικνύει ότι το σύνολο των δεδομένων είναι κατάλληλο για την εφαρμογή της μεθόδου ΑΚΣ. Ως δεύτερο κριτήριο για την εφαρμογή της μεθόδου, ο έλεγχος σφαιρικότητας του Bartlett έδωσε τιμή μικρότερη από 0.05, υποδεικνύοντας έτσι ότι πιθανότατα υπάρχουν σημαντικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Από την εφαρμογή της μεθόδου της ανάλυσης κύριων συνιστωσών προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Πίνακα 10.7. Για την περιοχή προσδιορίστηκαν τέσσερις κύριες συνιστώσες, οι οποίες περιγράφουν το 80.56 % της συνολικής διακύμανσης.

Πίνακας 10.7. Αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών για τα υδροχημικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2016 και Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2018).

Συνιστώσες	Αρχικές Ιδιότητες		Αθροιστική Διακύμανση %	Τετραγωνικά Φορτία Περιστροφής		
	Σύνολο	Διακύμανση %		Σύνολο	Διακύμανση %	Αθροιστική Διακύμανση %
1	5.287	35.249	35.249	4.341	28.939	28.939
2	3.523	23.486	58.735	4.053	27.017	55.956
3	2.173	14.484	73.219	2.543	16.951	72.907
4	1.101	7.342	80.561	1.148	7.654	80.561
5	0.814	5.425	85.987			
6	0.615	4.100	90.087			
7	0.499	3.325	93.412			
8	0.330	2.197	95.609			
9	0.282	1.878	97.487			
10	0.191	1.272	98.759			
11	0.141	0.943	99.702			
12	0.040	0.267	99.970			
13	0.003	0.019	99.989			
14	0.002	0.011	100.000			
15	0.000	0.000	100.000			

	Κύριες Συνιστώσες			
	1	2	3	4
pH	0.275	-0.763	-0.006	0.107
EC	0.924	0.305	0.196	-0.026
K	0.068	0.656	0.097	0.315
Na	0.947	-0.215	0.107	-0.014
Ca	0.039	0.901	0.040	0.175
Mg	0.635	0.438	0.336	-0.190
CaCO3	0.376	0.861	0.213	0.016
Cl	0.954	0.138	-0.050	-0.059
HCO3	0.172	0.606	0.601	-0.023
SO4	0.959	-0.107	0.028	0.029
NO3	0.054	0.816	-0.346	-0.077
NH4	-0.073	0.133	0.917	-0.060
Cu	-0.101	0.097	-0.063	0.921
Fe	0.284	0.074	0.736	0.253
Mn	0.076	-0.243	0.673	-0.209

Η πρώτη κύρια συνιστώσα (ΚΣ1) ερμηνεύει το 35.25% της συνολικής διακύμανσης και παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με την EC, το Na^+ , το Cl^- και τα SO_4^{2-} και μέτρια συσχέτιση με το Mg^{2+} . Η συνιστώσα αυτή σχετίζεται με: (i) την αλατότητα των υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης εξαιτίας των επιστροφών αρδεύσεων γεγονός που υποδεικνύεται από την πολύ υψηλή τιμή φόρτισης που παρουσιάζουν η ηλεκτρική αγωγιμότητα καθώς και τα ιόντα νατρίου και χλωρίου, (ii) την ανθρωπογενή ρύπανση λόγω της πολύ υψηλής φόρτισης των θεϊκών ιόντων που συνδέονται με τη χρήση φωσφορικών λιπασμάτων και (iii) με τη διαλυτοποίηση του δολομίτη των ανθρακικών πετρωμάτων στα δυτικά κράσπεδα, κάτι που αντικατοπτρίζεται με τη μέτρια προς υψηλή συσχέτιση που παρουσιάζει η συνιστώσα αυτή με τα ιόντα μαγνησίου.

Η δεύτερη κύρια συνιστώσα (ΚΣ2) ερμηνεύει το 23.49% της συνολικής διακύμανσης και παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με το Ca^{2+} , το CaCO_3 και τα NO_3^- και μέτρια συσχέτιση με το pH (αρνητική) το K και τα HCO_3^- . Η υψηλή συσχέτιση των ιόντων ασβεστίου και ανθρακικού ασβεστίου καθώς και η μέτρια συσχέτιση των όξινων ανθρακικών ιόντων συνδέονται με την διαλυτοποίηση του ανθρακικού ασβεστίου των ασβεστόλιθων στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης, ενώ η υψηλή συσχέτιση των νιτρικών ιόντων σχετίζεται και εδώ με την ανθρωπογενή ρύπανση από τη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων.

Η τρίτη συνιστώσα (ΚΣ3), η οποία εξηγεί το 14.48% της συνολικής διακύμανσης, παρουσιάζει πολύ υψηλή συσχέτιση με τα NH_4^+ , υψηλή συσχέτιση με το Fe και το Mn και μέτρια συσχέτιση με τα HCO_3^- . Η συνιστώσα αυτή, όπως και στην αντίστοιχη της υγρής περιόδου, πιθανότατα σχετίζεται με τις διαφορετικές οξειδοαναγωγικές συνθήκες των υδροφόρων. Τόσο το Mn^{4+} όσο και ο Fe^{3+} δρουν, εκτός των άλλων, ως οξειδωτικά μέσα σε αναγωγικά περιβάλλοντα, τα οποία μπορεί να περιέχουν μεγάλες ποσότητες NH_4^+ (Christensen et al. 2000, Tziritis et al. 2016).

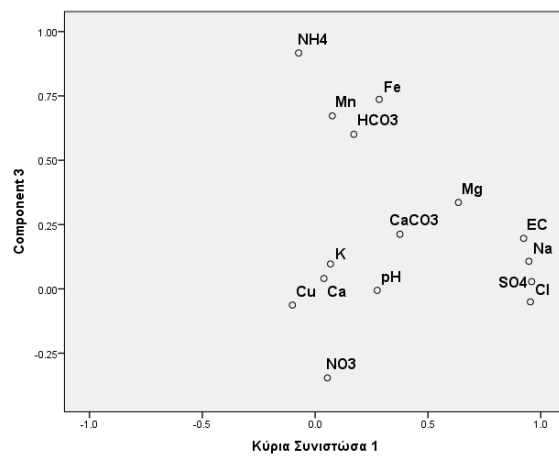
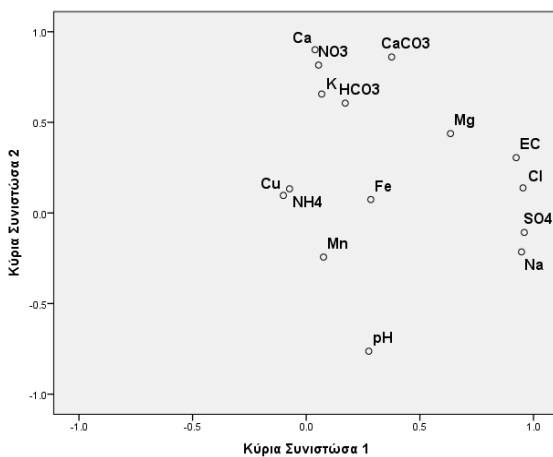
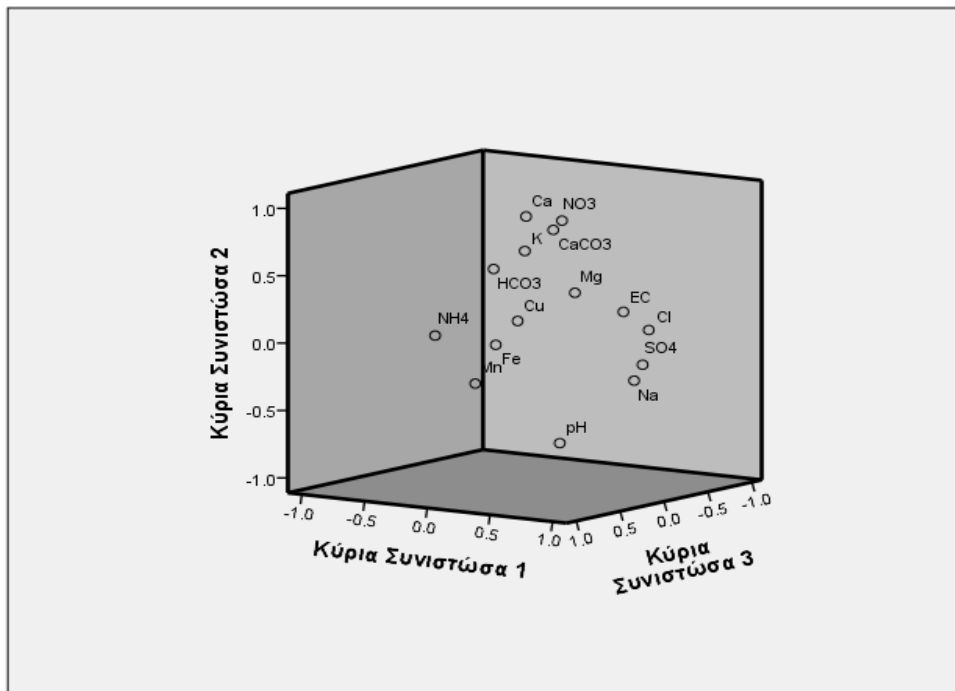
Η τέταρτη και τελευταία συνιστώσα (ΚΣ4) ερμηνεύει το 7.34% της συνολικής διακύμανσης και παρουσιάζει πολύ υψηλή συσχέτιση με τον Cu. Η συνιστώσα αυτή, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, σχετίζεται κατά πάσα πιθανότητα με τη χρήση υπερφωσφορικών λιπασμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε γεωργικές εκτάσεις και περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις Cu, Zn και Cd ως προσμείξεις (Nouri et al. 2008).

Στο Διάγραμμα 10.32 απεικονίζεται πρώτα η τρισδιάστατη απεικόνιση συσχέτισης των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών για τις 3 πρώτες συνιστώσες και στη συνέχεια, τα δισδιάστατα διαγράμματα των ίδιων συνιστωσών ανά δύο. Η απόσταση μεταξύ των παραμέτρων σε αυτά τα διαγράμματα καθορίζει και τη συσχέτιση μεταξύ τους, δηλαδή όσο μικρότερη απόσταση έχουν μεταξύ τους τόσο περισσότερο συσχετίζονται και παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά.

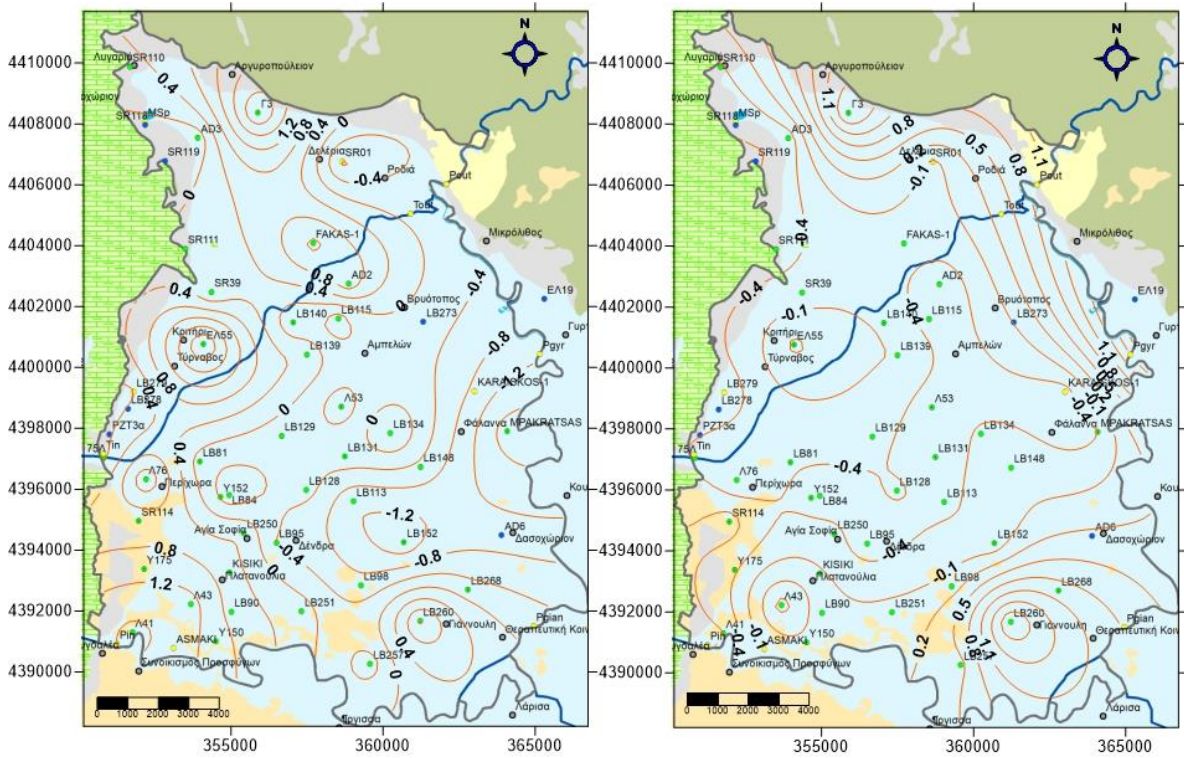
Στις Εικόνες 10.5 και 10.6 αποτυπώνεται η χωρική κατανομή των επιδόσεων (scores) των τεσσάρων Κύριων Συνιστωσών για την υγρή περίοδο δειγματοληψίας (μέσος όρος περιόδων Απρίλιος-Μάιος 2017 & Απρίλιος-Μάιος 2018) και αντίστοιχα στις Εικόνες 10.7 και 10.8 η χωρική κατανομή των επιδόσεων των τεσσάρων Κύριων Συνιστωσών για την

ξηρή περίοδο δειγματοληψίας (μέσος όρος περιόδων Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2016 & Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2017).

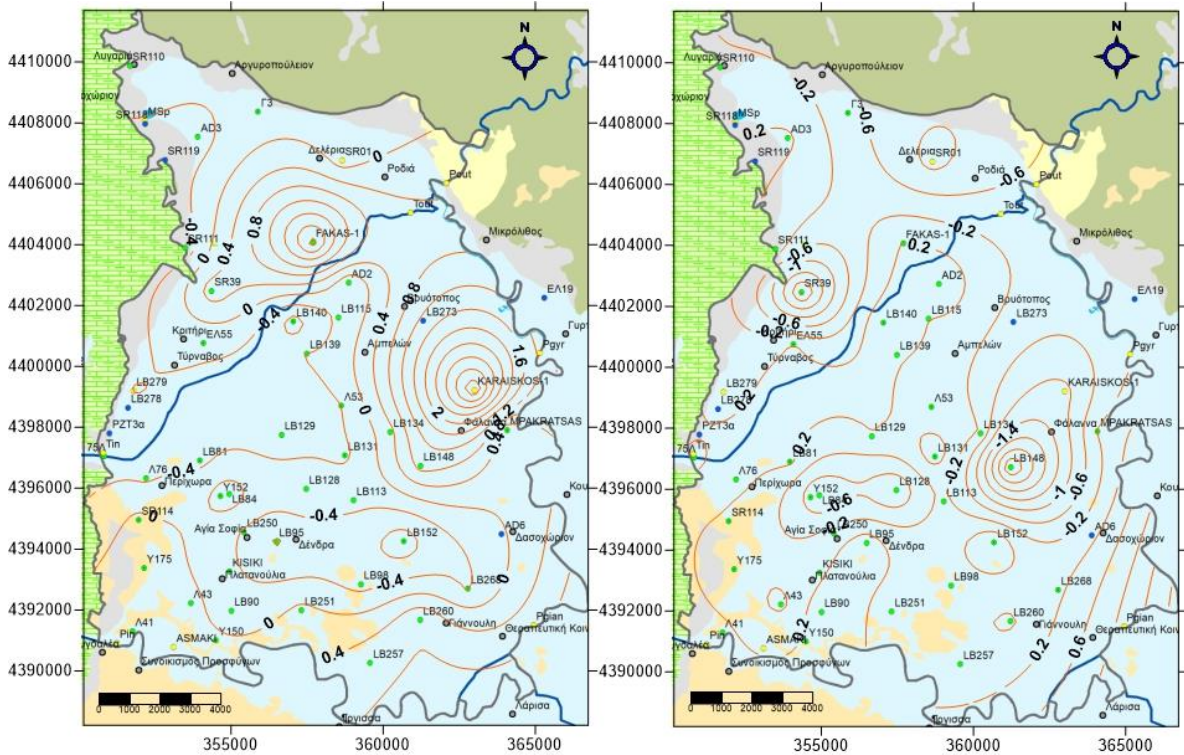
Η χωρική κατανομή της ΚΣ1 παρουσιάζει πανομοιότυπη κατανομή με αυτήν των παραμέτρων από τις οποίες εκφράζεται, τόσο για την υγρή όσο και για την ξηρή περίοδο, σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Η ΚΣ1 παρουσιάζει αυξημένες τιμές επίδοσης κατά μήκος άξονα Β-Ν στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης καθώς και στο ΝΑ τμήμα αυτής. Στα αντίστοιχα τμήματα της υπολεκάνης παρατηρούνται αυξημένες τιμές αγωγιμότητας καθώς και οι συγκεντρώσεις των ιόντων που εκφράζουν την διακύμανση της ΚΣ1.



Διάγραμμα 10.32. Τρισδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών για τις τρεις Κύριες Συνιστώσες (Ξηρή περίοδος).



Εικόνα 10.5. Χωρική κατανομή των scores για την ΚΣ1 (αριστερά) και την ΚΣ2 (δεξιά) για την υγρή περίοδο δειγματοληψίας (Μέσος όρος περιόδων Απρίλιος-Μάιος 2017 & Απρίλιος-Μάιος 2018).



Εικόνα 10.6. Χωρική κατανομή των scores για την ΚΣ3 (αριστερά) και την ΚΣ4 (δεξιά) για την υγρή περίοδο δειγματοληψίας (Μέσος όρος περιόδων Απρίλιος-Μάιος 2017 & Απρίλιος-Μάιος 2018).

10.4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΔΩΝ (CLUSTER ANALYSIS)

Η Ανάλυση Συστάδων (ΑΣ) είναι μία ακόμη στατιστική πολυμεταβλητή μέθοδος, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εκτός των άλλων, και στην επεξεργασία των υδροχημικών δεδομένων. Η βασική διαφορά της μεθόδου αυτής με την Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών είναι ότι στην περίπτωση της ΑΣ ομαδοποιούνται οι παρατηρήσεις αντί να ομαδοποιούνται (σε γραμμικούς συνδυασμούς) οι μεταβλητές, όπως συμβαίνει στην ΑΚΣ. Η ΑΣ δηλαδή προσπαθεί να κατατάξει σε ομάδες τις υπάρχουσες παρατηρήσεις (υδροχημικές αναλύσεις) χρησιμοποιώντας την πληροφορία που υπάρχει σε κάποιες από τις μεταβλητές (υδροχημικές παράμετροι). Η ΑΣ έχει χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν σε παρόμοιες μελέτες αποδίδοντας αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα (Ashley & Lloyd 1978, Guler et al. 2002, Thyne et al. 2004, Panda et al. 2006).

Όπως και στην ΑΚΣ, τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να παρουσιάζουν κανονική κατανομή. Για τον λόγο αυτό πριν την εφαρμογή της μεθόδου, τα δεδομένα μετασχηματίζονται με βάση τον Τύπο 10.1, όπως ακριβώς αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

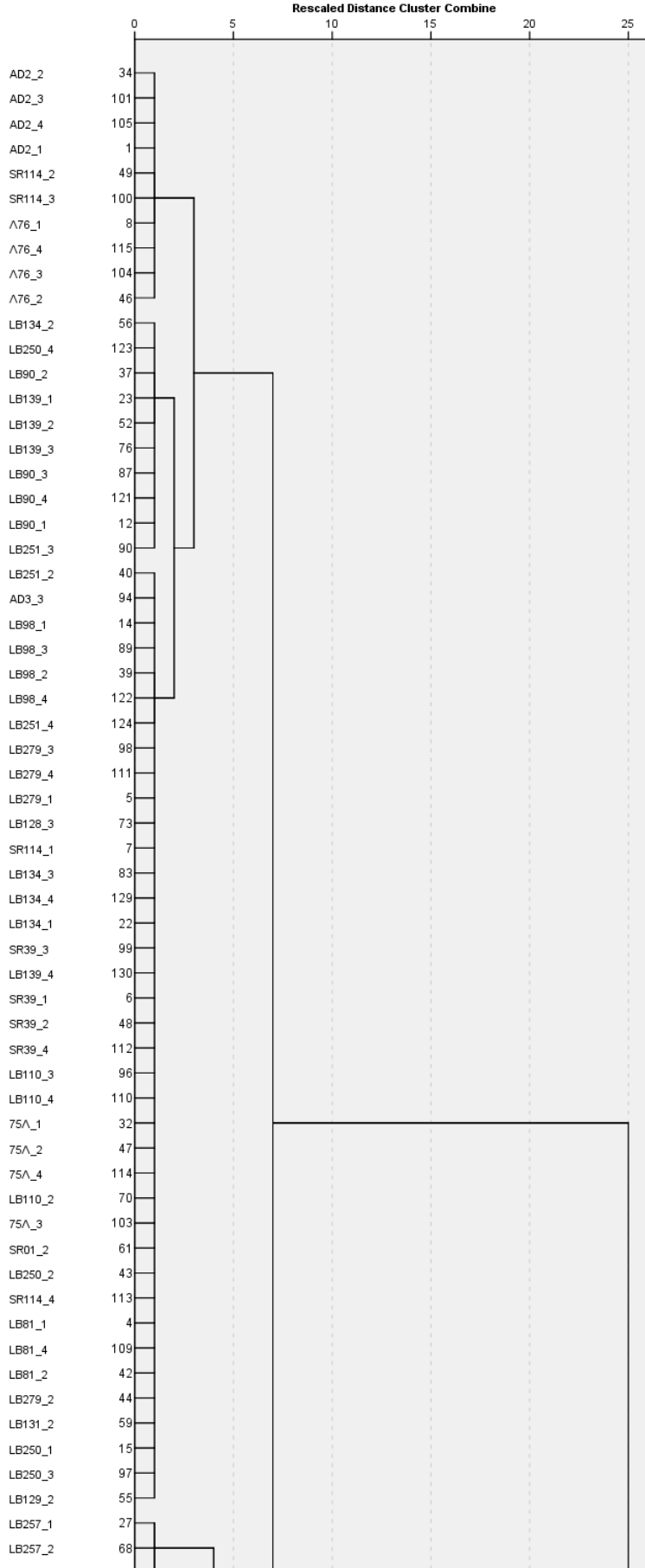
Οι δύο βασικές μέθοδοι της ΑΣ είναι η Ιεραρχική Ανάλυση Συστάδων και η K-means Ανάλυση Συστάδων. Η διαφορά τους είναι ότι στην τελευταία ορίζεται εκ των προτέρων ο αριθμός των ομάδων στις οποίες θα ταξινομηθούν τα δεδομένα και επίσης η K-means Ανάλυση Συστάδων δεν παράγει δένδροδιαγράμματα για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Κατά την εφαρμογή της ΑΣ επιλέγεται μία μέθοδος σύνδεσης των δειγμάτων, η οποία είναι αυτή που θα καθορίσει τον τρόπο κατάταξης των δειγμάτων σε μία ομάδα και επίσης μία μέθοδος μέτρησης της ομοιότητας/ανομοιότητας των δειγμάτων, η οποία μετράει την απόσταση μεταξύ τους πριν αυτά ομαδοποιηθούν. Στην παρούσα διατριβή εφαρμόστηκε η Ιεραρχική Ανάλυση Συστάδων στο σύνολο των δειγμάτων εντός της υπολεκάνης (133 δείγματα) για τις παραμέτρους: pH, EC, Ca⁺², Mg⁺², CaCO₃, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄⁻², Cl⁻, NO₃⁻, NO₂⁻ και NH₄⁺. Βάσει της βιβλιογραφίας για παρόμοιες μελέτες επιλέχθηκε ως μέθοδος σύνδεσης η μέθοδος Ward's και η μέθοδος της τετραγωνικής Ευκλείδειας απόστασης ως μέθοδος ομοιότητας/ανομοιότητας.

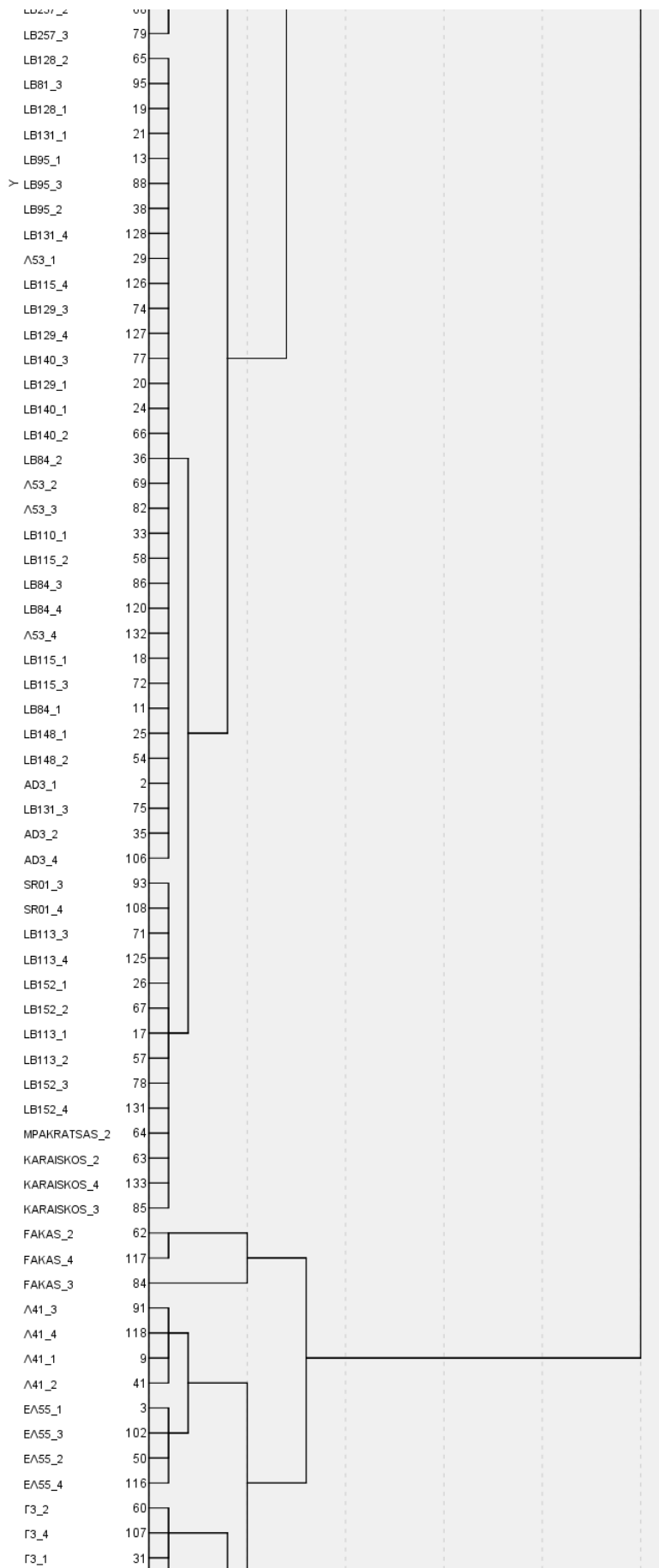
Το δένδροδιάγραμμα που προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου απεικονίζεται στο Διάγραμμα 10.33. Σε αυτό διακρίνονται δύο κύριες ομάδες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη διαφορά στον αριθμό των δειγμάτων που τις απαρτίζουν (Vrouhakis et al. 2019). Η πρώτη και μεγαλύτερη ομάδα (Ομάδα 1) αποτελείται από 108 δείγματα και των τεσσάρων δειγματοληψιών, τα οποία αντιστοιχούν σε 30 θέσεις δειγματοληψίας υπόγειων υδάτων. Τα δείγματα της ομάδας αυτής, με βάση το δένδροδιάγραμμα, διαχωρίζονται σε δύο μικρότερες υπό-ομάδες 1.1 και 1.2, στις οποίες αναλογούν 16 και 14 θέσεις δειγματοληψίας αντίστοιχα. Η δεύτερη ομάδα (Ομάδα 2), αποτελείται από 25 συνολικά δείγματα (και των τεσσάρων δειγματοληψιών), τα οποία αντιστοιχούν μόλις σε 7 θέσεις δειγματοληψίας υπόγειων υδάτων.

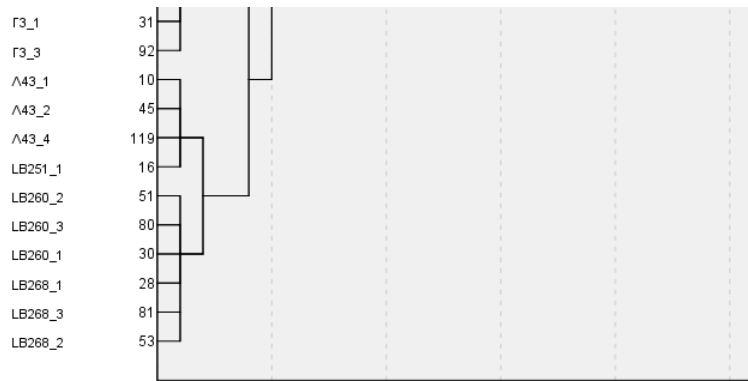
Η χωρική κατανομή των ομάδων και υπό-ομάδων που προέκυψαν από την εφαρμογή της ανάλυσης συστάδων για όλα τα δείγματα υπόγειου ύδατος εντός της περιοχής έρευνας, φαίνεται στο χάρτη της Εικόνας 10.9. Από την κατανομή αυτή προκύπτει ότι η πρώτη υπό-ομάδα 1.1 εκτείνεται κυρίως στο δυτικό- νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής καθώς και σε μικρότερο ποσοστό, στο κεντρικό μέρος αυτής. Η δεύτερη υπό-ομάδα 1.2 καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση, σε σχέση με την υπό-ομάδα 1.1, κυρίως στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης καθώς και στο ανατολικό τμήμα αυτής. Η μικρότερη από τις δύο κύριες ομάδες (Ομάδα 2), καταλαμβάνει τμήματα του νοτιοδυτικού και νοτιοανατολικού μέρους της περιοχής έρευνας καθώς και ένα τμήμα της περιοχής όπου εκτείνεται ο κώνος κορημάτων του ποταμού Τιταρήσιου (βόρεια του ποταμού).

Ο διαχωρισμός των υπό-ομάδων ακολουθεί τη γενική υδροχημική ταξινόμηση της περιοχής σύμφωνα με την οποία, στο δυτικό τμήμα της υπολεκάνης και προς το κέντρο της, κυριαρχούν τα φρέσκα νερά τροφοδοσίας, ενώ προοδευτικά προς την ανατολική επέκταση του συστήματος, ο υδροχημικός τύπος νερού προκύπτει από διαδικασίες ανάμιξης ή/και ιοντοανταλλαγής. Από την άλλη πλευρά, η χωρική κατανομή της ομάδας 2, αποδίδεται στις περιοχές όπου παρατηρούνται: (i) μικρά βάθη υπόγειων υδάτων, κυρίως κατά μήκος των δυτικών και βορειοδυτικών περιθωρίων της υπολεκάνης, (ii) ιδιαίτερες τοπικές γεωλογικές συνθήκες και (iii) εντατική γεωργική εκμετάλλευση. Είναι τα τμήματα εκείνα της υπολεκάνης όπου παρουσιάζονται τα μεγαλύτερα προβλήματα νιτρορρύπανσης και τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, δικαιολογούν συνολικά τις τεκμηριωμένες αυξημένες συγκεντρώσεις NO_3^- . Ιδιαίτερα για το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου εμφανίζονται δυναμικές καλλιέργειες σε συνδυασμό με το χαμηλό ρυθμό επανατροφοδοσίας του υδροφόρου (μέσω πλευρικών μεταγγίσεων από τους γύρω σχηματισμούς), δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες προς αυτή τη κατεύθυνση, όπως θα αναλυθεί διεξοδικά στην Παράγραφο 12.4 του 12^{ου} Κεφαλαίου.

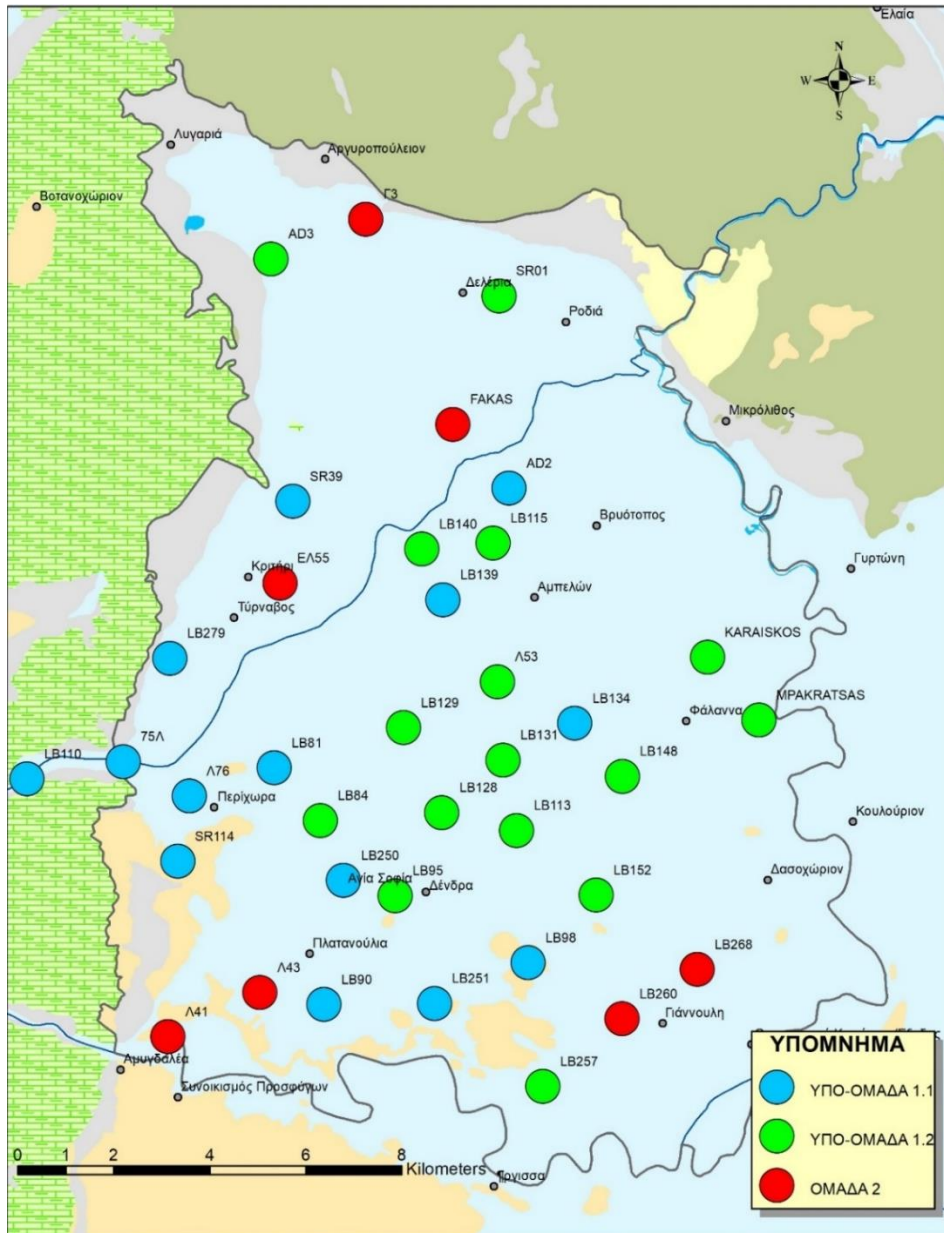
Dendrogram using Ward Linkage







Διάγραμμα 10.33. Δενδροδιάγραμμα ταξινόμησης των δειγμάτων του υπόγειου νερού, όπως αυτό προέκυψε από την εφαρμογή της Ιεραρχικής Ανάλυσης Συστάδων, για όλες τις περιόδους δειγματοληψίας (1, 2, 3, 4 δίπλα στους κωδικούς των δειγμάτων).



Εικόνα 10.9. Χωρική κατανομή ομάδων και υπό-ομάδων, όπως αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή της Ιεραρχικής Ανάλυσης Συστάδων.

10.4.3 ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ (STEPWISE DISCRIMINANT ANALYSIS)

Η Βηματική Ανάλυση Διακριτών Βαθμίδων (ΒΑΔΒ) αποτελεί μία ακόμα πολυμεταβλητή στατιστική μέθοδο, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί τόσο στην επεξεργασία υδροχημικών δεδομένων (Steinhorst & Williams 1985, Petalas & Anagnostopoulos 2006, Pisinaras 2008) όσο και σε διάφορους άλλους κλάδους επιστημών (Lachenbruch & Goldstein 1979). Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι να αναδείξει κάποιες βασικές παραμέτρους, οι οποίες βοηθούν στον διαχωρισμό μεταξύ δύο ή περισσότερων ομάδων. Στην παρούσα μελέτη στόχος της εφαρμογής αυτής της μεθόδου είναι να αναγνωρισθούν εκείνες οι υδροχημικές παράμετροι, βάσει των οποίων μπορούν να διαχωρισθούν οι ομάδες που προέκυψαν από την εφαρμογή της Ιεραρχικής Ανάλυσης Συστάδων.

Γενικά, για την εφαρμογή της Ανάλυσης Διακριτών Βαθμίδων (ΑΔΒ), υπεισέρχεται στα υδροχημικά δεδομένα μια νέα ποιοτική μεταβλητή, η οποία διαχωρίζει τα δεδομένα σε (n) υποσύνολα. Οι υδροχημικές παράμετροι που θα συμμετέχουν στην εφαρμογή (p), αποτελούν τις ποσοτικές μεταβλητές και χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές διάκρισης. Με βάση τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προηγούμενης μεθόδου (ΑΣ), τα δείγματα του υπόγειου νερού εντός της υπολεκάνης, διαχωρίσθηκαν σε 3 ομάδες. Για το λόγο αυτό για την εφαρμογή της ΑΔΒ στην παρούσα μελέτη, οι τιμές που θα πάρει η ποιοτική μεταβλητή είναι τρεις (n=3). Αυτές ορίσθηκαν να είναι οι: 11 (για την υπό-ομάδα 1.1), 12 (για την υπό-ομάδα 1.2) και 20 (για την ομάδα 2). Οι p μεταβλητές διάκρισης που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση είναι οι pH, EC, Ca⁺², Mg⁺², CaCO₃, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄⁻², Cl⁻, NO₃⁻, NO₂⁻ και NH₄. Με βάση τις τιμές αυτών των μεταβλητών διάκρισης η ΑΔΒ επιχειρεί την σαφέστερη διάκριση των δειγμάτων στις προαναφερθείσες ομάδες.

Η μέθοδος ΑΔΒ προκειμένου να επιτύχει τη διάκριση/κατάταξη των δειγμάτων, αναπτύσσει και χρησιμοποιεί γραμμικές εξισώσεις μεταξύ των μεταβλητών διάκρισης. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται όλες οι μεταβλητές διάκρισης για τον σχηματισμό των γραμμικών εξισώσεων ενώ η Βηματική ΑΔΒ χρησιμοποιεί κάποιες επιπλέον στατιστικές μεθόδους, έτσι ώστε να επιλεγθούν μόνο εκείνες οι μεταβλητές διάκρισης, οι οποίες μπορούν να δώσουν μια σαφέστερη εικόνα ως προς τον διαχωρισμό των ομάδων.

Σε κάθε βήμα της εφαρμογής της ΒΑΔΒ, στην γραμμική εξίσωση τοποθετείται μια νέα μεταβλητή διάκρισης, έτσι ώστε να διαχωρισθούν καλύτερα οι ομάδες των δειγμάτων. Βήμα προς βήμα, και με τη χρήση των διάφορων στατιστικών μεθόδων που η ΒΑΔΒ χρησιμοποιεί, όλες οι μεταβλητές διάκρισης αξιολογούνται, έτσι ώστε να αποφασισθεί εάν τελικά η μεταβλητή διάκρισης, που θα εισέλθει στο συγκεκριμένο βήμα, θα απορριφθεί ή θα διατηρηθεί στην εξίσωση. Η βηματική διαδικασία τελειώνει όταν για ένα συγκεκριμένο βήμα, δεν υπάρχουν πλέον άλλες μεταβλητές είτε για να συμπεριληφθούν είτε για να απορριφθούν από την εξίσωση (Petalas & Anagnostopoulos 2006, Pisinaras 2008).

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επιλογή των μεταβλητών διάκρισης και τα προτεινόμενα από το πρόγραμμα SPSS, που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες αυτής της διατριβής, είναι: η τετραγωνική απόσταση κατά Rao's V, η μικρότερη αναλογία F, η τετραγωνική απόσταση κατά Mahalanobis, η ανεξήγητη διακύμανση και ο λόγος Wilk's Lambda. Το τελευταίο είναι αυτό που χρησιμοποιείται συχνότερα σε παρόμοιες μελέτες και είναι αυτό που επιλέχθηκε και για την παρούσα διατριβή. Το κριτήριο Wilk's Lambda ορίζεται ως ο λόγος του μεταξύ των ομάδων αθροίσματος των τετραγώνων προς το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων.

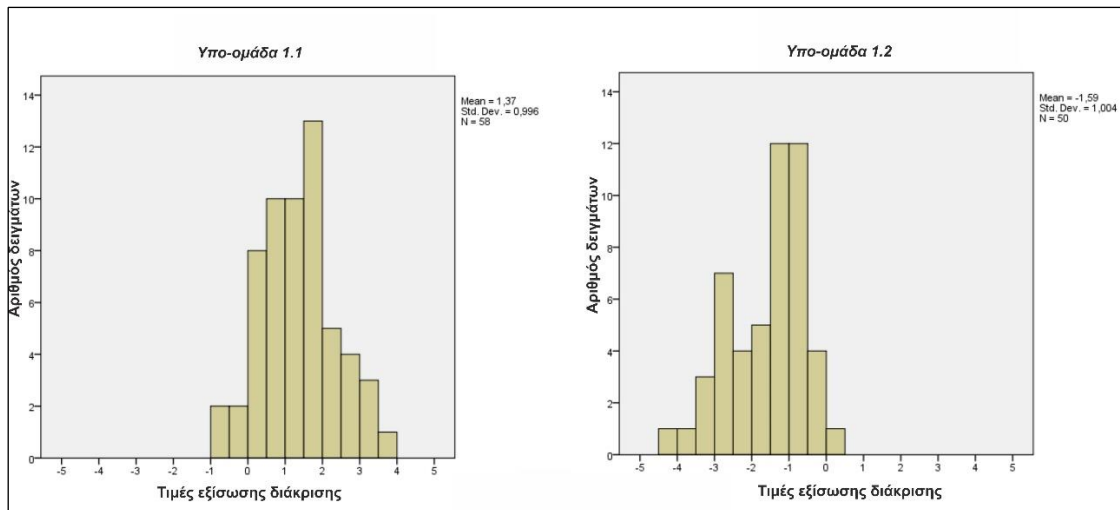
Με δεδομένο τις τρεις ομάδες που προέκυψαν από την εφαρμογή της Ανάλυσης Συστάδων, η ΒΑΔΒ εφαρμόστηκε για την περιοχή μελέτης σε τρεις συνδυασμούς μεταξύ των ομάδων αυτών, έτσι ώστε να βρεθούν οι μεταβλητές διάκρισης μεταξύ τους. Αρχικά εφαρμόστηκε μεταξύ των υποομάδων 1.1 και 1.2, στη συνέχεια μεταξύ των ομάδων 1 και 2 και τέλος μεταξύ των υποομάδων 1.1, 1.2 και της ομάδας 2.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της ΒΑΔΒ, και στις τρεις περιπτώσεις, ήταν στατιστικά σημαντικά σε επίπεδο <5% (Sig. < 0.05), οπότε θεωρούνται στατιστικά αξιόπιστα. Στον παρακάτω Πίνακα 10.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της ΒΑΔΒ για τους διάφορους συνδυασμούς ομάδων και υπό-ομάδων.

Πίνακας 10.8. Σημαντικές παράμετροι διάκρισης κατά την εφαρμογή της ΒΑΔΒ στους διάφορους συνδυασμούς ομάδων και υποομάδων.

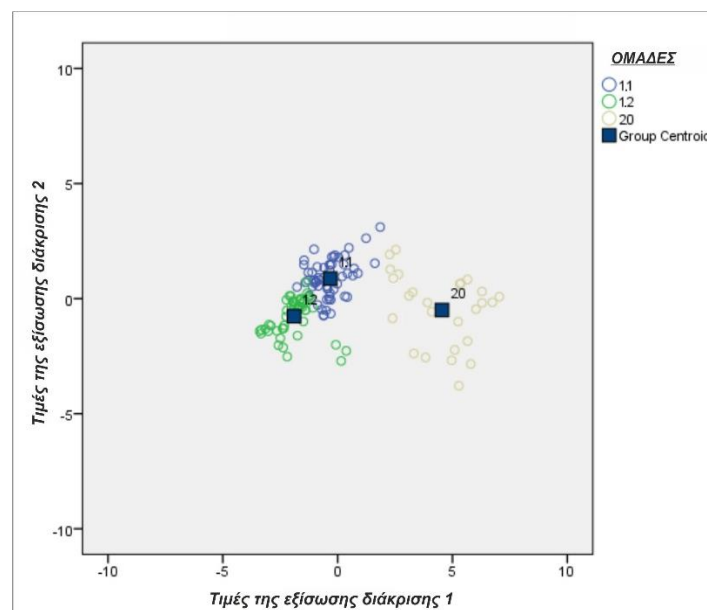
	Ομάδες εφαρμογής της ΒΑΔΒ		
Σημαντικές παράμετροι διάκρισης	(1) – (2)	(1.1) – (1.2)	(1.1) – (1.2) – (2)
	Mg, K, NO ₃	Ca, K, SO ₄ , Mn	K, Mg, CaCO ₃ , SO ₄ , NO ₃

Τα δείγματα των υπό-ομάδων 1.1 και 1.2, διαφοροποιούνται μεταξύ τους παρουσιάζοντας διαφορετική διακύμανση ως προς τις βασικές υδροχημικές παραμέτρους Ca, K, SO₄ και ως προς το Mn, οι συγκεντρώσεις του οποίου όμως είναι πολύ χαμηλές (εκτός 2 μόνο περιπτώσεων). Στο Διάγραμμα 10.34 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών της συνάρτησης διάκρισης για τις υπό-ομάδες 1.1 και 1.2 καθώς και η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο αριθμός των δειγμάτων για κάθε υπό-ομάδα. Παρατηρώντας τις μέσες τιμές της εξίσωσης διάκρισης για κάθε υπό-ομάδα, φαίνεται ότι βρίσκονται σχετικά κοντά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μεγάλες τιμές της εξίσωσης διάκρισης για την υπό-ομάδα 1.2 να συναντώνται με τις μικρές τιμές για την υπό-ομάδα 1.1 και ως εκ τούτου προκύπτουν κάποια δείγματα που δεν μπορούν να διαχωριστούν.



Διάγραμμα 10.34. Κατανομή του αριθμού των δειγμάτων ως προς τις τιμές της εξίσωσης διάκρισης για την εφαρμογή της ΒΑΔΒ στις υπό-ομάδες 1.1 και 1.2.

Τα δείγματα των κύριων ομάδων 1 και 2, διαφοροποιούνται μεταξύ τους παρουσιάζοντας διαφορετική διακύμανση ως προς τις βασικές υδροχημικές παραμέτρους Mg, K αλλά και ως προς τη νιτρορρύπανση, η οποία εκφράζεται από τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-). Από το Διάγραμμα 10.35, προκύπτει ότι η εξίσωση διάκρισης κατά τον διαχωρισμό των δύο κύριων αυτών ομάδων λειτουργεί απόλυτα. Οι μέσες τιμές της εξίσωσης διάκρισης για τις ομάδες 1 και 2 διαφέρουν τόσο ώστε τα δείγματα να διαχωρίζονται σαφώς. Από το διάγραμμα των τιμών των δύο εξισώσεων διάκρισης παρατηρείται επίσης ένα πεδίο τιμών, μεταξύ των υπό-ομάδων 1.1 και 1.2, για τις οποίες η διάκριση των δειγμάτων δεν είναι εφικτή, όπως σχολιάστηκε νωρίτερα.



Διάγραμμα 10.35. Διασπορά των τιμών των δύο εξισώσεων διάκρισης που προέκυψαν από την εφαρμογή της ΒΑΔΒ μεταξύ της ομάδας 2 και των υποομάδων 1.1 και 1.2.

Από τον Πίνακα 10.8 φαίνεται ότι οι μεταβλητές διάκρισης για την εφαρμογή της ΒΑΔΒ στην ομάδα 2 και τις υπό-ομάδες 1.1 και 1.2 είναι οι K, Mg, CaCO₃, SO₄ και NO₃. Όπως προκύπτει, οι μεταβλητές αυτές είναι κατά βάση ένας συνδυασμός των μεταβλητών διάκρισης των δύο προηγούμενων εφαρμογών (1.1-1.2 και 1-2) ωστόσο, μια παράμετρος η οποία έχει εισέλθει στις εξισώσεις διάκρισης είναι το CaCO₃.

11 ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

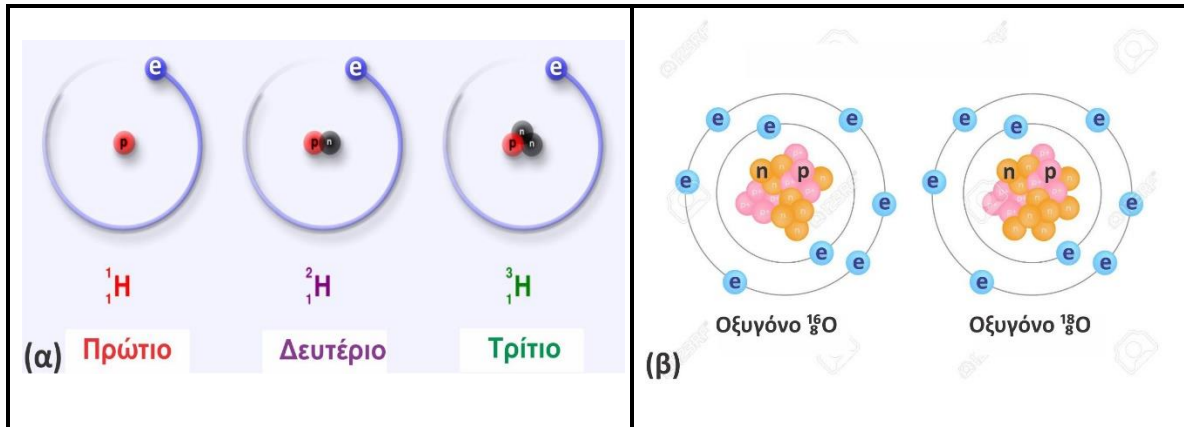
11.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα ισότοπα θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως διαφορετικές εκδοχές, ή παραλλαγές του ίδιου στοιχείου. Όλα τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν ίδιο ατομικό αριθμό (Z) και επομένως τις ίδιες χημικές ιδιότητες, παρουσιάζοντας διαφορά μόνο στον μαζικό αριθμό (A). Ωστόσο τα ισότοπα μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες όπως για παράδειγμα στην πυκνότητα.

Ένα ισότοπο καθορίζεται από τον μαζικό αριθμό του που ονομάζεται και αριθμός νουκλεονίων. Πρόκειται για το συνολικό αριθμό των πρωτονίων και των νετρονίων του ατομικού του πυρήνα. Σημειώνεται ότι οι χημικές ιδιότητες ενός στοιχείου X καθορίζονται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων στο άτομο, οπότε ο ατομικός αριθμός Z καθορίζει το είδος του στοιχείου, ενώ ο μαζικός αριθμός A το είδος του ισότοπου. Έτσι, κάθε στοιχείο μπορεί να γραφτεί με τη μορφή A_ZX_N , όπου Z ο αριθμός ο αριθμός των πρωτονίων, N ο αριθμός των νετρονίων και A ο μαζικός αριθμός (Clark & Fritz 1997). Αντίθετα τα νετρόνια δεν επηρεάζουν τις χημικές ιδιότητες, πλην όμως συντελούν στη διαμόρφωση της τιμής της ατομικής μάζας των ατόμων των στοιχείων. Αυτό έχει ως συνέπεια τα ισότοπα να διακρίνονται μεταξύ τους από τις ατομικές μάζες τους. Σημαντική διαφορά μεταξύ των ισωτόπων του ίδιου ατομικού αριθμού είναι ότι τα περισσότερα ισότοπα είναι ασταθή, ενώ μερικά μόνο είναι σταθερά. Συνήθως τα ασταθή ισότοπα είναι ραδιενεργά, καλούμενα εξ αυτού «ραδιοϊσότοπα». Έως τώρα, έχουν ανακαλυφθεί 270 σταθερά ισότοπα και πάνω από 1700 ραδιενεργά (Clark & Fritz 1997), με τα δεύτερα να έχουν μικρότερη συχνότητα εμφάνισης στη φύση. Κάθε στοιχείο μπορεί να εμφανίζει ένα ή περισσότερα ισότοπα από τα οποία άλλα μπορεί να είναι σταθερά και άλλα ασταθή. Για παράδειγμα, το Λίθιο εμφανίζει εννέα ισότοπα (${}^4\text{Li}$ έως ${}^{12}\text{Li}$). Από αυτά μόνο τα ${}^6\text{Li}$ και ${}^7\text{Li}$ είναι σταθερά, ενώ τα υπόλοιπα είναι ασταθή (Ματιάτος 2010).

11.2 ΣΤΑΘΕΡΑ ΙΣΟΤΟΠΑ

Μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές ισωτόπων στο ευρύτερο πεδίο της υδρολογίας, είναι η χρήση των ισωτόπων υδρογόνου και οξυγόνου. Τα ισότοπα του οξυγόνου που χρησιμοποιούνται είναι το ${}^{16}\text{O}$ και το ${}^{18}\text{O}$ ενώ του υδρογόνου τα ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$ ή D (Δευτέριο) και το ραδιενεργό ${}^3\text{H}$ ή T (Τρίτιο), το οποίο είναι και το σπανιότερο (Εικόνα 11.1).



Εικόνα 11.1. Δομή του πυρήνα για τα ισότοπα του Υδρογόνου και του Οξυγόνου.

Για την έκφραση των σχετικών συγκεντρώσεων των σταθερών ισωτόπων ορίστηκε ο ιστοπικός λόγος R (Urey 1947, Ματιάτος 2010) ενός ισωτόπου, ο οποίος εκφράζεται από τον αριθμό των ατόμων του σπάνιου ισωτόπου στο δείγμα προς τον αριθμό των ατόμων του άφθονου ισωτόπου στο ίδιο δείγμα, δηλαδή:

$$R = \frac{\text{συγκέντρωση σπάνιου ισωτόπου}}{\text{συγκέντρωση άφθονου ισωτόπου}} \quad (11.1)$$

οπότε στην περίπτωση του οξυγόνου και του υδρογόνου ο ιστοπικός λόγος θα είναι:

$$R_{\text{O}} = \frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \quad (11.2) \quad R_{\text{H}} = \frac{{}^2\text{H}}{{}^1\text{H}} \quad (11.3) \quad \text{ή} \quad R_{\text{H}} = \frac{{}^3\text{H}}{{}^1\text{H}} \quad (11.4)$$

Σε κάθε μέτρηση είναι απαραίτητο να γίνεται σύγκριση με ένα κοινό πρότυπο αναφοράς (standard), ώστε τα σφάλματα να μειώνονται σημαντικά. Κατά συνέπεια, ορίζεται η παράμετρος δέλτα (δ) (McKinney et al. 1950), η οποία εκφράζει το λόγο της διαφοράς του ιστοπικού λόγου στο δείγμα από τον ιστοπικό λόγο του προτύπου προς τον ιστοπικό λόγο του προτύπου:

$$\delta (\%) = \frac{(R_x - R_{st})}{R_{st}} \times 1000 \quad (11.5)$$

όπου $R_x = \frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}}$ ο λόγος του δείγματος και $R_{st} = \frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}}$ ο λόγος του προτύπου.

Αρχικά ο Craig (1961) πρότεινε, ως πρότυπο, τη μέση ισοτοπική σύσταση του ωκεάνιου νερού, γνωστού και ως SMOW (Standard Mean Ocean Water), για τις ισοτοπικές αναλύσεις των ^{18}O και ^2H στο νερό. Στη συνέχεια ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (Δ.Ο.Α.Ε.) συνέθεσε ένα πρότυπο αναφοράς από απεσταγμένο νερό, το οποίο τροποποιήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχει μια ισοτοπική σύσταση κοντά στο SMOW (VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water).

Λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο υπολογισμού του δ , γίνεται αντιληπτό ότι το πρόσημο του είναι καθοριστικής σημασίας όσον αφορά την ερμηνεία του. Στην περίπτωση που το δ έχει θετική τιμή (άρα $R_x > R_{st}$), τότε το δείγμα παρουσιάζεται εμπλουτισμένο στα βαριά ισότοπα έναντι του προτύπου, ενώ στην περίπτωση που το δ έχει αρνητική τιμή (άρα $R_x < R_{st}$), τότε το δείγμα παρουσιάζεται φτωχότερο στα βαριά ισότοπα έναντι του προτύπου.

Ισοτοπική κλασμάτωση ονομάζεται η μεταβολή της τιμής ενός ισοτοπικού λόγου (π.χ. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) κατά τη μετάβαση των μορίων μιας χημικής ένωσης από μία φάση σε μία άλλη ή κατά τη διάρκεια μιας χημικής αντίδρασης. Η διαδικασία της ισοτοπικής κλασμάτωσης περιγράφεται μαθηματικά από τη σύγκριση των ισοτοπικών λόγων είτε δύο συστατικών, που συμμετέχουν σε μια κατάσταση ισορροπίας, είτε δύο συστατικών πριν και μετά από μια μη αντιστρέψιμη αντίδραση (Urey 1947, Matiatos 2010). Όταν σε μία διεργασία δεν λαμβάνει χώρα ισοτοπική κλασμάτωση, τα ισότοπα που μετέχουν σε αυτήν βρίσκονται σε ισοτοπική ισορροπία. Κατά τη διάρκεια εξέλιξης του υδρολογικού κύκλου ένα μέρος του περιβάλλοντος εμπλουτίζεται σε κάποια ισότοπα, ενώ κάποιο άλλο εξασθενίζει σε αυτά. Τα νερά που βρίσκονται στο έδαφος και στο υπέδαφος διατηρούν τα χαρακτηριστικά των μετεωρικών και επιφανειακών νερών, που διεισδύουν στο έδαφος, καθώς δεν μεταβάλλεται η σύστασή τους, εκτός και αν αναμιχθούν με άλλα νερά διαφορετικής ισοτοπικής προέλευσης.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες τα ισότοπα του υδρογόνου και του οξυγόνου μένουν ανεπηρέαστα από την αλληλοεπίδραση μεταξύ υπόγειου ύδατος και γεωλογικού υποβάθρου και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως δείκτες για τον προσδιορισμό της προέλευσης του νερού. Επίσης, τα σταθερά ισότοπα του οξυγόνου και του υδρογόνου χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό υδάτων με προέλευση από διαφορετικές περιοχές εμπλουτισμού λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα πιο βαριά ισότοπα σε σχέση με άλλα ελαφρύτερα. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της εξάτμισης τα βαρύτερα ισότοπα βρίσκονται σε αφθονία στο διάλυμα, σε αντίθεση με τα ελαφρύτερα, που παρουσιάζονται αυξημένα στην αέρια φάση, ενώ αντίστροφα κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης διαδοχικά πλημμυρικά γεγονότα εμφανίζονται ελαφρύτερα ως προς τη σύνθεση των ισωτόπων τους. Αυτό εξηγεί το ότι τα παράκτια μετεωρικά νερά είναι ισοτοπικά βαρύτερα σε σχέση με τα μετεωρικά νερά της ενδοχώρας. Τα ηπειρωτικά νερά εξασθενούν σε σταθερά ισότοπα παρουσιάζοντας αρνητικές τιμές των $\delta^2\text{H}$ και $\delta^{18}\text{O}$. Παραυτά, το θαλασσινό νερό της Μεσογείου, η οποία αποτελεί μια ημίκλειστη λεκάνη και χαρακτηρίζεται από έντονες συνθήκες εξάτμισης, λαμβάνει θετικές τιμές δ των παραπάνω ισωτόπων. Η σχέση μεταξύ ^2H και ^{18}O παρέχει ασφαλή εικόνα σχετικά με τη διαδικασία

ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού κατά μήκος της ευθείας γραμμής μεταξύ των δύο ακραίων τιμών (Ματιάτος 2010, Gat & Gonfiantini 1981, Λάππας 2018).

Η ισοτοπική σύνθεση του μετεωρικού νερού εξαρτάται από τις εκάστοτε τοπικές ιδιοσυνθήκες και από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι (Schwartz & Zhang 2003, Argiriou & Lykoutis 2005, Tziritis 2008) :

- ✓ το γεωγραφικό μήκος και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής
- ✓ το υψόμετρο
- ✓ η θερμοκρασία
- ✓ η απόσταση από τη θάλασσα

11.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΣΟΤΟΠΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

Οι μεθοδολογίες που βασίζονται στη χρήση φυσικών ισοτόπων για διάφορα υδρολογικά προβλήματα που απαντώνται κατά την αξιολόγηση, ανάπτυξη και διαχείριση των υδατικών πόρων καθιέρωσαν ένα επιστημονικό πεδίο γνωστό ως «Ισοτοπική Υδρολογία».

Τα ισότοπα τα οποία παράγονται με φυσικό τρόπο και ενσωματώνονται στον υδρολογικό κύκλο, συχνά αναφέρονται ως "περιβαλλοντικά ισότοπα". Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει επίσης και ισότοπα που απελευθερώθηκαν λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και τα οποία διασπείρονται στο περιβάλλον σε τοπική ή σε παγκόσμια κλίμακα μέσω φυσικών διεργασιών. Η δυναμική συμβολή των ισοτοπικών μεθόδων στην μελέτη των υδατικών πόρων μπορεί να ομαδοποιηθεί στις ακόλουθες κατηγορίες (Yurtsever & Araguas 1993):

- προσδιορισμός των φυσικών παραμέτρων που σχετίζονται με τη δυναμική της υπόγειας ροής και τη δομή του συστήματος,
- οριοθέτηση των διεργασιών (ανίχνευση διεργασίας) κατά τη ροή και την κυκλοφορία του νερού,
- μελέτη της προέλευσης του ύδατος και των αναλογιών ανάμιξης των συστατικών του (εντοπισμός των συστατικών),
- διερεύνηση της «χρονικής κλίμακας» των διάφορων γεγονότων που λαμβάνουν χώρα.

Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τα δεδομένα των ισοτόπων μπορούν να παρέχουν είτε βελτιωμένη κατανόηση των διαδικασιών που σχετίζονται με την προέλευση του νερού και τη δυναμική του συστήματος, είτε ποσοτικές εκτιμήσεις σχετικά με τη δυναμική ροή και τις παραμέτρους μεταφοράς. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται αναφορικά με τα υπόγεια και επιφανειακά υδατικά συστήματα συνοψίζονται ως εξής:

Στα υπόγεια νερά:

- οριοθέτηση του συστήματος
- προέλευση του νερού
- υδραυλική επικοινωνία είτε με επιφανειακά ύδατα είτε μεταξύ διαφορετικών υδροφόρων

- πηγές τροφοδοσίας και ρυθμός ανανέωσης των υδάτων
- προέλευση και μηχανισμός υφαλμύρισης ενός υδροφόρου
- αναλογίες ανάμιξης των συστατικών της ροής προερχόμενων από διαφορετικές πηγές
- χρόνος μεταφοράς της ροής των υπόγειων υδάτων και κατανομή τους
- δυναμική των γεωθερμικών συστημάτων
- παράμετροι που σχετίζονται με τις διαδικασίες μεταφοράς μαζών

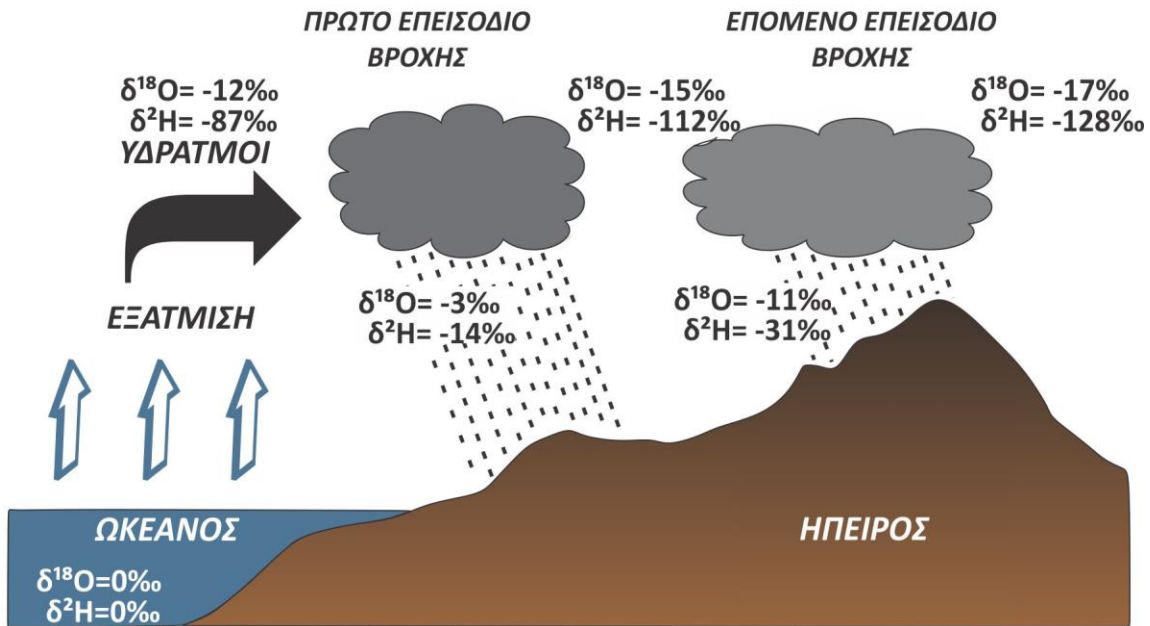
Στα επιφανειακά νερά:

- δυναμική των λεκανών απορροής (βροχόπτωση-απορροή)
- χρόνος παραμονής του νερού σε μία λεκάνη απορροής ή σε ένα επιφανειακό υδατικό σώμα
- υδραυλική επικοινωνία μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων υδάτων
- ρυθμός διάβρωσης εδάφους και ρυθμός διήθησης σε έναν ταμιευτήρα
- μηχανισμοί μεταφοράς μαζών στα επιφανειακά ύδατα.

Σημειώνεται ότι, αν και η χρήση τεχνητών ραδιενεργών ιχνηθετών (ή χημικών ανιχνευτών) εξακολουθεί να είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για επιτόπιες μελέτες βραχυπρόθεσμων διεργασιών, οι εφαρμογές των περιβαλλοντικών ισοτόπων αποτελούν τη μοναδική λύση για τη διερεύνηση υδρολογικών διεργασιών σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα (χωρική) και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Κατά συνέπεια, επιτρέπουν την παραγωγή ολοκληρωμένων (τόσο χωρικά όσο και χρονικά) βασικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την εμφάνιση και την κυκλοφορία των υδάτων. Η αξία τους έγκειται επίσης στην επιβεβαίωση (ή την απόρριψη) των εννοιολογικών μοντέλων ενός υδρολογικού συστήματος, καθώς και στην προκαταρκτική αξιολόγηση των συστημάτων μεγάλης κλίμακας ελλείπει επαρκών βασικών δεδομένων (Yurtsever & Araguas 1993).

11.4 ΣΧΕΣΗ $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ - ΜΕΤΕΩΡΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

Κατά την εξάτμιση του νερού των ωκεανών οι υδρατμοί που προκύπτουν υπολείπονται σε βαριά ισότοπα (^{18}O , ^2H) έναντι του νερού της θάλασσας. Στη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου, όταν οι υδρατμοί συναντήσουν ψυχρότερα στρώματα αέρα, τότε ένα μέρος αυτών συμμετέχει στο σχηματισμό ενός συμπυκνώματος (νέφους) όπου το νερό, λόγω αυτής της συμπύκνωσης, εμπλουτίζεται σε βαριά ισότοπα σε σχέση με τους αρχικούς υδρατμούς, ενώ οι εναπομείναντες υδρατμοί υπολείπονται σε βαριά ισότοπα έναντι των αρχικών. Οι υδρατμοί που συμπυκνώθηκαν πέφτουν σαν βροχή, ενώ οι εναπομείναντες υδρατμοί συνεχίζουν την κίνησή τους προς την ενδοχώρα, όπου συναντούν νέες ψυχρότερες μάζες με αποτέλεσμα το φαινόμενο να επαναλαμβάνεται (Εικόνα 11.2). Η προοδευτική μείωση της συγκέντρωσης των υδρατμών σε βαριά ισότοπα κατά την κίνησή τους προς τα ηπειρωτικά γίνεται σύμφωνα με τη διαδικασία του μοντέλου Rayleigh, ενώ το παραπάνω φαινόμενο είναι γνωστό με τον όρο «rainout effect» (Dotsika et al. 2010, Ματιάτος 2010).

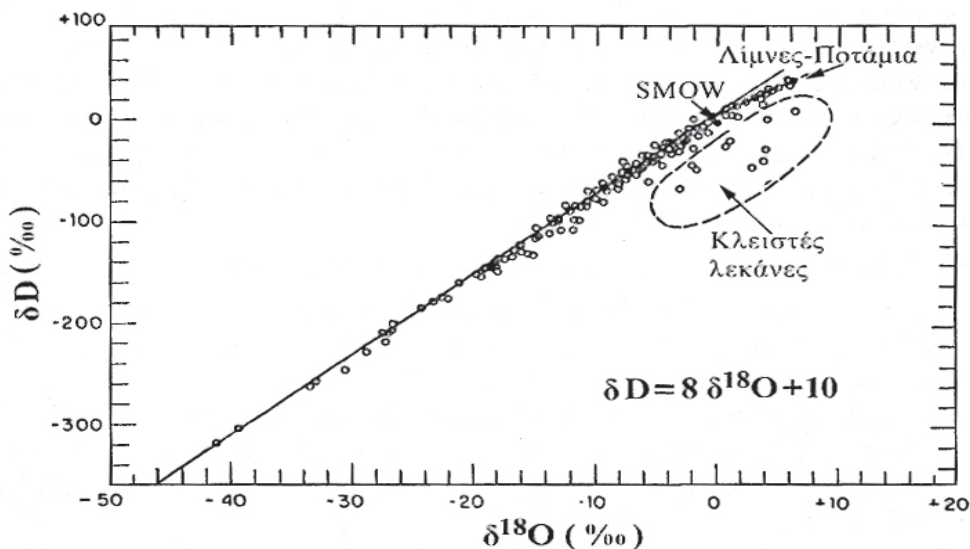


Εικόνα 11.2. Σχηματική απεικόνιση του «rainout effect», τροποποιημένο από τους Coplen et al. 2000 & Ματιάτο 2010).

Βάσει σειράς παρατηρήσεων και μετρήσεων που έχουν γίνει σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει καθοριστεί η συναρτησιακή σχέση μεταξύ των λόγων των βαρέων ισωτόπων $\delta^2\text{H}$ και $\delta^{18}\text{O}$ των σύγχρονων επιφανειακών νερών που δεν έχουν υποστεί δευτερογενή εξάτμιση και η οποία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \quad (11.6)$$

Η σχέση αυτή ορίζει μια ευθεία που είναι γνωστή ως GMWL (Global Meteoric Water Line) και εκφράζει την μέση αναλογική ισοτοπική σύνθεση του μετεωρικού νερού (Εικόνα 11.3, Craig 1961), πάντα όμως λογιζόμενη σε παγκόσμια κλίμακα, με τις αναπόφευκτες απλοποιήσεις και παραδοχές.



Εικόνα 11.3. Παγκόσμια Μετεωρική Γραμμή Νερού (Craig 1961)

Η ευθεία της Σχέσης 11.6 είναι της μορφής $y = ax + b$, όπου το “a” αποτελεί την κλίση της ευθείας. Η τιμή της κλίσης παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις ιδιοσυνθήκες της κάθε περιοχής αλλά και διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα. Σύμφωνα με τον Craig (1961), μια τιμή της κλίσης κοντά στο 8, υποδηλώνει καθαρή μετεωρική προέλευση του νερού, ενώ τιμές μεταξύ 4 και 6, είναι χαρακτηριστικές για νερά τα οποία προέρχονται από συνθήκες έντονης εξάτμισης σε σχέση με την ανανέωσή τους. Στην περίπτωση αυτή (έντονη εξάτμιση), η κλίση θα μπορούσε να είναι και υψηλότερη εφόσον η εξάτμιση λαμβάνει χώρα σε υγρό περιβάλλον και σύμφωνα με τους Gat & Gonfiantini (1981), υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ τους (υγρασία-κλίση). Τιμές του “a” πλησίον του 2 ή και μικρότερες υποδηλώνουν μοριακή διάχυση του νερού, που βρίσκεται σε αέρια κατάσταση, δια μέσου των εδαφικών πόρων (Sonntag et al. 1980, Tziritis 2008). Στην ειδική περίπτωση των υδροθερμικών συστημάτων, η τιμή του “a” γίνεται μηδέν, η ευθεία παρουσιάζεται παράλληλη προς τον άξονα x ($\delta^{18}\text{O}$) και καθορίζεται αποκλειστικά από την τιμή του σταθερού όρου “b”.

Η παράμετρος $b = y - ax$, ονομάζεται περίσσεια δευτερίου (deuterium excess ή d-excess) και αντιπροσωπεύει την τομή της ευθείας με τον άξονα y ($\delta^2\text{H}$). Η τιμή της περίσσειας δευτερίου σε μια περιοχή εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες και κυρίως από τη σχετική υγρασία στην πηγή προέλευσης των υδρατμών που, κατά κύριο λόγο, είναι η θάλασσα, με την οποία μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των δευτερογενών διεργασιών που επηρεάζουν το φυσικό κύκλο της εξάτμισης και συμπύκνωσης του νερού (Craig 1961, Gat et al. 1994, Sharp 2017). Τιμές του d-excess κοντά στο 10 υποδηλώνουν φυσιολογική ισοτοπική αναλογία, χωρίς επιδράσεις δευτερογενών διεργασιών ενώ μικρότερες τιμές υποδηλώνουν την συνεισφορά των συνθηκών έντονης εξάτμισης, ιδίως σε επιφανειακούς αποδέκτες (Zimmerman et al. 1967, Tziritis 2008). Ειδικότερα, τιμές μικρότερες του 5 υποδηλώνουν σημαντική εξάτμιση των όμβριων υδάτων, αφήνοντας τα υπολειμματικά υπόγεια ύδατα με χαμηλότερες τιμές περίσσειας δευτερίου και φτωχότερα σε $\delta^{18}\text{O}$ (Negrel et al. 2011). Στην περίπτωση που η τιμή του d-excess ξεπερνάει το 10, αυτό υποδηλώνει συνθήκες έντονης τροφοδοσίας, λόγω κατεΐσδυσης ενός υπόγειου αποδέκτη.

Η ισοτοπική σύσταση των κατακρημνισμάτων σε παγκόσμια κλίμακα επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες και για τον λόγο αυτό θα πρέπει για κάθε περιοχή να χρησιμοποιείται η Τοπική Μετεωρική Γραμμή (Local Meteoric Water Line). Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ισοτοπική σύσταση είναι οι εξής:

- α) η θερμοκρασία του αέρα, καθώς σύμφωνα με τον Dansgaard (1964), υπάρχει γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα και της μέσης ετήσιας τιμής των $\delta^2\text{H}$ και $\delta^{18}\text{O}$ των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε παγκόσμια κλίμακα,
- β) το γεωγραφικό πλάτος, καθώς οι τιμές του $\delta^{18}\text{O}$ μειώνονται όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος, διότι οι υδρατμοί που φτάνουν στις πολικές περιοχές βρίσκονται στο τέλος της διαδικασίας rainout, σύμφωνα με το μοντέλο Rayleigh, που αναφέρθηκε προηγουμένως,

γ) το υψόμετρο, καθώς σε κάθε περιοχή, ακόμα και με χαμηλό ανάγλυφο, η θερμοκρασία μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το υψόμετρο, διότι με την αύξηση του υψομέτρου μειώνεται η πίεση και επομένως απαιτείται μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας για τον κορεσμό των υδρατμών. Κατά συνέπεια σε μεγαλύτερα υψόμετρα, με την πτώση της θερμοκρασίας, η κατακρήμνιση είναι φτωχότερη σε ισότοπα. Ο παράγοντάς της αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στην ισοτοπική υδρολογία, καθώς παρέχει τη δυνατότητα διαχωρισμού της τροφοδοσίας των υπόγειων νερών από μεγαλύτερα και μικρότερα υψόμετρα,

δ) η ηπειρωτικότητα, σύμφωνα με την οποία κατά την κίνηση των αέριων μαζών προς την ενδοχώρα, η ισοτοπική τους σύσταση μεταβάλλεται, λόγω τοπογραφικού αναγλύφου και λόγω των μεγαλύτερων σε σχέση με τις παραθαλάσσιες περιοχές εποχικών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ισοτοπική σύσταση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο εσωτερικό των ηπείρων να παρουσιάζεται φτωχότερη και με έντονες εποχιακές διακυμάνσεις (Clark & Fritz 1997, Ματιάτος 2010),

ε) η εποχικότητα, καθώς οι μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, οι οποίες παρατηρούνται κυρίως στις ηπειρωτικές περιοχές, έχουν ως συνέπεια αντίστοιχες εποχικές διακυμάνσεις στην ισοτοπική σύσταση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων,

στ) το ύψος βροχόπτωσης, βάσει του οποίου παρατηρείται αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στην τιμή του $\delta^{18}\text{O}$ και του ύψους βροχής,

ζ) τα κινητικά φαινόμενα δευτερογενούς εξάτμισης. Οι περισσότερες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον υδρολογικό κύκλο, όπως η εξάτμιση, μετά το σχηματισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διαφοροποιούν τη σχέση $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ στο νερό, έτσι ώστε η ισοτοπική σύσταση να βρίσκεται κάτω από τη γραμμή του μετεωρικού νερού.

Σε τοπική κλίμακα δύναται να κατασκευαστεί η Τοπική Γραμμή Μετεωρικού Νερού (Local Meteoric Water Line), έτσι ώστε να αποφευχθούν υπεραπλουστεύσεις και λανθασμένες εκτιμήσεις από τη χρήση της παγκόσμιας μετεωρικής γραμμής. Για τον ελληνικό χώρο έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες και έχουν δημιουργηθεί μετεωρικές γραμμές για διάφορες περιοχές όπως η Μακεδονία, Στερεά Ελλάδα, Ήπειρο κ.α.). Οι Argiriou & Lykoudis (2006), συγκέντρωσαν μετεωρολογικά δεδομένα από 8 μετεωρολογικούς σταθμούς στην Ελλάδα πραγματοποιώντας ισοτοπικές αναλύσεις και δημιούργησαν τόσο τις τοπικές μετεωρικές γραμμές όσο και την γενική μετεωρική γραμμή για τον ελληνικό χώρο (Greece Meteoric Water Line), η οποία περιγράφεται από την εξίσωση:

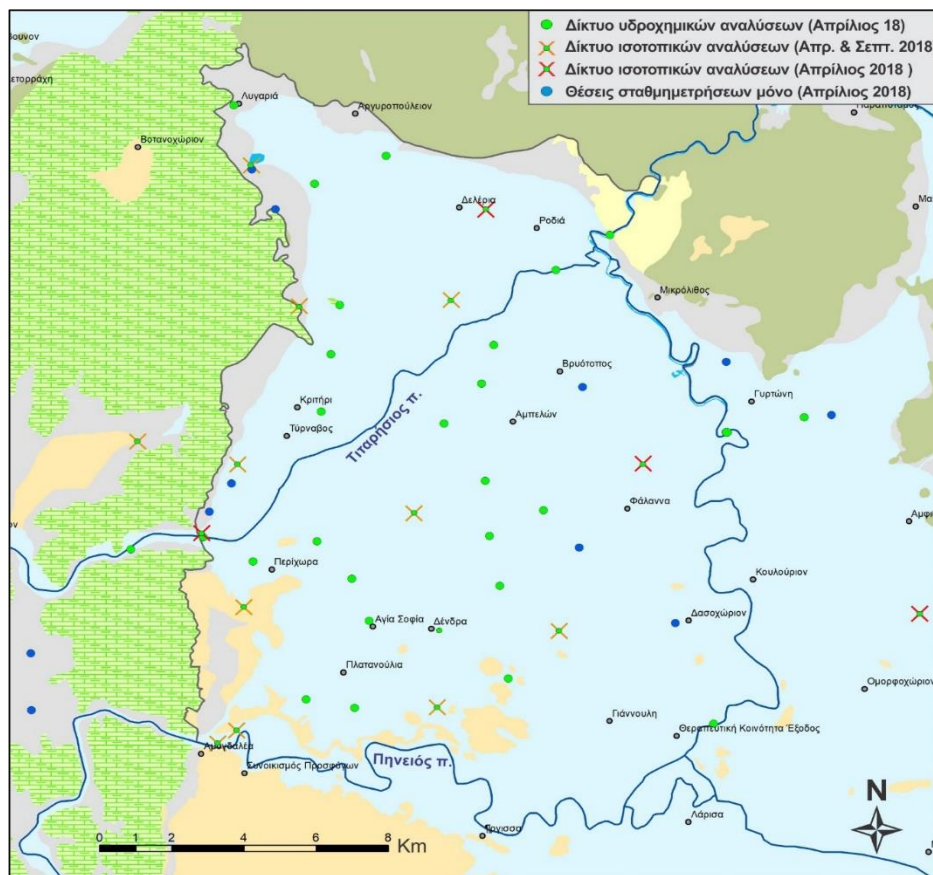
$$\delta^2\text{H} = 7.24\delta^{18}\text{O} + 8.2 \quad (11.7)$$

Αναφορικά με την περιοχή έρευνας, η καταλληλότερη μετεωρική γραμμή, από τις ήδη υπάρχουσες, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την συγκριτική εξαγωγή συμπερασμάτων, είναι αυτή που δημιουργήθηκε για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας (Thessaly Meteoric Water Line) (Dotsika et al. 2010) και η οποία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\delta^2\text{H} = 6.48\delta^{18}\text{O} + 1.7 \quad (8.8)$$

11.5 ΤΟΠΙΚΗ ΜΕΤΕΩΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν ισοτοπικές αναλύσεις σε δείγματα που ελήφθησαν από δύο περιόδους δειγματοληψίας. Η πρώτη περίοδος δειγματοληψίας ισοτόπων έλαβε χώρα παράλληλα με την 4η τακτική δειγματοληψία υδροχημικής παρακολούθησης, κατά την περίοδο Απριλίου-Μαΐου του 2018. Κατά την περίοδο αυτή συλλέχθηκαν 15 δείγματα ισοτόπων από επιλεγμένες θέσεις του υπάρχοντος δικτύου παρακολούθησης σύμφωνα με τις προδιαγραφές δειγματοληψίας της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency) (Aggarwal et al. 2009). Η δεύτερη περίοδος δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκε τον Σεπτέμβριο του 2018 αποκλειστικά για αναλύσεις ισοτόπων, με σκοπό να ληφθούν δείγματα από τις ίδιες θέσεις του δικτύου, έτσι ώστε να μελετηθεί η πιθανή διαφοροποίηση στην ισοτοπική σύσταση πριν και μετά την αρδευτική περίοδο. Ωστόσο, κατά την δεύτερη αυτή περίοδο συλλέχθηκαν 11 μόνο δείγματα, καθώς κάποιες από τις γεωτρήσεις του δικτύου είχαν τεθεί εκτός λειτουργίας αλλά και γιατί ο ποταμός Τιταρήσιος ήταν άνυδρος την περίοδο αυτή. Συνολικά 26 δείγματα ισοτόπων συλλέχθηκαν και στις 2 περιόδους δειγματοληψίας (Εικόνα 11.4), 23 δείγματα αφορούσαν υπόγειο νερό (εκ των οποίων 2 δείγματα πηγών) και 3 δείγματα επιφανειακών υδάτων.



Εικόνα 11.4. Δίκτυο δειγματοληψίας ισοτόπων για τις 2 περιόδους δειγματοληψίας (Απρίλιος 2018 & Σεπτέμβριος 2018).

Αναλυτικότερα συλλέχθηκαν:

- 21 δείγματα υδρογεωτρήσεων, 12 την πρώτη περίοδο και 9 τη δεύτερη περίοδο
- 2 δείγματα από τις πηγές Μάτι Τυρνάβου, 1 για κάθε περίοδο
- 2 δείγματα από τον Πηνειό κατά την είσοδό του στην υπολεκάνη, 1 για κάθε περίοδο
- 1 δείγμα από τον Τιταρήσιο κατά την είσοδό του στην υπολεκάνη, μόνο την πρώτη περίοδο.

Οι ισοτοπικές αναλύσεις των δειγμάτων αυτών για το $\delta^{18}\text{O}$ και το $\delta^2\text{H}$ πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδρολογίας του Πανεπιστημίου του Lubeck στη Γερμανία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων αναλύσεων και για τα 26 δείγματα.

Αναφορικά με τα υπόγεια νερά, οι τιμές για το ^{18}O κυμαίνονται από -9.8 ‰ έως -6.9 ‰, με μέση τιμή -8 ‰, ενώ οι τιμές για το ^2H κυμαίνονται από -66.2 ‰ έως -47.5 ‰, με μέση τιμή -51.3 ‰. Οι μέσες αυτές τιμές παρουσιάζουν πολύ μικρή διαφορά, συγκρινόμενες με τις μέσες τιμές που έχουν καταγραφεί από παλαιότερη μελέτη για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας (Dotsika et al. 2010) και οι οποίες είναι -8.29 ‰ και -51.1 ‰ αντίστοιχα.

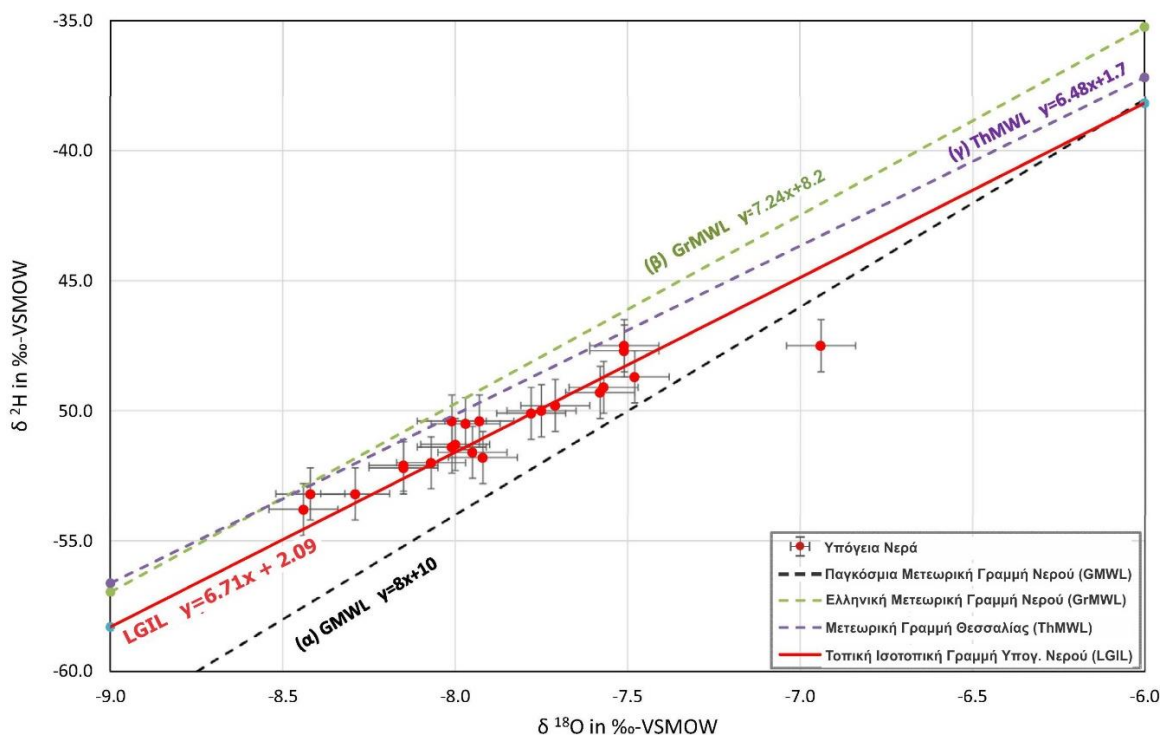
Πίνακας 11.1. Αποτελέσματα ισοτοπικών αναλύσεων ^{18}O και ^2H (δευτέριο) για όλα τα δείγματα.

Κωδικός Θέσης	Περίοδος Δειγματοληψίας	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Κατηγορία Δείγματος
SR 01	Απρίλιος 2018	-48.7	-7.48	υπόγειο νερό
MSp	Απρίλιος 2018	-50.5	-7.97	υπόγειο / πηγή
SR 111	Απρίλιος 2018	-49.8	-7.71	υπόγειο νερό
LB 214	Απρίλιος 2018	-66.2	-9.82	υπόγειο νερό
LB 279	Απρίλιος 2018	-47.5	-6.94	υπόγειο νερό
SR 114	Απρίλιος 2018	-50.1	-7.78	υπόγειο νερό
FAKAS	Απρίλιος 2018	-49.3	-7.58	υπόγειο νερό
SR 112	Απρίλιος 2018	-50.0	-7.75	υπόγειο νερό
LB 251	Απρίλιος 2018	-51.6	-7.95	υπόγειο νερό
Λ4	Απρίλιος 2018	-47.5	-7.51	υπόγειο νερό
LB 152	Απρίλιος 2018	-53.8	-8.44	υπόγειο νερό
LB 129	Απρίλιος 2018	-52.1	-8.15	υπόγειο νερό
KARAIKOS	Απρίλιος 2018	-53.2	-8.42	υπόγειο νερό
SR 111	Σεπτέμβριος 2018	-49.1	-7.57	υπόγειο νερό
LB 251	Σεπτέμβριος 2018	-51.8	-7.92	υπόγειο νερό
Λ41	Σεπτέμβριος 2018	-47.7	-7.51	υπόγειο νερό
LB 152	Σεπτέμβριος 2018	-53.2	-8.29	υπόγειο νερό
LB 129	Σεπτέμβριος 2018	-52.2	-8.15	υπόγειο νερό
LB 279	Σεπτέμβριος 2018	-51.3	-8.00	υπόγειο νερό
SR 114	Σεπτέμβριος 2018	-50.4	-7.93	υπόγειο νερό
SR 112	Σεπτέμβριος 2018	-50.4	-8.01	υπόγειο νερό
FAKAS	Σεπτέμβριος 2018	-52.0	-8.07	υπόγειο νερό
MSp	Σεπτέμβριος 2018	-51.4	-8.01	υπόγειο / πηγή
Pin	Σεπτέμβριος 2018	-46.7	-7.25	επιφανειακό / ποτάμι
Tin	Απρίλιος 2018	-50.2	-7.81	επιφανειακό / ποτάμι
Pin	Απρίλιος 2018	-48.5	-7.77	επιφανειακό / ποτάμι

Η προβολή των τιμών του Πίνακα 11.1 για τα υπόγεια νερά σε ένα διάγραμμα $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$ απεικονίζεται στην Εικόνα 11.5, με την προσθήκη της γραμμής παλινδρόμησης, η οποία προκύπτει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η ευθεία αυτή με τύπο:

$$\delta^2\text{H} = 6.71 * \delta^{18}\text{O} + 2.09 \quad (11.9)$$

αποτελεί την Τοπική Ισοτοπική Γραμμή των Υπογείων Υδάτων (Local Groundwater Isotopic regression Line – LGIL) για την περιοχή έρευνας (Vrouhakis et al. 2019a) και αποτελεί μέτρο σύγκρισης σε σχέση με την Τοπική Μετεωρική Γραμμή της Θεσσαλίας (Σχέση 11.8). Στο Διάγραμμα 11.1, εκτός από τις 2 προαναφερόμενες γραμμές, υπάρχουν και η Ελληνική Μετεωρική Γραμμή, που εκφράζεται από τη Σχέση 11.7 καθώς και η Παγκόσμια Μετεωρική Γραμμή (Σχέση 11.6).

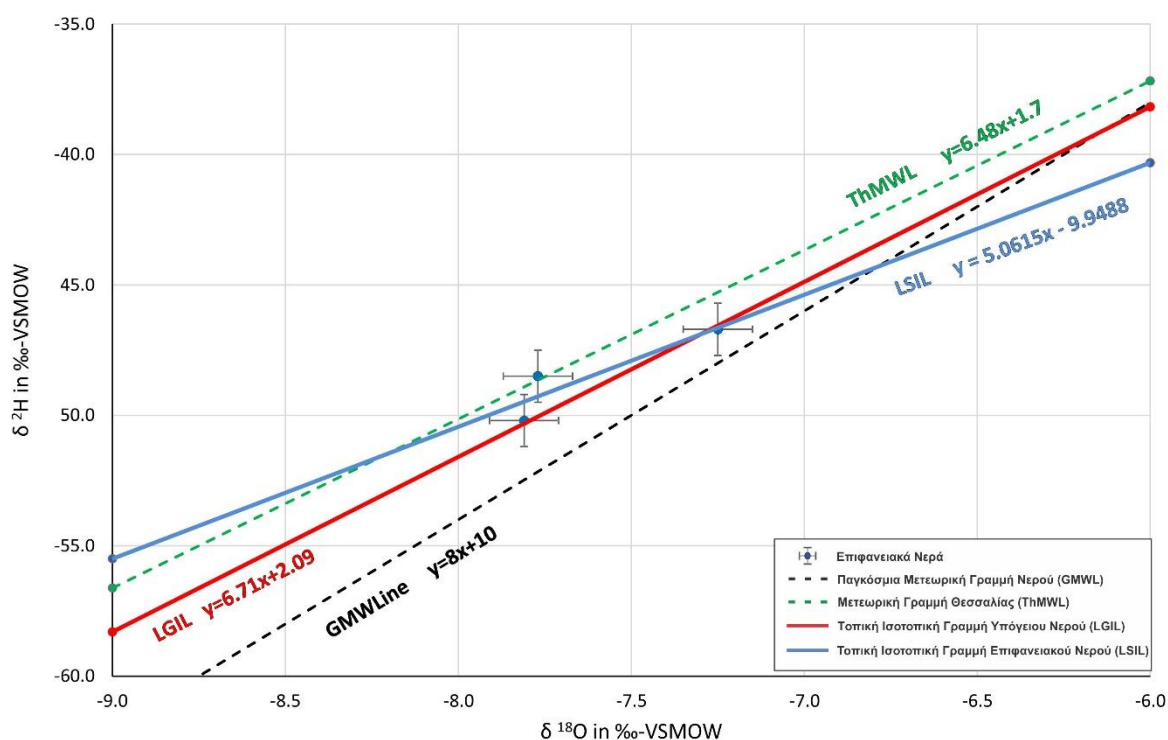


Διάγραμμα 11.1. Τοπική Ισοτοπική Γραμμή Υπογείων Υδάτων υπολεκάνης Τυρνάβου (LGIL) μαζί με (α) Μετεωρική Γραμμή Θεσσαλίας (ThMWL-Dotsika et al. 2010) (β) Ελληνική Μετεωρική Γραμμή (GrMWL-Argiriou & Lykoudis 2006) (γ) Παγκόσμια Μετεωρική Γραμμή (GMWL-Craig 1961).

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 11.1, η Τοπική Ισοτοπική Γραμμή για τα υπόγεια ύδατα είναι σχεδόν παράλληλη με την Μετεωρική Γραμμή της Θεσσαλίας και παρουσιάζει μικρή μετατόπιση σε σχέση με αυτήν. Αυτό έρχεται ως συνέπεια των σχεδόν ταυτώσεων μέσω των τιμών του οξυγόνου και του δευτερίου της περιοχής με τις αντίστοιχες τιμές για τη Θεσσαλία. Σύμφωνα με τη Σχέση 11.9, η Τοπική Ισοτοπική Γραμμή Υπογείων υδάτων παρουσιάζει κλίση 6.71 και τιμή d-excess ίση με 2.09. Με βάση τις βιβλιογραφικές αναφορές, που ήδη αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (Craig 1961, Gat & Gonfiantini 1981), για την κλίση της μετεωρικής γραμμής, γίνεται αντιληπτό ότι στην

περιοχή έρευνας, η επίδραση των διεργασιών της εξάτμισης είναι έντονη όσον αφορά στην προέλευση των υπόγειων υδάτων και μάλιστα οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε ένα υγρό περιβάλλον. Επίσης, η χαμηλή τιμή της d-excess σε σχέση με την τιμή που προκύπτει από την παγκόσμια μετεωρική γραμμή, υποδηλώνει και αυτή σημαντική εξάτμιση των όμβριων υδάτων, αφήνοντας έτσι τα υπολειμματικά υπόγεια ύδατα με χαμηλότερες τιμές περίσσειας δευτερίου και φτωχότερα σε $\delta^{18}\text{O}$ (Negrel et al. 2011). Οι αρνητικές τιμές των μέσων τιμών του $\delta^2\text{H}$ και του $\delta^{18}\text{O}$, έρχονται ως συνέπεια της γενικής επιρροής της εξάτμισης στην περιοχή και ως εκ τούτου η ισοτοπική υπογραφή των υπόγειων υδάτων υποδεικνύει ότι είναι φτωχότερα στα βαριά ισότοπα, κάτι το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τη χαμηλή τιμή της περίσσειας δευτερίου.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τα δείγματα των επιφανειακών υδάτων, από τους ποταμούς Πηνειό και Τιταρήσιο, προβάλλοντας δηλαδή τα ζεύγη τιμών $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ σε ένα ορθοκανονικό σύστημα αξόνων, προκύπτει η ευθεία που φαίνεται στο Διάγραμμα 11.2.



Διάγραμμα 11.2. Τοπική Ισοτοπική Γραμμή Επιφανειακών Υδάτων υπολεκάνης Τυρνάβου (LSIL) μαζί με (α) Μετεωρική Γραμμή Θεσσαλίας (ThMWL-Dotsika et al. 2010) (β) Τοπική Ισοτοπική Γραμμή Υπόγειων Υδάτων (LGIL) (γ) Παγκόσμια Μετεωρική Γραμμή (GMWL-Craig 1961).

Η ευθεία αυτή ορίζει την Τοπική Ισοτοπική Γραμμή Επιφανειακών Υδάτων και έχει τύπο:

$$\delta^2\text{H} = 5.06 * \delta^{18}\text{O} - 9.95 \quad (11.10)$$

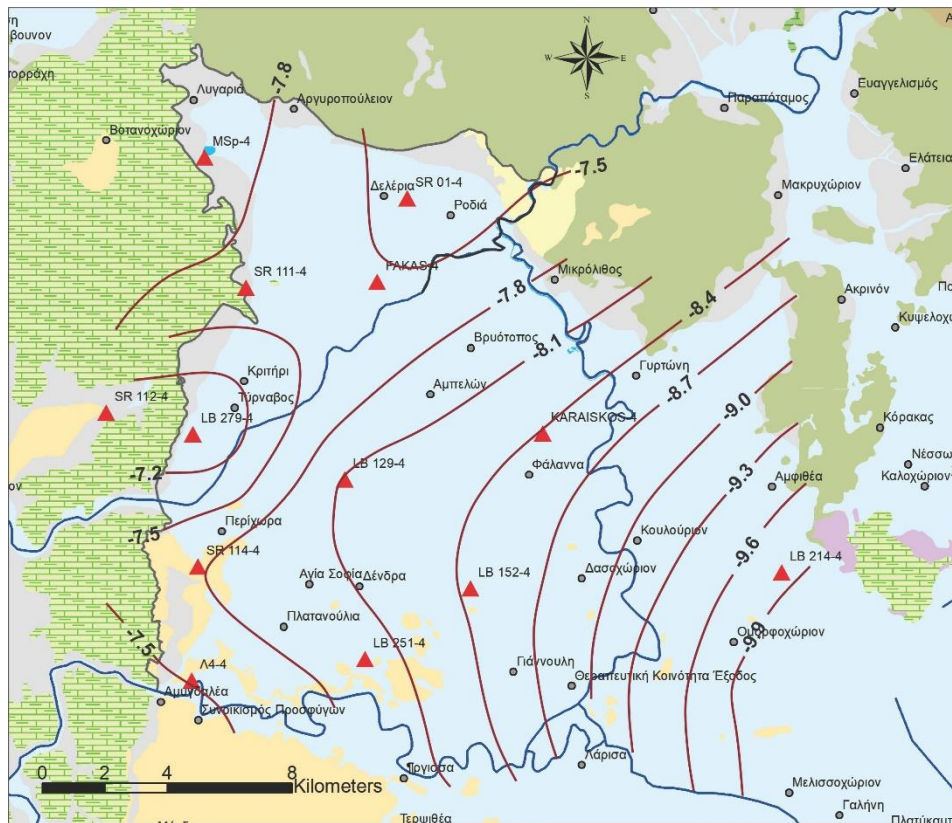
Στο ίδιο διάγραμμα προβάλλονται επίσης η Μετεωρική Γραμμή της Θεσσαλίας (ThMWL), η Παγκόσμια Μετεωρική Γραμμή (GMWL) και η Τοπική Ισοτοπική Γραμμή των Υπόγειων Υδάτων (LGIL), όπως αυτή προέκυψε από τα δείγματα των υπόγειων υδάτων. Αν και ο

αριθμός των επιφανειακών δειγμάτων νερού θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερος, ωστόσο οι τιμές της κλίσης (5.06) και της περίσσειας δευτερίου (-9.95), που προκύπτουν από την ευθεία της σχέσης (11.10), φανερώνουν την επίδραση της εξάτμισης στους επιφανειακούς αυτούς αποδέκτες. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις αντίστοιχες τιμές της ευθείας των υπόγειων υδάτων (Σχέση 11.9), θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι, λόγω της διαφοράς στην ισοτοπική αναλογία μεταξύ υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, φαίνεται ότι δεν υπάρχει υδραυλική αλληλεπίδραση μεταξύ τους ή αν υπάρχει δεν είναι σημαντική.

11.6 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΟΤΟΠΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων των ισοτόπων του ^{18}O δημιουργήθηκε χάρτης χωρικής κατανομής τους, αναφορικά με τα δείγματα του υπόγειου νερού (Εικόνα 11.5), με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα για τους μηχανισμούς λειτουργίας και τροφοδοσίας της αλλουβιακής υπολεκάνης Τυρνάβου. Χρησιμοποιήθηκαν οι ισοτοπικές αναλύσεις της πρώτης περιόδου δειγματοληψίας (Απρίλιος 2018), καθώς τότε συλλέχθηκαν και τα περισσότερα δείγματα. Τα δεδομένα τόσο από προηγούμενες μελέτες όσο και από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα αυτής της έρευνας, υποδεικνύουν ως κύρια τροφοδοσία του αλλουβιακού συστήματος, τον καρστικό όγκο Δαμασίου-Τυρνάβου στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης και ως δευτερεύουσα πηγή τροφοδοσίας τον ποταμό Τιταρήσιο και σε κάποιες περιπτώσεις και τον Πηνειό ποταμό.

Σύμφωνα με όσα έχουν ειπωθεί μέχρι τώρα σχετικά με την επίδραση του υψομέτρου και της ηπειρωτικότητας στην ισοτοπική σύσταση των κατακρημνισμάτων (Παράγραφος 11.4) και με βάση τους μηχανισμούς τροφοδοσίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα περίμενε κανείς στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης να παρατηρούνται οι περισσότερο αρνητικές τιμές του $\delta^{18}\text{O}$, καθώς στον ορεινό όγκο Δαμασίου – Τυρνάβου πέφτουν τα κατακρημνίσματα, τα οποία τροφοδοτούν την υπολεκάνη, και σταδιακά όσο μεταφερόμαστε προς τα ανατολικά, πλησιάζοντας προς τη θάλασσα θα έπρεπε οι τιμές του $\delta^{18}\text{O}$ να γίνονται λιγότερο αρνητικές.



Εικόνα 11.5. Χωρική κατανομή $\delta^{18}\text{O}$ για τα υπόγεια νερά κατά την περίοδο Απριλίου 2018.

Από τον χάρτη χωρικής κατανομής (Εικόνα 11.5) ωστόσο, κάτι τέτοιο συμβαίνει μόνο στο ΒΔ τμήμα της υπολεκάνης, ενώ όσο μεταφερόμαστε προς το κεντρικό και ΝΑ τμήμα οι τιμές γίνονται περισσότερο αρνητικές, με την υψηλότερη αρνητική τιμή αυτή της γεώτρησης LB214 στην περιοχή του Ομορφοχωρίου, ανατολικά του Πηνειού ποταμού.

Μια πρώτη ερμηνεία του φαινομένου αυτού θα μπορούσε να είναι η εξής: η τροφοδοσία από το καρστικό σύστημα Δαμασίου – Τυρνάβου στα δυτικά περιθώρια, δημιουργεί μια ενιαία υδροφορία στο ΒΔ τμήμα της υπολεκάνης κοντά στον κώνο κορημάτων του Τιταρήσιου ποταμού, η οποία προς το κέντρο της υπολεκάνης και προς τα ΝΔ μεταπίπτει σε ένα σύστημα δύο υδροφοριών, μιας φρεάτιας και μιας βαθύτερης υδροφορίας. Θα μπορούσε λοιπόν να ειπωθεί ότι, ένα μέρος της ροής στα βαθύτερα τμήματα του κατώτερου υδροφόρου, εξαιτίας κάποιων αιτιών, να μην έχει υποστεί αλλοίωση, λόγω των απολήψεων από τις γεωτρήσεις, της αρχικής ισοτοπικής του σύστασης. Τα αίτια αυτά θα μπορούσε να είναι π.χ. μια όχι τόσο μεγάλη ανάγκη ζήτησης αρδευτικού νερού (ή όχι τόσο μεγάλη ώστε να υπεραντληθεί το σύστημα), με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν υψηλές απολήψεις ή/και να ήταν αρκετά πλούσια τα προηγούμενα υδρολογικά έτη. Το κατώτερο αυτό τμήμα της υδροφορίας, εμπλουτίζεται συνεχώς από το καρστικό σύστημα και ως εκ τούτου δεν έχουν δημιουργηθεί κατακόρυφες προς τα επάνω κλίσεις, έτσι ώστε να δημιουργήσουν αλλοιώσεις στην υπογραφή των ισοτόπων. Το τμήμα αυτό της ροής θα μπορούσε να φθάνει θεωρητικά και ανατολικότερα του Πηνειού και επομένως αυτό που αναλύθηκε στην περιοχή αυτή να έχει μια υπογραφή ισοτοπικών λόγων, η οποία δείχνει

ένα πολύ ελαφρύ νερό, φτωχό δηλαδή σε βαριά ισότοπα, και το οποίο υποδεικνύει καρστική προέλευση κάποιου υψομέτρου.

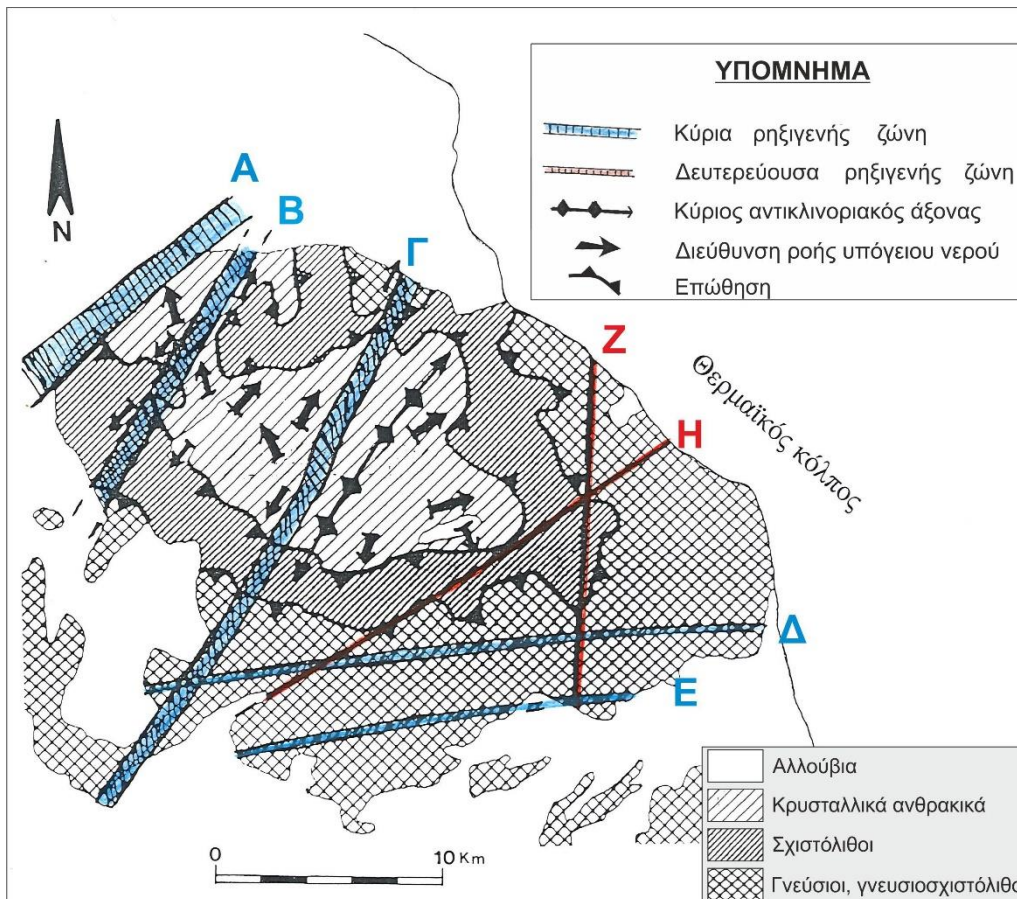
Η κατανομή των ισοτόπων στα δυτικά κράσπεδα με τις όχι και τόσο μεγάλες αρνητικές τιμές, θα μπορούσε να δικαιολογηθεί διότι στο τμήμα αυτό της υπολεκάνης το καρστικό νερό τροφοδοσίας αναμιγνύεται (α) με το νερό του ποταμού Τιταρήσιου, λόγω της παρουσίας των χαλαρών υλικών, (β) με τις πλευρικές εισροές από το καρστ, οι οποίες καταλήγουν μέσα στα αλλουβιακά υλικά της υπολεκάνης και (γ) με τις επιστροφές των αρδεύσεων. Λόγω της ανάμιξης όλων αυτών των νερών η ισοτοπική σύσταση του καθαρού νερού τροφοδοσίας προφανώς επηρεάζεται και έτσι δίνει τις μέσες αυτές αρνητικές τιμές. Το φαινόμενο αυτό της ανάμιξης πηγαίνοντας προς τα ανατολικά και σύμφωνα πάντα με το μοντέλο του διαχωρισμού των υδροφοριών, ελαχιστοποιείται ή/και σταματάει εντελώς να λαμβάνει χώρα.

Η παραπάνω ερμηνεία της ισοτοπικής κατανομής δεν μπορεί να αποδειχθεί με τις μέχρι τώρα μετρήσεις και τα μέχρι τώρα δεδομένα, εξηγεί όμως ως ένα βαθμό το φαινόμενο και ως εκ τούτου χρήζει αναφοράς και περαιτέρω έρευνας. Ωστόσο υπάρχουν και κάποια ερωτήματα που δεν απαντώνται με κύριο το γιατί, εφόσον ισχύει η θεωρία αυτή, η ισοτοπική αυτή υπογραφή της καρστικής υδροφορίας κάποιου υψομέτρου δεν εμφανίζεται στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης, όπου και εκεί υπάρχει σαφής διαχωρισμός των υδροφοριών, αλλά ανατολικότερα στην περιοχή του Ομορφοχωρίου. Επίσης, η μέγιστη αυτή αρνητική τιμή για το $\delta^{18}\text{O}$, στην περιοχή του Ομορφοχωρίου, βάσει βιβλιογραφίας για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας (Payne 1976) αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα υψόμετρα τροφοδοσίας από το μέγιστο υψόμετρο του ορεινού όγκου Δαμασίου-Τυρνάβου (900m).

Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάγκη για περαιτέρω μελέτη της ευρύτερης περιοχής προς τα ανατολικά της υπολεκάνης, με σκοπό να εξαχθεί μια πιο ικανοποιητική ερμηνεία της ισοτοπικής αυτής κατανομής στην περιοχή του Ομορφοχωρίου. Σε απόσταση 18 km περίπου ΒΑ της γεώτρησης LB214, στην οποία η τιμή του $\delta^{18}\text{O}$ είχε την μικρότερη αρνητική τιμή (-9.82) βρίσκεται ο ορεινός όγκος της Όσσας. Η Όσσα δομείται κυρίως από προαλπικούς και αλπικούς σχηματισμούς, οι οποίοι γεωτεκτονικά εντάσσονται στις ενότητες α) της Όσσας, β) των Αμπελακίων και γ) της Πελαγονικής. Κατά θέσεις απαντώνται χερσαίας και λιμναίας προέλευσης μεταλλικοί σχηματισμοί του Νεογενούς και Τεταρτογενούς μικρής όμως έκτασης και πάχους. Η ενότητα της Όσσας αποτελείται από μια σειρά κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και δολομιτών, οι οποίοι έχουν ορατό πάχος έως 1000m ενώ προς τα επάνω η σειρά περνά κανονικά σε μετα-φλύσχη. Οι σχηματισμοί της ενότητας Αμπελακίων καταλαμβάνουν ικανή έκταση της Όσσας με πάχος που κατά θέσεις ξεπερνά τα 800m. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι εξ' ολοκλήρου μεταμορφωμένοι, σε συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλών θερμοκρασιών, και αποτελούνται από ιζηματογενούς προέλευσης πετρώματα. Τέλος, η ενότητα της Πελαγονικής ζώνης περιλαμβάνει μεταμορφωμένους σχηματισμούς: α) του Παλαιοζωικού, πάχους έως 600m, β) του Νεοπαλαιοζωικού έως Κάτω-Μέσο Τριαδικού, πάχους μέχρι 600m και γ) του

Προανωκρητιδικού τεκτονικού καλύμματος, πάχους μέχρι 250m και μια σειρά μαρμάρων του Ανώτερου Κρητιδικού, πάχους 200 μέτρων περίπου (Godfriaux 1968, Τσαγκαλίδης 1990, Κατσικάτσος 1992).

Αναφορικά με την τεκτονική της περιοχής, σύμφωνα με τους Σταμάτη και Μιγκίρο (2004), οι σημαντικότερες εγκάρσιες δομές, οι οποίες προκύπτουν από την στατιστική ανάλυση των τεκτονικών στοιχείων της Όσσας, απεικονίζονται στην Εικόνα 11.6 και είναι οι εξής:



Εικόνα 11.6. Κύριες (A-E) και δευτερεύουσες (Z-H) ζώνες διάρρηξης της Όσσας (Σταμάτης & Μιγκίρος 2004).

A) η ζώνη “Γόννων-Τεμπών-Πηνειού”, BA διεύθυνσης,
 B) η ζώνη “Ελάτειας-Αμπελακίων-Ομόλιου”, BBA διεύθυνσης,
 Γ) η ζώνη “Συκουρίου-Σπηλιάς-Στομίου”, BBA διεύθυνσης,
 Δ) η ζώνη “Όσσας-Ανατολής-Μεγαλόβρυσου-Μελίβοιας”, διεύθυνσης A-Δ,
 E) η ζώνη “Δήμητρας-Μεταξοχωρίου-Αγιάς”, διεύθυνσης A-Δ

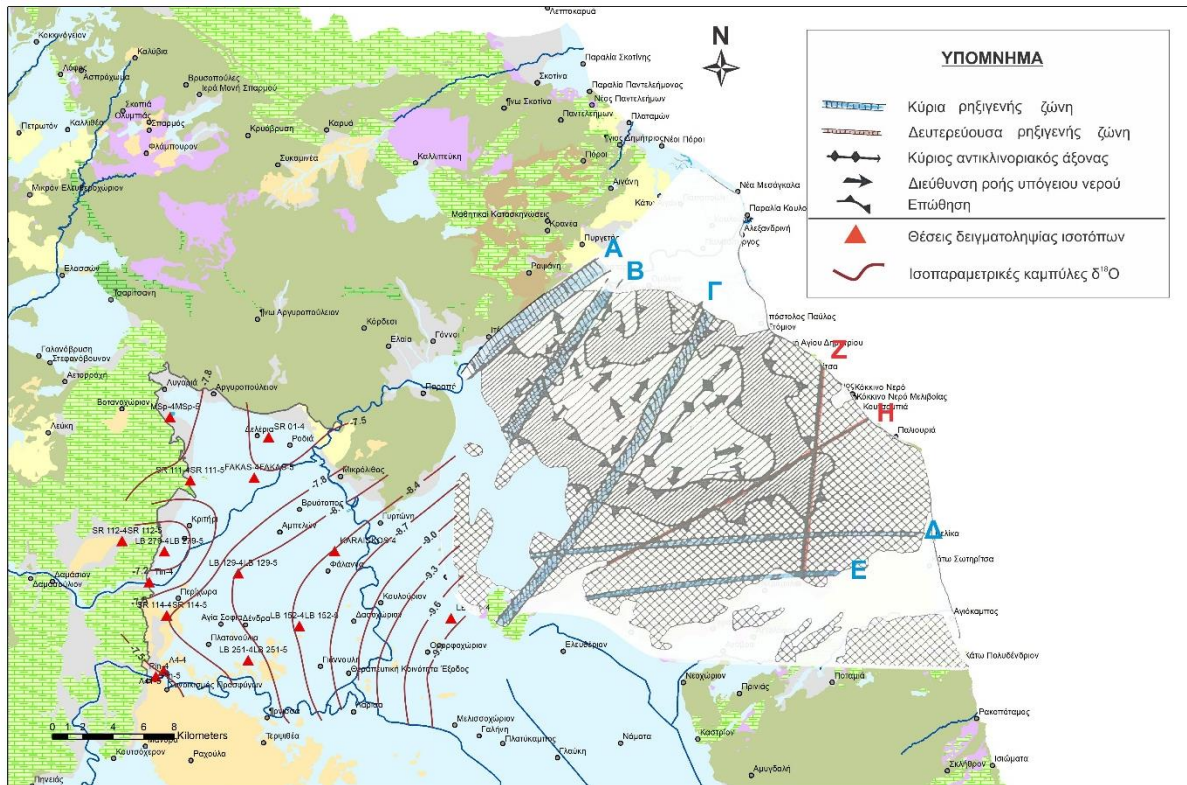
και οι δύο δευτερεύουσες:

Z) η ζώνη “Καρίτσας-Μεγαλόβρυσου-Αγιάς”, διεύθυνσης B-N,
 H) η ζώνη “Μαρμαρινής-Κόκκινων Νερών”, διεύθυνσης BBA διεύθυνσης.

Η έντονη διάρρηξη, η οποία διαπιστώνεται κατά μήκος των ζωνών αυτών, σε συνδυασμό με την αντικλινορική δομή της Όσσας, αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην διαμόρφωση

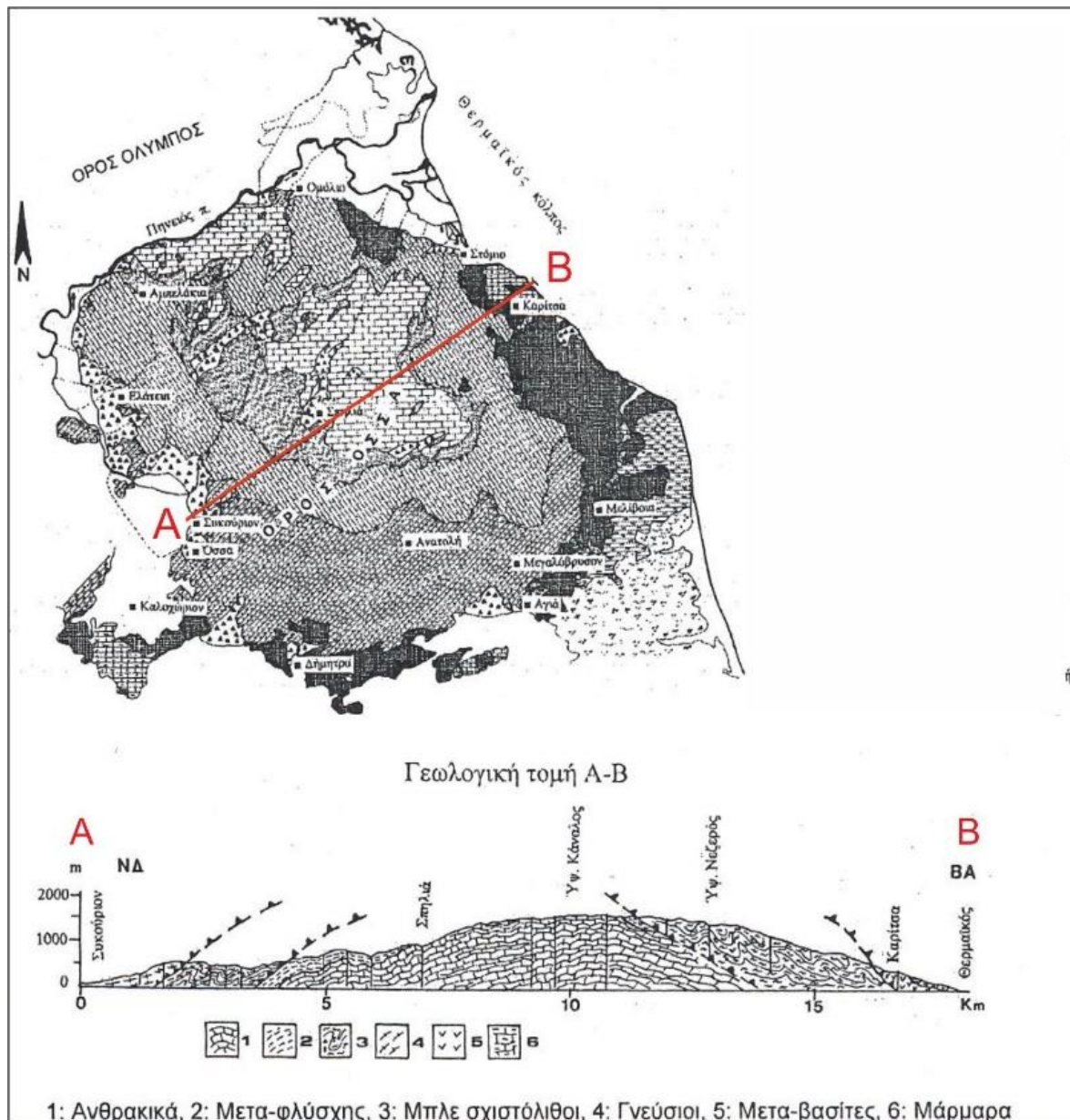
των υπόγειων ροών. Στην Εικόνα 11.6 παρουσιάζονται οι διευθύνσεις ροής σε σχέση με την τεκτονική δομή που επικρατεί.

Στην Εικόνα 11.7 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της υπέρθεσης της Εικόνας 11.6, με τις ζώνες διάρρηξης και τις κατευθύνσεις ροής, πάνω στον χάρτη της χωρικής κατανομής του δ¹⁸O για τον Απρίλιο του 2018, της περιοχής έρευνας.



Εικόνα 11.7. Υπέρθωση της τεκτονικής δομής και των διευθύνσεων ροής του ορεινού όγκου της Όσσας (Σταμάτης & Μιγκίρος 2004) στον χάρτη χωρικής κατανομής του δ¹⁸O της περιοχής έρευνας για τον Απρίλιο του 2018.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 11.6, μέσα στους έντονα καρστικοποιημένους ανθρακικούς σχηματισμούς της Όσσας (Σταμάτης & Μιγκίρος 2004), υπάρχουν κύριες ρηξιγενείς ζώνες, οι οποίες συνεχίζονται και μέσα στους περιμετρικούς σχιστόλιθους και γνεύσιους προς τα νοτιοδυτικά. Κατά μήκος λοιπόν αυτών των ρηξιγενών ζωνών υπάρχουν οι δίοδοι κίνησης του υπόγειου νερού προς την περιοχή έρευνας, μέσω των ζωνών Γόνων-Τεμπών-Πηνειού, Ελάτειας-Αμπελακίων-Ομόλιου και Συκουρίου-Σπηλιάς-Στομίου (κύριες ρηξιγενείς ζώνες Α, Β, Γ). Η έντονη καρστικοποίηση δεν εμποδίζει το νερό να ακολουθήσει την κλίση των στρωμάτων και έτσι σε συνδυασμό με την αντικλιτική δομή της Όσσας (Εικόνα 11.8) μέρος του υπόγειου νερού, διαφεύγει προς τα ανατολικά τμήματα της υπολεκάνης Τυρνάβου. Το νερό αυτό, προερχόμενο από τα υψηλότερα στρώματα του ορεινού όγκου της Όσσας, πιθανότατα τροφοδοτεί τον υδροφόρο ανατολικά του Πηνειού (λεκάνη Γυρτώνης-Ομορφοχωρίου), χωρίς ωστόσο να είναι γνωστός ο βαθμός τροφοδοσίας και ως πιο σημείο χωρικά φθάνει η συνεισφορά του νερού αυτού στους υδροφόρους της περιοχής έρευνας.



Εικόνα 11.8. Αντικλινική δομή της Όσσας και κλίσεις των στρωμάτων (Σταμάτης & Μιγκίρος 2004).

Το μεγάλο υψόμετρο των ανθρακικών σχηματισμών της Όσσας (μέγιστο υψόμετρο 1978 m), δικαιολογεί την ύπαρξη των πιο ελαφρών ισοτόπων ^{18}O στις γεωτρήσεις της περιοχής εκατέρωθεν του Πηνειού στο ανατολικό τμήμα της υπολεκάνης, δίνοντας την χωρική κατανομή του $\delta^{18}\text{O}$ που φαίνεται στις Εικόνες 11.5 και 11.7. Οι υψηλές αρνητικές τιμές του $\delta^{18}\text{O}$ (κοντά στο -10) υποδηλώνουν, όπως ειπώθηκε παραπάνω, νερό μετεωρικής προέλευσης. Λαμβάνοντας υπόψη τη βιβλιογραφία (Payne et al. 1976), όσον αφορά τους παράγοντες επηρεασμού της ισοτοπικής σύστασης των κατακρημνισμάτων για περιοχές της Θεσσαλίας με παρόμοια χαρακτηριστικά, προκύπτει ένα υψόμετρο τροφοδοσίας μεγαλύτερο από 1200m.

Αναφορικά με την χημική σύσταση του νερού αυτού (Σταμάτης & Μιγκίρος 2004), που προέρχεται από τα ανώτερα ανθρακικά στρώματα του ορεινού όγκου της Όσσας, έγινε προσπάθεια συσχέτισής του με τη χημική σύσταση του νερού των γεωτρήσεων του ανατολικού τμήματος της ευρύτερης περιοχής έρευνας, εκατέρωθεν του Πηνειού. Πριν την οποιαδήποτε σύγκριση ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι το καρστικό νερό της Όσσας κατά την κίνηση του προς τη λεκάνη Γυρτώνης-Ομορφοχωρίου, περνάει μέσα από διαβρωμένους πιθανότατα σχιστόλιθους, λόγω της συνεχούς ροής νερού από το εσωτερικό τους, αλλά και υπερβασικά πετρώματα, τα οποία μπορεί να μην παρουσιάζουν σημαντική υδροφορία ωστόσο περιέχουν νερό (Stamatis 1999, Σταμάτης & Ζαγγανά 2004). Το νερό που τελικά φθάνει στην ευρύτερη περιοχή έρευνας από την Όσσα, μπορεί να χαρακτηριστεί ως νερό μίξης που προήλθε από αρχικό καρστικό νερό και ανάμιξή του με νερό μεταμορφωμένων και υπερβασικών πετρωμάτων, χωρίς να αποκλείονται και οι διαδικασίες ιοντοανταλλαγής.

Στον Πίνακα 11.2 φαίνονται τα αποτελέσματα των υδροχημικών αναλύσεων των ανθρακικών σχηματισμών της Όσσας (μέση τιμή) και της γεώτρησης LB214 (μέση τιμή), η οποία και παρουσιάζει την μεγαλύτερη αρνητική τιμή $\delta^{18}\text{O}$ (-9.82). Από τη σύγκριση των αναλύσεων προκύπτουν σημαντικές διαφορές στις συγκεντρώσεις των κατιόντων Ca, Na και K, καθώς και των ιχνοστοιχείων Fe και Mn. Πιο συγκεκριμένα η γεώτρηση παρουσιάζει πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις Na-K και πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις Ca σε σχέση με τα ανθρακικά νερά γεγονός που μαρτυρά ξεκάθαρα φαινόμενα ιοντοανταλλαγής, τα οποία λαμβάνουν χώρα. Επίσης, οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων Fe και Mn είναι κατά πολύ μεγαλύτερες στην γεώτρηση LB214 κάτι που δικαιολογείται με βάση όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως σχετικά με την κίνηση του καρστικού νερού διαμέσου των περιμετρικών σχιστολιθικών και υπερβασικών πετρωμάτων.

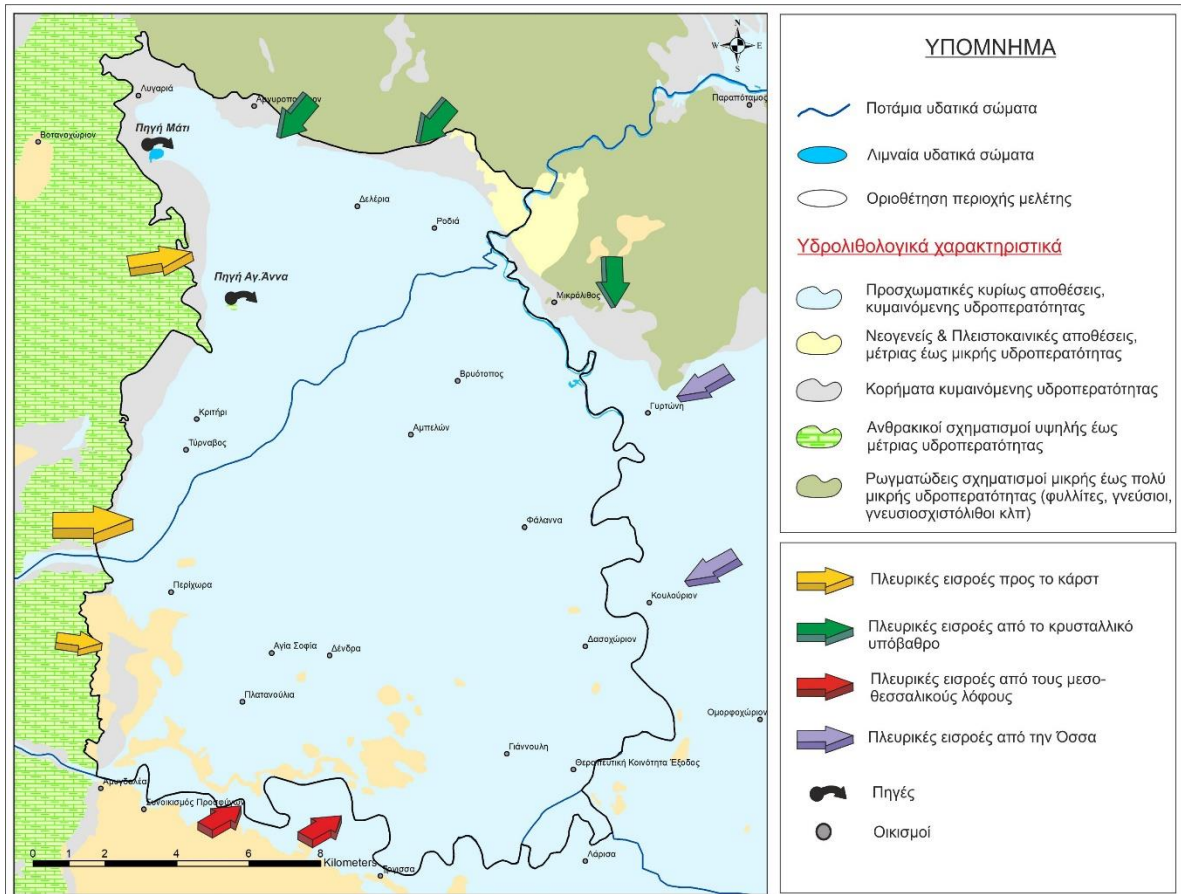
Πίνακας 11.2. Υδροχημικές αναλύσεις ανθρακικών σχηματισμών Όσσας (μέση τιμή από 9 πηγές) και γεώτρησης LB214 (μέση τιμή 2 περιόδων).

	Ανθρακικά Όσσας	LB214
pH	7.2	7.96
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	526	613
Ca (mg/L)	75.8	16.91
Mg (mg/L)	16	14.28
Na (mg/L)	6.3	97.12
K (mg/L)	0.6	1.3
HCO_3 (mg/L)	276.8	101.01
Cl (mg/L)	14.6	13.3
SO_4 (mg/L)	13.7	11.5
NO_3 (mg/L)	1.2	0.63
Fe ($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.11	30.42
Mn ($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.02	38.86
TDS	405	523

Από τα παραπάνω, προκύπτει μια νέα ερμηνεία αναφορικά με την τροφοδοσία που δέχεται η ευρύτερη περιοχή έρευνας από τα ανατολικά. Σύμφωνα με τα μέχρι τώρα

δεδομένα επικρατούσε το σενάριο της αποκλειστικής τροφοδοσίας από τα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης μέσω του καρστικού συστήματος Δαμασίου-Τυρνάβου και του ποταμού Τιταρήσιου καθώς επίσης και κάποιων πλευρικών εισροών από τα μεταμορφωμένα πετρώματα στα Β και ΒΑ της υπολεκάνης αλλά και από τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους στα ΝΔ. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της υπόγειας ροής από τον Panagoroulos (1995), είχε προκύψει κάποια πιθανή τροφοδοσία από τα ανατολικά, γεγονός που αποδόθηκε τότε στις πλευρικές εισροές από τα μεταμορφωμένα πετρώματα που εμφανίζονταν βορειότερα στην υπολεκάνη. Με βάση όμως τα τωρινά αποτελέσματα της ισοτοπικής σύστασης των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας και της χωρικής τους κατανομής, σε συνδυασμό με όσα ειπώθηκαν παραπάνω για τον ορεινό όγκο της Όσσας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι ανθρακικοί σχηματισμοί του όγκου αυτού συνεισφέρουν στο βαθμό που τους αναλογεί, στην τροφοδοσία των ανατολικότερων τουλάχιστον τμημάτων της ευρύτερης περιοχής της υπολεκάνης Τυρνάβου. Το πόσο δυναμική είναι αυτή η τροφοδοσία έναντι της τροφοδοσίας από τα δυτικά, γεγονός που έχει να κάνει και με τη χωρική της εξάπλωση προς το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης, δεν αποτελεί στόχο της παρούσας διατριβής, αλλά σίγουρα αποτελεί το έναυσμα για μελλοντικές διερευνητικές μελέτες.

Μετά και από τη νέα αυτή προσθήκη, αναφορικά με την τροφοδοσία της ανατολικής προέκτασης της υπολεκάνης Τυρνάβου, μπορούν να συνοψισθούν οι μηχανισμοί λειτουργίας του συστήματος υπό το πρίσμα της ποιοτικής και ισοτοπικής διάστασης, όπως είχε γίνει αντίστοιχα και στο Κεφάλαιο 7 (Εικόνα 7.14), για τους μηχανισμούς λειτουργίας τους συστήματος, που προέκυψαν από την ανάλυση των ποσοτικών δεδομένων. Στον χάρτη της Εικόνας 11.9 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί αυτοί, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στο 9^ο Κεφάλαιο της ποιοτικής ανάλυσης και στο παρόν Κεφάλαιο της ισοτοπικής υδρογεωλογίας.



Εικόνα 11.9. Μηχανισμοί τροφοδοσίας του υπό μελέτη συστήματος, όπως προκύπτουν από την ανάλυση των ποιοτικών και ισοτοπικών δεδομένων.

12 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΙΕΣΕΩΝ

12.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σύμφωνα με το Άρθρο 5 της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60/EC) (Ε.Κ. και Συμβούλιο 2000) κάθε κράτος μέλος πρέπει να εξασφαλίζει ότι για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού (ή για κάθε τμήμα διακρατικής λεκάνης απορροής ποταμού το οποίο βρίσκεται στο έδαφός του), πραγματοποιείται η επισκόπηση των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην κατάσταση των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του Παραρτήματος II της Οδηγίας (Ε.Κ. και Συμβούλιο 2000).

Ως ανθρωπογενείς πιέσεις στα υδατικά συστήματα, ορίζεται το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων που επηρεάζουν ή μπορούν να επηρεάσουν τα υδατικά συστήματα της περιοχής, στην οποία αναπτύσσονται. Οι πιέσεις αυτές χαρακτηρίζονται ως σημαντικές εφόσον αποτελούν αιτία για τα Υδατικά Συστήματα να κινδυνεύουν να μην επιτύχουν τους περιβαλλοντικούς στόχους, σύμφωνα με το σχετικό Κείμενο Κατευθυντήριων Γραμμών (Guidance Document No 3: Analysis of Pressure and Impacts) (IMPRESS 2003).

Στο πλαίσιο αυτό, στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στοιχεία-αποτελέσματα της ανάλυσης ανθρωπογενών πιέσεων στην υπολεκάνη Τυρνάβου, με βάση τα στοιχεία του Σχεδίου Διαχείρισης Υδάτων του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Ε.Γ.Υ. 2013) και της 1^{ης} Αναθεώρησής του (Ε.Γ.Υ. 2017).

12.2 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες ασκούν πιέσεις τόσο στα επιφανειακά όσο και στα υπόγεια υδατικά συστήματα υποβαθμίζοντας την ποιότητά του. Υπάρχουν ωστόσο περιπτώσεις όπου η ποιότητα του νερού μπορεί να μεταβληθεί από γεωγενή αίτια. Και στις δύο περιπτώσεις ωστόσο, το αποτέλεσμα είναι ότι το νερό καθίσταται ακατάλληλο είτε για πόση είτε και για άλλες χρήσεις. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι ο όρος μεταβολή, σχετίζεται κυρίως με τη σύγκριση των ποιοτικών χαρακτηριστικών ενός δείγματος νερού σε σχέση με την πρότυπη κατάσταση του νερού κατά την περίοδο αναφοράς για μια συγκεκριμένη περιοχή ή και μια συγκεκριμένη χρήση.

Κάθε μορφή ρύπανσης και μόλυνσης, η οποία προκαλείται είτε στη επιφάνεια της γης είτε στην ατμόσφαιρα καταλήγει στο έδαφος και κατόπιν σε κάποιον υδάτινο αποδέκτη (επιφανειακό ή υπόγειο). Η ρύπανση γίνεται εύκολα αντιληπτή κοντά στην πηγή όπου προκαλείται, πολλές φορές όμως παρουσιάζεται και σε μεγάλη απόσταση, λόγω φαινομένων μεταφοράς, διάχυσης και υδροδυναμικής διασποράς (Χαμπίδη 2012). Κάθε σημειακή πηγή ρύπανσης (π.χ. εργοστάσια, διυλιστήρια, ορυχεία κ.α.), βρίσκεται σε καθορισμένη θέση και ως εκ τούτου, θεωρητικά πάντα, μπορεί να εντοπιστεί και να ελεγχθεί από την εκάστοτε αρμόδια αρχή. Οι μη-σημειακές πηγές ωστόσο δεν κατέχουν

συγκεκριμένη θέση, αλλά καταλαμβάνουν συνήθως μεγάλες και απροσδιόριστες εκτάσεις (λιβάδια, αγροκαλλιέργειες, αυτοκινητόδρομοι κ.α.), με αποτέλεσμα να είναι πολύ δυσκολότερος ο έλεγχός τους.

12.2.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Ως γεωγενή αίτια μεταβολής της ποιότητας των υδάτων χαρακτηρίζονται τα διάφορα γεωλογικά φαινόμενα, που λαμβάνουν χώρα είτε στην επιφάνεια είτε στο γεωλογικό υπόβαθρο μιας περιοχής και τα οποία συμβάλλουν στη διαφοροποίηση της σύστασης των εδαφών και των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.

Η χημική σύσταση των υπόγειων νερών καθορίζεται κυρίως από την σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών με τους οποίους έρχονται σε επαφή κατά τη διαδρομή τους από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τον υδροφόρο, καθώς και κατά την κίνησή τους μέσα στον ίδιο τον υδροφόρο. Καθορίζεται επίσης από τη χρονική διάρκεια της επαφής του υπόγειου νερού με κάθε πέτρωμα, την ταχύτητα της κίνησης κλπ. Η αποσάθρωση και η διάλυση κάποιων ορυκτών ή/και πετρωμάτων με υψηλότερες συγκεντρώσεις σε ορισμένα στοιχεία, έχουν ως αποτέλεσμα των εμπλουτισμό των υδάτων στα συγκεκριμένα στοιχεία και το φαινόμενο αυτό αποτελεί μια φυσική διεργασία ποιοτικής επιβάρυνσης. Τα φυσικά αυτά φαινόμενα της αποσάθρωσης και εμπλουτισμού λαμβάνουν χώρα με πολύ αργό ρυθμό, εν αντιθέσει με αντίστοιχα φαινόμενα εμπλουτισμού λόγω ανθρωπογενών αιτιών, τα οποία και εξελίσσονται πολύ πιο γρήγορα.

Η διείδυση του θαλασσινού νερού, ως αποτέλεσμα διάφορων κλιματικών και γεωλογικών φαινομένων, παλαιότερων γεωλογικών περιόδων, ανήκει πρωτογενώς στις φυσικές διεργασίες επιβάρυνσης της ποιότητας των υδάτων (Χατζηανδρέου 2015). Στα καρστικά συστήματα όταν το επίπεδο καρστικοποίησης βρίσκεται αρκετές δεκάδες μέτρα κάτω από την σημερινή επιφάνεια της θάλασσας εξαιτίας γεωλογικών – παλαιογεωγραφικών συνθηκών και δεν υπάρχει υπόγειος φραγμός από τη θάλασσα από αδιαπέρατα στρώματα (π.χ. φλύσχης, μάργες) ή υδραυλικός φραγμός λόγω της ανάπτυξης σημαντικού υδροστατικού φορτίου, παρατηρείται σημαντική υφαλμύριση λόγω διείδυσης του θαλασσινού νερού. Ωστόσο, στις περιπτώσεις όπου στις περιοχές αυτές γίνονται αντλήσεις το φαινόμενο της υφαλμύρισης γίνεται εντονότερο. Πρόκειται για τον σημαντικότερο παράγοντα επιβάρυνσης φυσικής προέλευσης στον ελληνικό χώρο, λόγω της ύπαρξης ακτογραμμής πολλών χιλιομέτρων, κατά μήκος της οποίας έχουν αναπτυχθεί πολλοί οικισμοί, χωριά ή και πόλεις. Επομένως, το φαινόμενο της θαλάσσιας διείδυσης σε παράκτιους υδροφόρους μπορεί πρωτογενώς να έχει φυσική βάση και αιτία, αλλά σε δεύτερο βαθμό να ενισχύεται από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.

Στους γνεύσιους και γνευσιοσχιστόλιθους κατά θέσεις όταν αναπτύσσεται μεταλλοφορία συναντώνται υψηλές συγκεντρώσεις και κάποιων άλλων ιχνοστοιχείων (As, Cr, Pb, κλπ).

Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις συναντώνται αυξημένες τιμές των σχετιζόμενων με τους γεωλογικούς αυτούς σχηματισμούς συγκεντρώσεων ιόντων και φυσικών παραμέτρων (π.χ. Cl, SO₄, Mn, Fe, Αγωγιμότητα), χωρίς οι τιμές αυτές να υποδηλούν ρύπανση. Ως εκ τούτου, τα υπόγεια αυτά υδατικά συστήματα χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές φυσικού υποβάθρου που μπορεί να καθιστούν απαγορευτική-ακατάλληλη τη χρήση του νερού για συγκεκριμένες δραστηριότητες, αλλά δεν προσδίδουν στο υδατικό σύστημα χαρακτηριστικά περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα επίδρασης του φυσικού υποβάθρου στην ποιότητα του νερού αποτελούν οι θερμές πηγές. Ως θερμή πηγή αναφέρεται η πηγή, η θερμοκρασία της οποίας κυμαίνεται από μερικούς βαθμούς πάνω από την μέση ετησία θερμοκρασία αέρα της περιοχής, μέχρι τη θερμοκρασία βρασμού. Η αυξημένη θερμοκρασία των θερμοπηγών οφείλεται κατά κανόνα σε γεωθερμικά - τεκτονικά αίτια. Ως μεταλλική πηγή χαρακτηρίζεται η πηγή που περιέχει σύνολο διαλυμένων στερεών πάνω από 1000 mg/kg. Επίσης ένα νερό μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεταλλικό αν έχει περιεκτικότητα σε ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω στοιχεία ως εξής: Fe > 10 mg/kg, As > 0,7 mg/kg, J > 1 mg/kg, S > 1 mg/kg, CO₂ > 250 mg/kg και Rn > 18 nCi/l (Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας, Ε.Γ.Υ. 2013). Θερμομεταλλικές είναι οι πηγές, οι οποίες έχουν τα χαρακτηριστικά και των θερμών και των μεταλλικών πηγών. Εκτός από τα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω οι θερμομεταλλικές πηγές χαρακτηρίζονται από τις αυξημένες συγκεντρώσεις πολλών ιχνοστοιχείων, κάποια από τα οποία συχνά δίνουν ένα ιαματικό χαρακτήρα σε αυτές. Στη περίμετρο ανάπτυξης των θερμομεταλλικών πηγών παρατηρείται γενικώς αυξημένη συγκέντρωση κάποιων στοιχείων στα υπόγεια νερά λόγω ανάμιξής τους με την θερμομεταλλική υδροφορία. Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις οι αυξημένες τιμές κάποιων ιόντων στο υπόγειο νερό στην περίμετρο των θερμομεταλλικών πηγών δεν καθορίζει ρύπανση του υδροφόρου αλλά αυξημένη τιμή του φυσικού υποβάθρου για το συγκεκριμένο υπόγειο σύστημα (Λουτρά Σμοκόβου, Κόκκινο Νερό κλπ).

Η ρύπανση των υπόγειων νερών από ρύπους που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, πραγματοποιείται μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί μια σύνθετη διεργασία επιβάρυνσης, καθώς η πηγή προέλευσης του ρύπου μπορεί να είναι ανθρωπογενής (βιομηχανίες, τζάκια, καυστήρες), ωστόσο η μεταφορά του ρύπου γίνεται με φυσικές διεργασίες.

Σε περιοχές με έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα μετά την έξοδο των τοξικών αερίων και των διάφορων μεταλλικών ιχνοστοιχείων στην ατμόσφαιρα, αυτά επιστρέφουν στο έδαφος μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μεταβάλλοντας την ποιότητα στους υδροφόρους λόγω του φαινομένου της κατείδυσης (Καλλέργης 2000, Χαμπίδη 2012). Στην περίπτωση αυτή τόσο η διαδικασία όσο και η πηγή του ρύπου είναι φυσικής προέλευσης.

12.2.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ

Η ρύπανση του περιβάλλοντος και ειδικότερα των υδατικών πόρων, εξαρτάται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Από τη μορφή της ανθρωπογενούς επίδρασης και τα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης περιοχής-υδατικού συστήματος, εξαρτάται η ένταση, έκταση και μορφή της ποιοτικής υποβάθμισης των υδάτων.

Σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, τα απορρίμματα, τα αστικά και βιομηχανικά λύματα, τα καυσαέρια εργοστασίων και οχημάτων, αποτελούν τον κυρίαρχο τύπο της ανθρωπογενούς ρύπανσης. Αντίστοιχα, σε περιοχές με αγροτική δραστηριότητα, οι κυριότερες πηγές ρύπανσης προέρχονται από τα ζωικά λύματα, τα άλατα των αρδεύσεων και τη χρήση διάφορων χημικών που εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια των αγροτικών δραστηριοτήτων (φυτοφάρμακα, λιπάσματα κ.α.). Στην τελευταία κατηγορία ρύπων ανήκουν οι οργανικές και ανόργανες ενώσεις του αζώτου, του φωσφόρου και του καλίου, που υπάρχουν στα εμπορικά σκευάσματα των λιπασμάτων, καθώς και τα οργανικά μόρια που συνθέτουν τα σκευάσματα των εντομοκτόνων και των ζιζανιοκτόνων. Αν και η χρησιμοποίηση όλων των παραπάνω σκευασμάτων θεωρείται απαραίτητη στις σύγχρονες γεωργικές δραστηριότητες, η αλόγιστη χρήση τους έχει ως αποτέλεσμα οι ουσίες αυτές είτε να εκπλένονται προς τα υπόγεια ύδατα είτε να απορρέουν προς τα επιφανειακά, με αποτέλεσμα να προκαλούν, μια δύσκολα αναστρέψιμη, υποβάθμιση της ποιότητάς τους.

Τέλος, σε περιοχές με εγκαταστάσεις που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, ελλοχεύει ο κίνδυνος ρύπανσης από ραδιενεργές ουσίες. Η διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων στο έδαφος αποτελεί το πιο σημαντικό πρόβλημα για τα υπόγεια ύδατα, στην περίπτωση αυτή ωστόσο και η διαρροή ραδιενεργών ουσιών στην ατμόσφαιρα, αποτελεί καταλυτικό παράγοντα αυτού του είδους ρύπανσης. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, η ρύπανση της κατηγορίας αυτής είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία ακόμη και σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις ραδιενεργών ουσιών. Επίσης, αν και οι περιοχές αυτής της κατηγορίας καταλαμβάνουν ένα πολύ μικρό ποσοστό σε σχέση με αυτές των προηγούμενων κατηγοριών, η ακτίνα επίδρασής τους είναι τόσο μεγάλη, με αποτέλεσμα να αποτελούν την μεγαλύτερη απειλή ρύπανσης σε παγκόσμια κλίμακα.

12.3 ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Οι σημειακές πηγές ρύπανσης σχετίζονται με απορροές ρυπαντικών φορτίων, κυρίως από τα αστικά υγρά απόβλητα από οικισμούς που εξυπηρετούνται από δίκτυα αποχέτευσης ή/και κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Ε.Ε.Λ.), την εσταυλισμένη κτηνοτροφία, τη βιομηχανία, τις μεταλλευτικές δραστηριότητες. Δευτερεύουσας σημασίας πηγές ρύπανσης είναι οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) και οι εξορυκτικές δραστηριότητες όσον αφορά τις λατομικές εγκαταστάσεις (Ε.Γ.Υ. 2013). Μονάδες ιχθυοκαλλιεργειών και χώροι ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων (ΧΑΔΑ), δεν

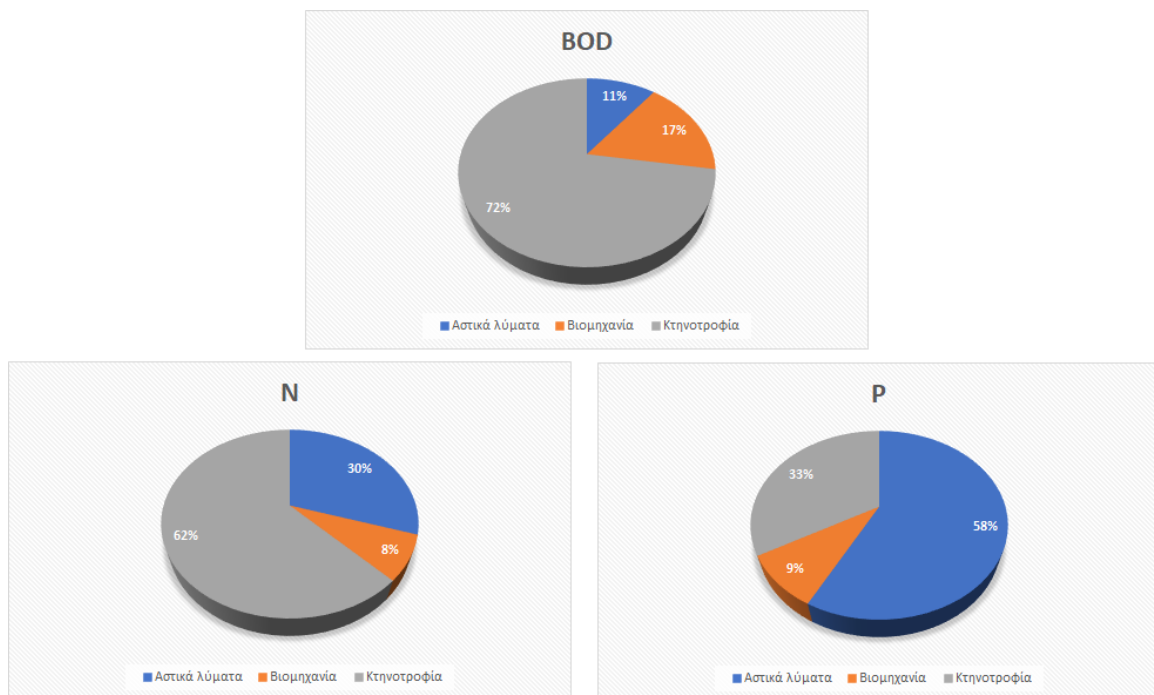
υφίστανται εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου ή και στην επέκτασή της προς τα ανατολικά. Σημειώνεται ότι τόσο οι σημειακές πηγές ρύπανσης όσο και οι διάχυτες, που θα αναφερθούν στη συνέχεια, ασκούν άμεση πίεση στους επιφανειακούς υδατικούς πόρους αλλά αποτελούν και εν δυνάμει πιέσεις ασκούμενες στους υπόγειους υδατικούς πόρους, καθώς ένα τμήμα των παραγόμενων ρυπογόνων φορτίων εισρέουν στο υπέδαφος.

Με βάση τα δεδομένα από το Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής για το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (Ε.Γ.Υ. 2013, Ε.Γ.Υ. 2017), η συνολική παραγωγή ρύπων εκφρασμένη σε βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), ολικό φορτίο αζώτου (N) και ολικό φορτίο φωσφόρου (P) για την υπολεκάνη Τυρνάβου (και την επέκτασή της προς τα ανατολικά) από σημειακές πηγές ρύπανσης, αναφέρεται στον Πίνακα 12.1. Στο Διάγραμμα 12.1 παρουσιάζεται για την υπολεκάνη Τυρνάβου, η κατανομή του ετήσια παραγόμενου ρυπαντικού φορτίου από σημειακές πηγές.

Πίνακας 12.1. Επιφανειακή ποσότητα ρύπων από σημειακές πηγές ρύπανσης στην υπολεκάνη Τυρνάβου (τόνοι/έτος).

Ρύποι από σημειακές πηγές ρύπανσης (τόνοι/έτος)			
	BOD* (οργανικό φορτίο εμμέσως)	N (ολικό άζωτο)	P (ολικός φώσφορος)
Υπολεκάνη Τυρνάβου	733	194	81.4

*Αποτελεί μέθοδο προσδιορισμού του οργανικού περιεχομένου των αποβλήτων



Διάγραμμα 12.1. Κατανομή ετήσιας επιβάρυνσης BOD, N και P από σημειακές πηγές για την υπολεκάνη Τυρνάβου.

12.3.1 ΑΣΤΙΚΑ ΛΥΜΑΤΑ

Τα αστικά λύματα ως σημειακή πηγή ρύπανσης αφορούν τις περιπτώσεις που υπάρχουν συλλογικά αποχετευτικά συστήματα ή/και κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Ε.Ε.Λ.). Σύμφωνα με τα οριζόμενα στην Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, δεν έχουν θεσμοθετηθεί ευαίσθητοι αποδέκτες και επομένως δεν υπάρχουν οικισμοί Α' προτεραιότητας (πληθυσμός >10,000) στην ευρύτερη περιοχή. Η πόλη της Λάρισας ως οικισμός Β' προτεραιότητας (πληθυσμός >15,000) εξυπηρετείται από 2 Ε.Ε.Λ., ενώ και ο Τύρναβος ως οικισμός Γ' προτεραιότητας (2,000 < πληθυσμός < 10,000 και εκροή σε οποιοδήποτε αποδέκτη) αποχετεύει σε Ε.Ε.Λ. (Εικόνα 12.1).

Το σύνολο των Ε.Ε.Λ. αποβάλλει σε κανονικό αποδέκτη και για την παραγόμενη ιλύ, η συνήθης πρακτική διαχείρισης είναι η διάθεσή της σε Χ.Υ.Τ.Α. Ωστόσο, στη Λάρισα η ιλύς διατίθεται ως λίπασμα στη γεωργία.

Η σημαντικότερη σημειακή πίεση προκαλείται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες εξυπηρετούν ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο των 10.000 κατοίκων και αφορά τις Ε.Ε.Λ. Λάρισας, ενώ δεν θεωρείται αμελητέα η σημειακή πίεση από την ύπαρξη αποχετευτικών δικτύων που δεν συνδέονται με ΕΕΛ, αν και αφορά μικρούς σχετικά πληθυσμούς. Στον Πίνακα 12.2 που ακολουθεί δίνεται η συγκεντρωτική κατάσταση ρυπαντικών φορτίων βάσει των Ε.Ε.Λ. για τη λεκάνη απορροής Πηνειού (Ε.Γ.Υ. 2013) και με αναγωγή στο ποσοστό των μονάδων που βρίσκονται εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου, δίνεται μια τάξη μεγέθους για τα ρυπαντικά φορτία σε αυτήν.

Πίνακας 12.2. Εκτιμώμενα ρυπαντικά φορτία από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων στη λεκάνη απορροής Πηνειού και στην υπολεκάνη Τυρνάβου

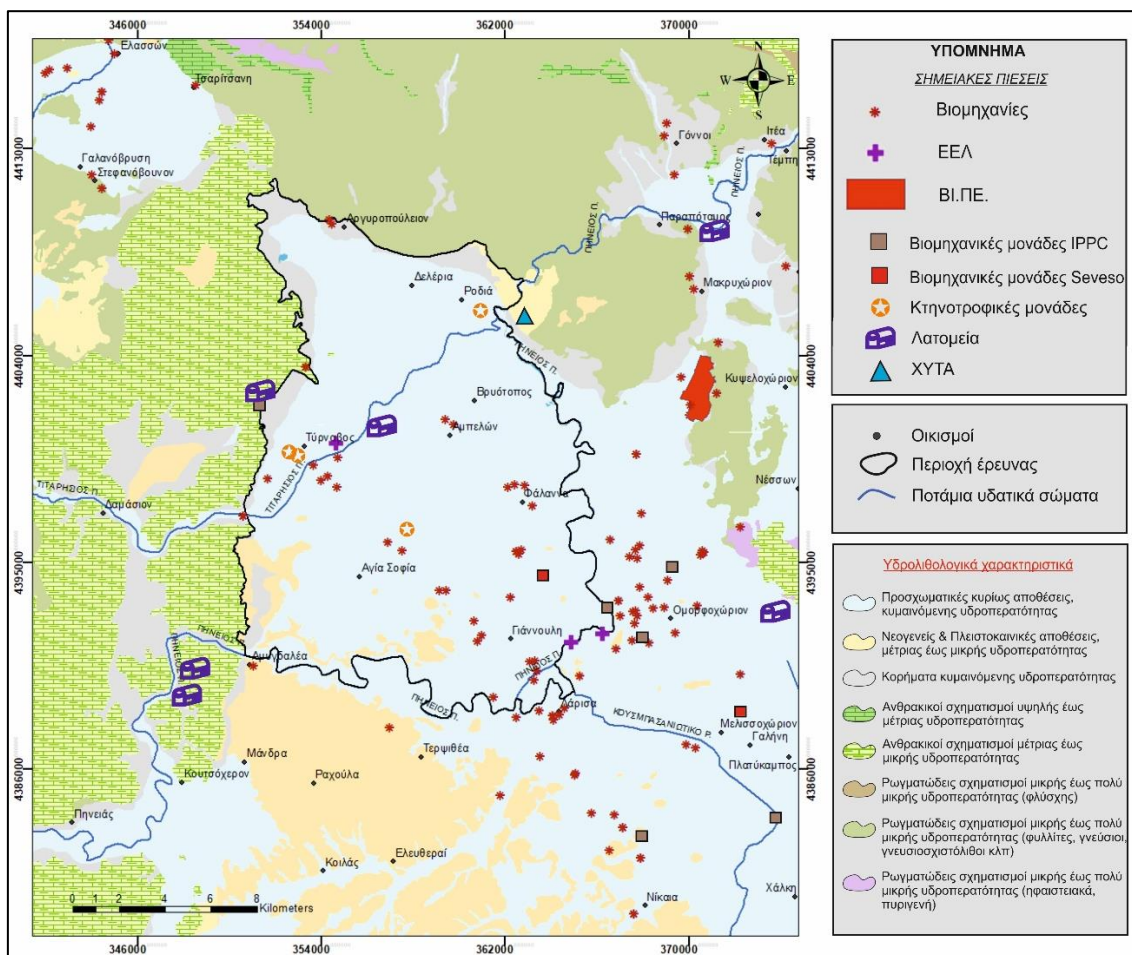
	Μονάδες	Ρυπαντικά φορτία (τόνοι/έτος)			
		BOD (οργανικό φορτίο εμμέσως)	TSS (ολικά αιωρούμενα στερεά)	TN (ολικό άζωτο)	TP (ολικός φώσφορος)
Λεκάνη απορροής Πηνειού	12	309.8	312.5	233.7	187.2
Υπολεκάνη Τυρνάβου	3	77	78	58	47

12.3.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Ένας μεγάλος αριθμός βιομηχανιών έχει εγκατασταθεί εντός της βιομηχανικής περιοχής Λάρισας (ΒΙ.ΠΕ. Λάρισας). Για τις μονάδες εκτός της ΒΙ.ΠΕ., από το σύνολο των

απογραφείων μονάδων, η βιομηχανική δραστηριότητα εξειδικεύεται σε κλάδους μεταποίησης αγροτικών προϊόντων (κυρίως βιομηχανίες ειδών διατροφής), γεγονός που συνδέεται με τον έντονο αγροτικό χαρακτήρα ολόκληρου του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας.

Εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου δεν έχει καταγραφεί βιομηχανία, η οποία υπάγεται στην Οδηγία για τον Ολοκληρωμένο Έλεγχο και Πρόληψη της Ρύπανσης (Οδηγία IPPC), υπάρχουν όμως στην επέκταση της υπολεκάνης προς τα ανατολικά καθώς και στο ΒΔ περιθώριο της υπολεκάνης. Επιπλέον, εντός της υπολεκάνης υπάρχει μία εγκατάσταση που υπάγεται στην Οδηγία για τα ατυχήματα μεγάλης έκτασης (Οδηγία Seveso), με την επόμενη κοντινότερη να βρίσκεται περίπου 10 km νοτιοανατολικά της πόλης της Λάρισας (Εικόνα 12.1). Στον Πίνακα 12.3 που ακολουθεί δίνεται η συγκεντρωτική κατάσταση ρυπαντικών φορτίων από τη βιομηχανική δραστηριότητα για την υπολεκάνη απορροής Πηνειού (Ε.Γ.Υ. 2013) και με αναγωγή στο ποσοστό των μονάδων που βρίσκονται στην υπολεκάνη Τυρνάβου και στην επέκτασή της ανατολικά του Πηνειού, δίνεται μια τάξη μεγέθους για τα ρυπαντικά φορτία σε αυτήν.



Εικόνα 12.1. Βιομηχανικές μονάδες και Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.

Πίνακας 12.3. Εκτιμώμενα ρυπαντικά φορτία βιομηχανικής προέλευσης στη λεκάνη απορροής Πηνειού και στην υπολεκάνη Τυρνάβου.

	Μονάδες	Ρυπαντικά φορτία (τόνους/έτος)											
		BOD	TSS	TN	TP	ΛΙΠΗ-ΕΛΑΙΑ	ΦΑΙΝΟΛΕΣ	ΘΕΪΚΑ	F	Cn	Fe	Zn	Ct
Λεκάνη απορροής Πηνειού	301	752	4635	90.4	44.6	23.4	10.7	0.18	0	0	0.011	0.015	0.027
Υπολεκάνη Τυρνάβου	50	125	772	15	7.4	3.9	1.8	0.03	0	0	0.0018	0.0025	0.0045

12.2.3 ΕΣΤΑΥΛΙΣΜΕΝΗ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΑ

Η εσταυλισμένη κτηνοτροφική δραστηριότητα αφορά την εκτροφή χοίρων και πουλερικών και κατά περίπτωση βοοειδών. Στο ΥΔ Θεσσαλίας το 65% είναι μονάδες εσταυλισμένης εκτροφής βοοειδών και οι υπόλοιπες μονάδες εκτροφής χοίρων. Η πλειοψηφία των κτηνοτροφικών μονάδων βρίσκεται στη λεκάνη απορροής Πηνειού (~84%). Σημειώνεται, ότι για την εκτίμηση των πιέσεων από τη κτηνοτροφία ως σημειακή πηγή ρύπανσης λαμβάνονται υπόψη οι μεγάλες σχετικά μονάδες (βάσει ΚΥΑ 15393/2332/5-8-2002). Οι υπόλοιπες μονάδες αντιμετωπίζονται ως διάχυτη εκπομπή και θα αναφερθούν στην επόμενη παράγραφο.

Στον Πίνακα 12.4 που ακολουθεί δίνεται η συγκεντρωτική κατάσταση των εκτιμώμενων ρυπαντικών φορτίων των εσταυλισμένων κτηνοτροφικών μονάδων για τη λεκάνη απορροής Πηνειού (Ε.Γ.Υ. 2013) και με αναγωγή στο ποσοστό των μονάδων που βρίσκονται εντός της υπολεκάνης Τυρνάβου (Εικόνα 12.1), δίνεται μια τάξη μεγέθους για τα ρυπαντικά φορτία σε αυτήν. Επισημαίνεται, ότι τα υπολογιζόμενα φορτία δεν σχετίζονται άμεσα με ρύπανση που φθάνει στα επιφανειακά υδατικά σώματα, αλλά είναι ενδεικτικά μόνο του απορριπτόμενου φορτίου σε κάθε λεκάνη απορροής.

Πίνακας 12.4. Εκτιμώμενα ρυπαντικά φορτία της εσταυλισμένης κτηνοτροφικής δραστηριότητας στη λεκάνη απορροής Πηνειού και στην υπολεκάνη Τυρνάβου.

	Μονάδες	Ρυπαντικά φορτία (τόνους/έτος)			
		BOD (οργανικό φορτίο)	TSS (ολικά αιωρούμενα στερεά)	TN (ολικό άζωτο)	TP (ολικός φώσφορος)
Λεκάνη απορροής Πηνειού	36	4779.7	15434.9	1093.2	239.4
Υπολεκάνη Τυρνάβου	4	531	1715	121	27

12.3.4 ΧΩΡΟΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΩΝ (Χ.Υ.Τ.Α.)

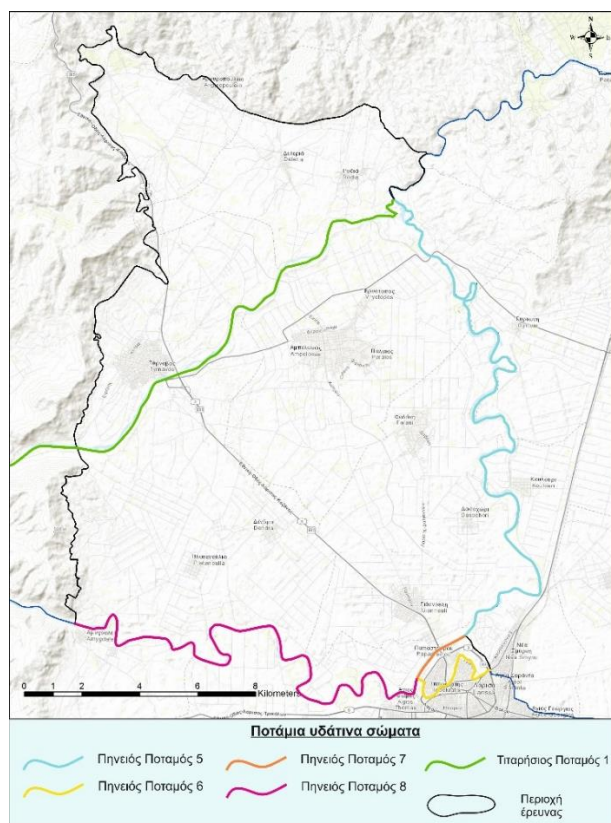
Ένας Χ.Υ.Τ.Α. εξυπηρετεί όλο το Νομό Λάρισας (Περιφερειακή Ενότητα) και βρίσκεται στην περιοχή της Ροδιάς, αμέσως μετά την έξοδο του ποταμού Πηνειού από την υπολεκάνη Τυρνάβου (Εικόνα 12.1). Τα επεξεργασμένα στραγγίσματα του Χ.Υ.Τ.Α. Λάρισας οδηγείται στις αντίστοιχες Ε.Ε.Λ. Πρακτικά, με την προϋπόθεση ορθής λειτουργίας, δεν δημιουργούνται πιέσεις στα υδατικά σώματα από τον εν λόγω Χ.Υ.Τ.Α. (Ε.Γ.Υ. 2013).

12.3.5 ΕΞΟΡΥΚΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Στην υπολεκάνη Τυρνάβου η υφιστάμενη εξορυκτική δραστηριότητα αφορά αποκλειστικά 2 λατομικές εγκαταστάσεις, οι οποίες παράγουν αδρανή απόβλητα. (Εικόνα 12.1).

12.3.6 ΕΝΤΑΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Μια εποπτική εικόνα της έντασης της πίεσης από τις σημειακές πηγές ρύπανσης, για τα επιφανειακά υδατικά σώματα της υπολεκάνης Τυρνάβου (σύμφωνα με τον καθορισμό τους από το Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας, Ε.Γ.Υ. 2013) (Εικόνα 12.2) δίνεται στο Πίνακα 12.5, ο οποίος συνοδεύεται με τα κριτήρια αξιολόγησης. Η ένταση της πίεσης διακρίνεται σε υψηλή (H), μέση (M) και χαμηλή ή μηδενική (L). Στον πίνακα σημειώνονται μόνο τα σώματα που έχουν έστω και μία δραστηριότητα με μέση ή υψηλή ένταση πίεσης.



Εικόνα 12.2. Ποτάμια υδατικά σώματα, βάσει Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών ΥΔ Θεσσαλίας (Ε.Γ.Υ. 2013), για την υπολεκάνη Τυρνάβου.

Πίνακας 12.5. Υδατικά σώματα που έχουν έστω μία δραστηριότητα με μέση ή υψηλή ένταση πίεσης από σημειακές πηγές ρύπανσης στην υπολεκάνη Τυρνάβου.

ΛΑΠ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΣ	ΟΝΟΜΑ ΥΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΣ	ΕΕΛ	Βιομηχανικές μονάδες	ΒΙΠΕ	Εσταυλισμένες κτηνοτροφικές μονάδες	Ιχθυοκαλλιέργειες	Μεταλλεία	ΧΑΔΑ
ΕΛ16	ΕΛ0816R000200015N	ΠΗΝΕΙΟΣ Π. 5	River	M	H	L	M	L	L	L
ΕΛ16	ΕΛ0816R000200017H	ΠΗΝΕΙΟΣ Π. 6	River	L	H	L	L	L	L	L
ΕΛ16	ΕΛ0816R000200020N	ΠΗΝΕΙΟΣ Π. 8	River	L	M	L	L	L	L	L
ΕΛ16	ΕΛ0816R000202006N	ΤΙΤΑΡΗΣΙΟΣ Π. 1	River	L	H	L	M	L	L	L

Κριτήριο	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή
ΕΕΛ	N>150,000	N>=10,000	N<10,000
Βιομηχανικές μονάδες	N>=5	1<=N<5	N=0
ΒΙΠΕ	N>=1	-	N=0
Εσταυλισμένες κτηνοτροφικές μονάδες	N>=5	1<=N<5	N=0
Ιχθυοκαλλιέργειες	N>=3	1<=N<3	N=0
Αριθμός μεταλλείων	N>=1	-	N=0
Αριθμός ΧΑΔΑ	N>=2	N=1	N=0

12.4 ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Οι μη σημειακές ή διάχυτες πηγές ρύπανσης των επιφανειακών υδατικών σωμάτων, σχετίζονται με απορροές ρυπαντικών φορτίων, κυρίως θρεπτικών από την αγροτική δραστηριότητα, την κτηνοτροφία και τα υγρά αστικά απόβλητα από οικισμούς που δεν εξυπηρετούνται από δίκτυα αποχέτευσης και κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Οι επιφανειακές απορροές από τις καλλιεργούμενες εκτάσεις και την κτηνοτροφία συνεισφέρουν σημαντικά στα ρυπαντικά φορτία. Ειδικότερα, το οργανικό φορτίο και το φορτίο αζώτου λόγω της κτηνοτροφικής δραστηριότητας είναι πάνω από το 90% και 60%, αντίστοιχα, ενώ μεγαλύτερη είναι η επίδραση του φορτίου φωσφόρου λόγω της γεωργικής δραστηριότητας (περίπου 70%). Η γεωργία συνεισφέρει ένα 33% στο φορτίο αζώτου ενώ ένα 4% περίπου του φορτίου αυτού οφείλεται στην αστική χρήση.

Στον Πίνακα 12.6 που ακολουθεί αναφέρεται το συνολικό φορτίο που απορρέει επιφανειακά, από διάχυτες πηγές ρύπανσης, στην υπολεκάνη Τυρνάβου (βάσει των υδατικών σωμάτων που ανήκουν σε αυτήν), στη λεκάνη απορροής Πηνειού και σε ολόκληρο το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (Ε.Γ.Υ. 2013). Από τον πίνακα αυτό προκύπτει ότι περίπου το 10% του συνολικού ετήσιου φορτίου BOD απορρέει από την υπολεκάνη Τυρνάβου, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά για το N και τον P είναι 9.15% και 7.93% αντίστοιχα.

Πίνακας 12.6. Συνολικό ετήσιο φορτίο που απορρέει επιφανειακά στην υπολεκάνη Τυρνάβου, στη λεκάνη απορροής Πηνειού και σε ολόκληρο το ΥΔ Θεσσαλίας (από διάχυτες πηγές ρύπανσης).

	Λεκάνη Απορροής Πηνειού	ΥΔ Θεσσαλίας	Υπολεκάνη Τυρνάβου	% (Τύρναβος / ΛΑΠ Πηνειού)	% (Τύρναβος / ΥΔ Θεσσαλίας)
BOD (kg/year)	11,986,055	12,740,621	1,255,549	10.48	9.85
N (kg/year)	6,348,889	6,710,487	614,156	9.67	9.15
P (kg/year)	536,861	569,074	45,107	8.40	7.93

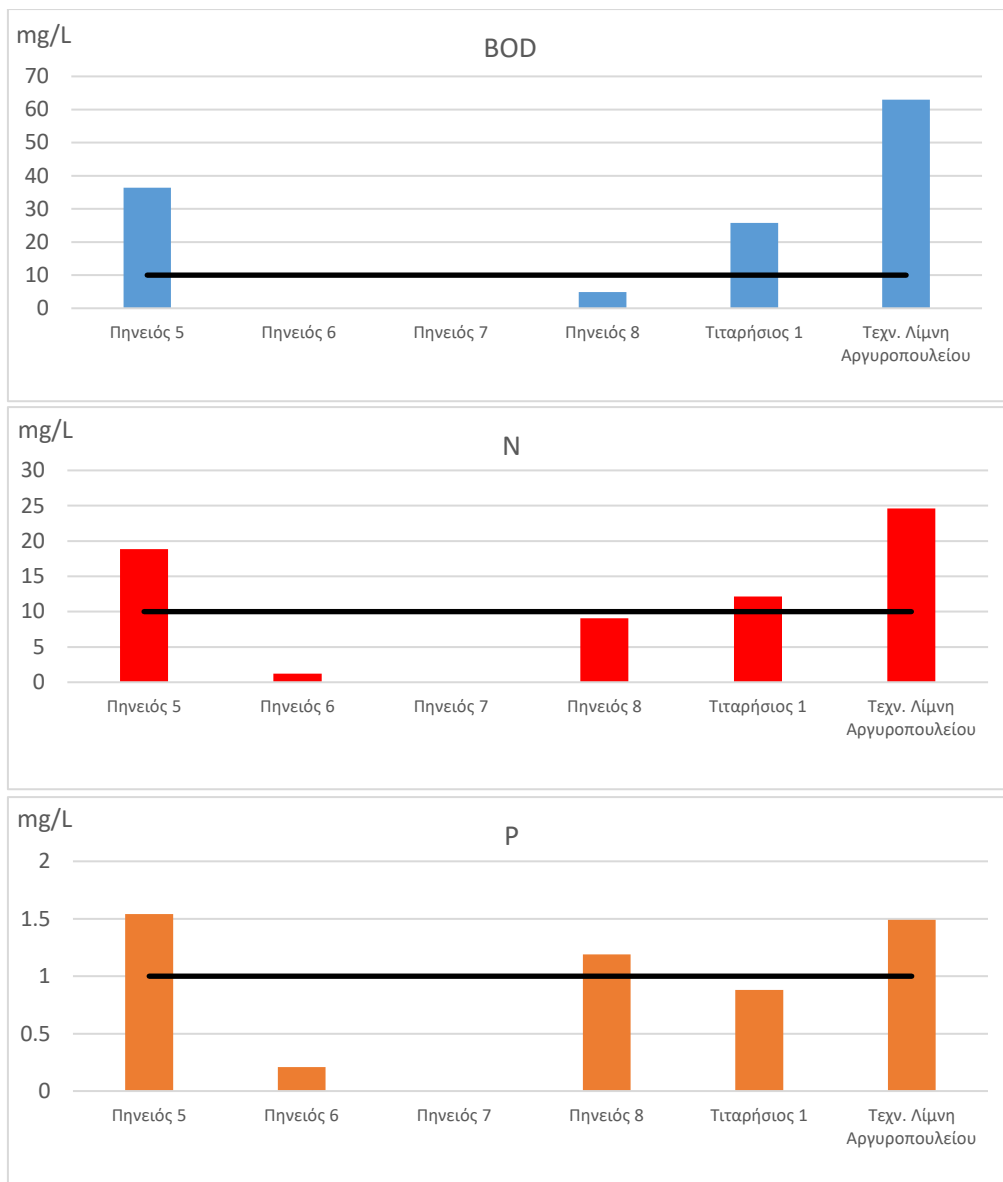
Η σημασία και η ένταση της πίεσης ως αποτέλεσμα των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με τις διάχυτες πηγές ρύπανσης σε επίπεδο υπολεκάνης, μπορεί να συσχετισθεί με την συνεισφορά των ρυπαντικών φορτίων σε όρους συγκέντρωσης (mg/l), η οποία ισοδυναμεί με τη συγκέντρωση που μεταφέρεται στα υδατικά σώματα μέσω της επιφανειακής απορροής της αντίστοιχης υπολεκάνης. Ως δείκτης σημαντικής πίεσης μπορεί καταρχήν να οριστεί το κατώφλι των 10 mg BOD/L, 10 mg N/L και 1 mg P/L, τιμές που αντιστοιχούν σε ποιότητα τριτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων, κατάλληλων για απεριόριστη επαναχρησιμοποίηση (Ε.Γ.Υ. 2013). Επιπρόσθετα τα όρια αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με τα θεσμοθετημένα όρια εκπομπής για την περίπτωση του ποταμού Ασωπού (ΦΕΚ 749B/2010, Παράρτημα Β, Πίν. 6). Επισημαίνεται ωστόσο, ότι τα όρια αυτά αποτελούν τις αποδεκτές τιμές εκροών από τις Ε.Ε.Λ. και όχι τις αποδεκτές τιμές συγκέντρωσης στους επιφανειακούς υδατικούς αποδέκτες, καθώς αυτές είναι πολύ χαμηλότερες για λόγους

περιβαλλοντικής προστασίας και με βάση την ανάγκη εξασφάλισης ποιοτικών παραμέτρων εγγύς των φυσικών τιμών υποβάθρου.

Ο υπολογισμός των μέγιστων συγκεντρώσεων BOD και θρεπτικών στοιχείων έγινε λαμβάνοντας υπόψη τη μηνιαία κατανομή της βροχόπτωσης στο υδατικό διαμέρισμα και συνεπώς και της επιφανειακής απορροής. Επίσης, έγινε η παραδοχή ισοκατανομής των φορτίων λόγω κτηνοτροφικής δραστηριότητας και αστικών αποβλήτων, και εποχιακής κατανομής του οφειλόμενου φορτίου λόγω των καλλιεργειών (40% την περίοδο Οκτώβριος-Απρίλιος και 60% την περίοδο Μάιος- Σεπτέμβριος). Ως αποτέλεσμα, στην υπολεκάνη Τυρνάβου με βάση τα υδατικά σώματα που απορρέουν σ' αυτήν, οι εκτιμώμενες συγκεντρώσεις θρεπτικών, που υπερβαίνουν τις οριακές τιμές οργανικού άνθρακα (εμμέσως), αζώτου και φωσφόρου παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 12.2)

Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι η τεχνητή λίμνη Αργυροπουλίου δέχεται μια πολύ σημαντικής έντασης πίεση, λόγω διάχυτων πηγών ρύπανσης, ξεπερνώντας κατά πολύ τα όρια κατωφλίου που αναφέρθηκαν προηγουμένως και για το BOD, N και P. Δεχόμενοι τα μεγάλα ποσοστά επίδρασης της κτηνοτροφίας στα BOD, N και της γεωργίας στα N και P, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου για ολόκληρο το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας, προκύπτει ότι η περιοχή γύρω από την τεχνητή λίμνη Αργυροπουλίου είναι από τις πιο επιβαρυνμένες, αν όχι η πιο επιβαρυνμένη, από τα ρυπαντικά φορτία λόγω διάχυτων πηγών.

Από τα υδατικά σώματα του Πηνειού, που ανήκουν στην υπολεκάνη, το τμήμα Πηνειός 5 (από Λάρισα έως τη συμβολή του Πηνειού με τον Τιταρήσιο), δέχεται τη μεγαλύτερης έντασης πίεση λόγω διάχυτων πηγών ρύπανσης, καθώς και σε αυτή τη περίπτωση οι τιμές για το BOD, N και P ξεπερνούν τα όρια κατωφλίου.



Διάγραμμα 12.2. Τιμές βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD), αζώτου (N) και φωσφόρου (P) στις επιφανειακές απορροές για κάθε κατηγορία διάχυτης πηγής ρύπανσης στην υπολεκάνη Τυρνάβου.

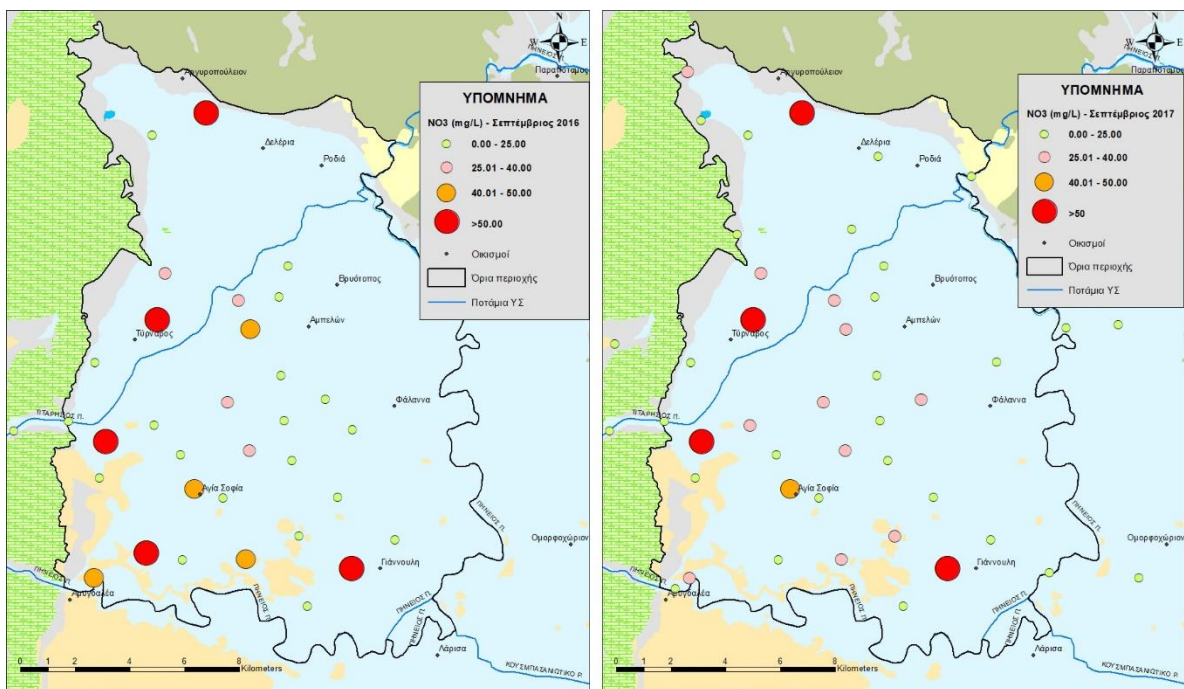
Επιδράσεις αζωτούχων ενώσεων στην περιοχή έρευνας

Η υπολεκάνη Τυρνάβου αποτελεί μια περιοχή με έντονη γεωργική όσο και κτηνοτροφική δραστηριότητα. Τα απόβλητα των μεγάλων κτηνοτροφικών μονάδων και η συχνά υπέρμετρη και μη ορθή χρήση αζωτούχων λιπασμάτων, με σκοπό τη βελτίωση της παραγωγής, έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων οργανικού και στερεού φορτίου καθώς και την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων στο υπόγειο νερό.

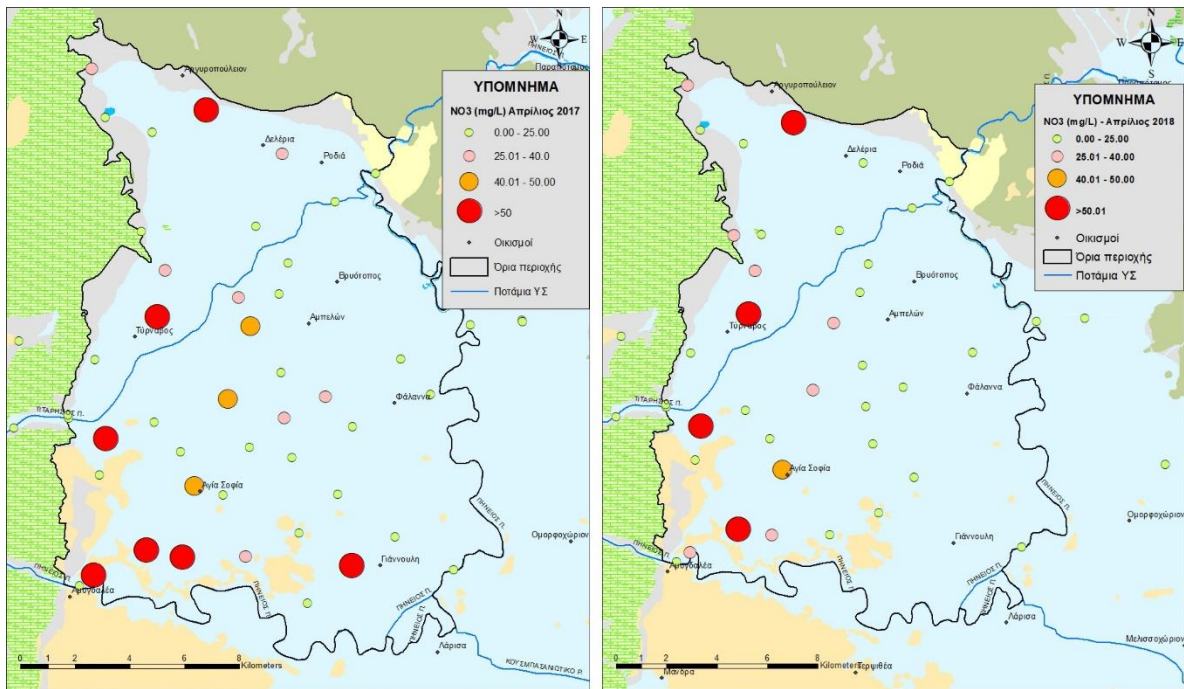
Το παραγόμενο οργανικό φορτίο, καθώς και το φορτίο στερεών, οφείλεται κατά κύριο λόγο στη σταβλισμένη κτηνοτροφία και δευτερευόντως στα αστικά λύματα και στις βιομηχανίες. Οι δύο τελευταίες πηγές ρύπανσης είναι σημειακού χαρακτήρα, ενώ περίπου

το 1/3 του φορτίου από τη σταβλισμένη κτηνοτροφία έχει διάσπαρτο χαρακτήρα (μέσω απορροών) και εντοπίζεται κατά 64% περίπου στους Νομούς Λάρισας και Τρικάλων. Ως προς το άζωτο, η κύρια διάχυτη πηγή ρύπανσης (περίπου το 64% του συνολικού φορτίου) είναι οι γεωργικές και κτηνοτροφικές (ελεύθερη κτηνοτροφία) δραστηριότητες, κυρίως στους Νομούς Λάρισας και Καρδίτσας. Αξιόλογες σημειακές πηγές αζώτου αποτελούν η σταβλισμένη κτηνοτροφία (~29%) και τα αστικά λύματα (-6%) (Παγώνης κ.α. 2007).

Από τα αποτελέσματα των υδροχημικών αναλύσεων, και των τεσσάρων περιόδων δειγματοληψίας, κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχοι χάρτες χωρικής κατανομής για τα νιτρικά ιόντα (Εικόνες 12.3 και 12.4), σε μια προσπάθεια να εντοπισθούν τα τμήματα εκείνα της υπολεκάνης, τα οποία είναι πιο ευπρόσβλητα στη νιτρορρύπανση.



Εικόνα 12.3. Χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) στην περιοχή έρευνας για τον Σεπτέμβριο του 2016 (αριστερά) και τον Σεπτέμβριο του 2017 (δεξιά).



Εικόνα 12.4. Χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) στην περιοχή έρευνας για τον Απρίλιο του 2017 (αριστερά) και τον Απρίλιο του 2018 (δεξιά).

Από το σύνολο των χημικών αναλύσεων στα υπόγεια ύδατα, το 81.6% των δειγμάτων παρουσιάζει συγκεντρώσεις νιτρικών πάνω από 10 mg/L, τιμή η οποία είναι ένα ενδεικτικό κατώφλι για τη ρύπανση από νιτρικά άλατα σε φυσικά συστήματα (Panagourios et al. 2012).

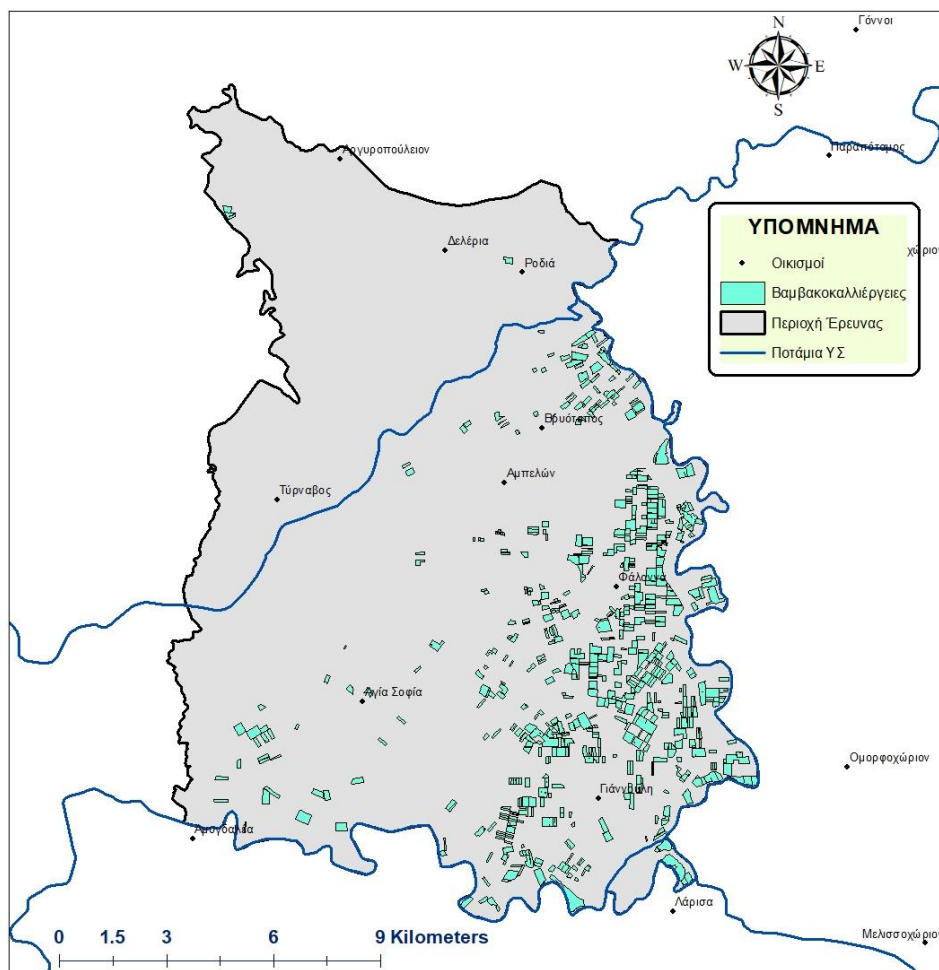
Επίσης, όπως προκύπτει από τους παραπάνω χάρτες, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων, σε συγκεκριμένες θέσεις, ξεπερνούν το όριο των 50mg/L (υψηλότερη τιμή τα 162 mg/L, τον Απρίλιο του 2017), σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας. Η τιμή αυτή αποτελεί το ανώτατο αποδεκτό όριο για το πόσιμο νερό (Οδηγία 98/83 Ε.Κ. του Συμβουλίου της Ευρώπης 1998). Οι θέσεις αυτές τοποθετούνται στο Δ-ΒΔ τμήμα της υπολεκάνης καθώς και στο Ν-ΝΑ τμήμα αυτής και αποτελούν το 12.6% των συνολικών αναλυόμενων δειγμάτων από τα υπόγεια ύδατα. Σημειώνεται ότι, κατά την περίοδο του Απριλίου του 2018 στο ΝΑ τμήμα της υπολεκάνης (περιοχή Γιάννουλης), δεν κατέστη εφικτό να πραγματοποιηθεί η λήψη δειγμάτων από τις γεωτρήσεις της περιοχής, καθώς υπήρχε σοβαρό πρόβλημα ηλεκτροδότησης. Για το λόγο αυτό κατά τη συγκεκριμένη περίοδο δεν εμφανίζονται δεδομένα συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων. Κάτι αντίστοιχο συνέβη και τον Σεπτέμβριο του 2017, για το ΝΔ τμήμα της υπολεκάνης, όχι όμως σε ευρεία κλίμακα αλλά μόνο στη συγκεκριμένη γεώτρηση που παρουσιάζει τις υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων στις υπόλοιπες περιόδους δειγματοληψίας.

Στο ΒΔ και στο δυτικό κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης οι υψηλές τιμές των νιτρικών αποδίδονται κυρίως: (α) στην επικράτηση στο τμήμα αυτό, των χονδρόκοκκων υλικών του κώνου του Τιταρήσιου αλλά και (β) των πλευρικών κορημάτων στα κράσπεδα της υπολεκάνης. Τα χονδρόκοκκα υλικά σε συνδυασμό και με τις σχετικά υψηλές στάθμες,

στην εν λόγω περιοχή, έχουν ως αποτέλεσμα την γρήγορη και βαθιά διήθηση των ρύπων και την άφιξη τους στην κορεσμένη ζώνη.

Για το νότιο τμήμα της υπολεκάνης, οι παρατηρούμενες αυξημένες συγκεντρώσεις των NO_3^- σχετίζονται προφανώς με την διαφοροποίηση των αρδευόμενων καλλιεργειών σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα της υπολεκάνης. Στην Εικόνα 12.5 απεικονίζεται η κατανομή της βαμβακοκαλλιέργειας για το 2015 (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. 2015). Όπως φαίνεται από το χάρτη, στο ανατολικό και νότιο τμήμα της υπολεκάνης η καλλιέργεια αυτή κατέχει σημαντικές εκτάσεις σε αντίθεση με το υπόλοιπο τμήμα της, όπου οι εκτάσεις αυτές είναι από ελάχιστες έως μηδενικές. Σημειώνεται ότι, γίνεται αναφορά στο βαμβάκι καθώς αποτελεί δυναμική ετήσια καλλιέργεια, η οποία συχνά δέχεται σημαντικές ποσότητες λιπασμάτων, τα υπολείμματα των οποίων, ειδικά κάτω από μη ορθές συνθήκες άρδευσης (υπερβολική εφαρμογή νερού ή/και χρήση συστημάτων καταιονισμού), μπορούν να κινηθούν ευκολότερα προς την κορεσμένη ζώνη. Στο συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής έρευνας, για τις βαμβακοκαλλιέργειες χρησιμοποιούνται συστήματα καταιονισμού (κανόνια) και σε μικρότερο ποσοστό εφαρμόζεται στάγδην άρδευση, ενώ για τις υπόλοιπες καλλιέργειες η στάγδην άρδευση επικρατεί εξολοκλήρου (στοιχεία από Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας για το ΝΔ τμήμα και Τ.Ο.Ε.Β. Μάτι Τυρνάβου για το ΝΑ). Η χαμηλή απόδοση των συστημάτων καταιονισμού ωστόσο, ευνοεί με τη σειρά της την κατείσδυση των ρύπων προς τον υδροφόρο.

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν και στην παράγραφο της υδρογεωχημικής ανάλυσης, το νότιο αυτό τμήμα της υπολεκάνης, αποτελεί μια περιοχή χαμηλής έως μέσης τροφοδοσίας. Έτσι, θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι, η οποιαδήποτε επιβάρυνση από ρύπους παραμένει στην κορεσμένη ζώνη, καθώς ο ρυθμός ανανέωσης με νερό τροφοδοσίας απαλλαγμένο από ρύπους είναι αρκετά μικρότερος σε σχέση με τα βορειότερα και δυτικότερα τμήματα της υπολεκάνης. Με βάση τα παραπάνω θα μπορούσε να αιτιολογηθεί η παρουσία των υψηλών συγκεντρώσεων των NO_3^- στη συγκεκριμένη περιοχή, που χαρακτηρίζεται παράλληλα, από υδροληπτικά έργα μικρού σχετικά βάθους, τα οποία υδρομαστεύουν το ρηχό τμήμα της υδροφορίας.



Εικόνα 12.5. Κατανομή των βαμβακοκαλλιεργειών στην περιοχή έρευνας με βάση τα στοιχεία του Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε. (2015).

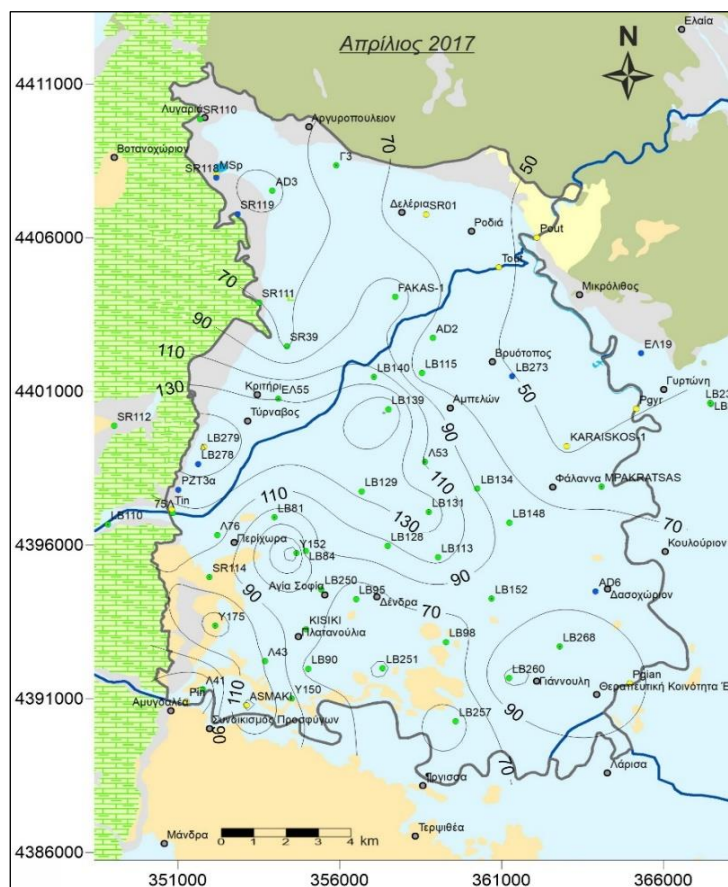
Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 8 σχετικά με τις μετρήσεις του δυναμικού οξειδοαναγωγής (Eh) (Παράγραφος 8.4.5.), στην περιοχή έρευνας επικρατούν, κατά κύριο λόγο σε όλες τις περιόδους δειγματοληψίας, οξειδωτικές συνθήκες. Εξαιρεση αποτελεί το ΒΑ τμήμα της υπολεκάνης, που εκτείνεται βόρεια του Τιταρήσιου, για την περίοδο δειγματοληψίας του Σεπτεμβρίου του 2017.

Σε περιοχές όπου επικρατούν πιο έντονα οξειδωτικές συνθήκες (υψηλό Eh) αναμένονται, χωρίς αυτό να είναι θέσφατο, πιο υψηλές συγκεντρώσεις σε νιτρικά σε σχέση με περιοχές όπου επικρατούν αναγωγικές συνθήκες (χαμηλό Eh), λόγω της αναγωγής των νιτρικών με τελικό προϊόν την αμμωνία (NH₃), παρουσία βακτηρίων.

Στην Εικόνα 12.6 απεικονίζεται ενδεικτικά η χωρική κατανομή του δυναμικού οξειδοαναγωγής (σε mV), για την περίοδο του Απριλίου του 2017. Σε γενικές γραμμές το περιβάλλον είναι εντονότερα οξειδωτικό στο δυτικό τμήμα της υπολεκάνης, χωρίς ωστόσο να σημειώνονται εντυπωσιακά θετικές τιμές, όπου εντοπίζονται και τα μεγαλύτερα προβλήματα από άποψη νιτρορρύπανσης (Εικόνες 12.3 & 12.4). Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και για το N-NA τμήμα της υπολεκάνης, όπου στις θέσεις των υψηλότερων

συγκεντρώσεων των NO_3^- παρατηρούνται επίσης οι υψηλότερες τιμές δυναμικού οξειδοαναγωγής. Με εξαίρεση λοιπόν το ΒΑ τμήμα της υπολεκάνης για την περίοδο δειγματοληψίας του Σεπτεμβρίου του 2017, στην περιοχή έρευνας ισχύει η σχέση του δυναμικού οξειδοαναγωγής με τα νιτρικά ιόντα, όπου οι υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών σε τμήματα της περιοχής συνάδουν με αντίστοιχα σχετικά υψηλές τιμές του δυναμικού οξειδοαναγωγής και αντιστρόφως.

Συμπερασματικά, η εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων NO_3^- σε συγκεκριμένες περιοχές του υπό μελέτη υδατικού συστήματος εκτιμάται ότι είναι αποτέλεσμα ενός ή περισσότερων από τους παρακάτω παράγοντες: α) έντονη αγροτική εκμετάλλευση δυναμικών καλλιεργειών, β) ανάπτυξη συνθηκών ελεύθερης υδροφορίας, γ) μικρό βάθος υπόγειας στάθμης, δ) περιορισμένος ρυθμός τροφοδοσίας και ε) οι οξειδωτικές συνθήκες.



Εικόνα 12.6. Χωρική κατανομή του Eh (mV) Απριλίου 2017.

12.5 ΥΔΡΟΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ

Στην υπολεκάνη Τυρνάβου ανήκουν (2) υδατικά σώματα, σε σύνολο ογδόντα δύο (82) για ολόκληρη τη Θεσσαλία, τα οποία εκτιμήθηκε ότι προκαλούν υδρομορφολογικές αλλοιώσεις.

1) Η τεχνητή λίμνη Αργυροπούλιου, η οποία δημιουργήθηκε με σκοπό την άρδευση των παραλίμνιων περιοχών και για λόγους αναψυχής. Έχει έκταση περίπου 0.5 km² και χαρακτηρίζεται ως Ιδιαιτέρως Τροποποιημένο Υδάτινο Σώμα (Ι.Τ.Υ.Σ.).

2) Η διευθέτηση και διαμόρφωση τμήματος του ποταμού Πηνειού, πλησίον της πόλης της Λάρισας, όπου το συγκεκριμένο έργο έχει σκοπό την αντιπλημμυρική προστασία της Λάρισας. Έχει μήκος 8.85 km και χαρακτηρίζεται ως Τεχνητό Υδάτινο Σώμα - Ιδιαιτέρως Τροποποιημένο Υδάτινο Σώμα (Τ.Υ.Σ.-Ι.Τ.Υ.Σ.).

12.6 ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΥΔΑΤΟΣ

12.6.1 ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΑΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στον Πίνακα 12.7 που ακολουθεί δίδονται ανά επιφανειακό υδατικό σύστημα της υπολεκάνης Τυρνάβου, τα αναλυτικά στοιχεία απολήψεων. Για λόγους πληρότητας, απεικονίζονται τόσο ο ετήσιος όσο και ο θερινός (δηλαδή για το διάστημα Ιουλίου–Σεπτεμβρίου) όγκος απόληψης ως ποσοστό (%) του μέσου ετήσιου και θερινού αντίστοιχα φυσικού όγκου απορροής. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός της έντασης πίεσης απόληψης, με βάση την 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής του ΥΔ Θεσσαλίας.

Σημειώνεται, ότι για τον χαρακτηρισμό της έντασης πίεσης απόληψης δε λαμβάνεται υπόψη ο θερινός όγκος απορροής, αλλά είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη στη συνολικότερη αξιολόγηση και ανάλυση της κατάστασης των επιφανειακών υδατικών συστημάτων, καθώς σε πολλά επιφανειακά υδατικά συστήματα υφίστανται σημαντικές απολήψεις, άνω του 50% της φυσικοποιημένης απορροής τους, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Επίσης ειδικά για τη Θεσσαλία, μέρος των δυναμικών (ανανεώσιμων) αποθεμάτων (ορισμένων υπόγειων υδατικών συστημάτων) συμβάλλει μέσω εκφορτίσεων στις παροχές επιφανειακών υδατικών συστημάτων. Ως εκ τούτου, οι αντλήσεις από τους υδροφόρους θεωρούνται απόληψη και για τα επιφανειακά αυτά συστήματα, για την εκτίμηση της έντασης πίεσης απόληψης. Επομένως, η «Ετήσια Απολήψιμη Ποσότητα» που αναφέρεται στον Πίνακα 12.7 είναι το άθροισμα των απευθείας απολήψεων από τα Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα και των αντλήσεων που προέρχονται από τα ανανεώσιμα αποθέματα των Υπόγειων Υδατικών Συστημάτων, που συμβάλλουν στο εν λόγω επιφανειακό σύστημα.

Πίνακας 12.7. Ετήσιες απολήψεις ύδατος από τα επιφανειακά Υδατικά Συστήματα της υπολεκάνης Τυρνάβου.

Κωδικός Συστήματος	Ονομασία Συστήματος	Είδος ΥΣ	Ετήσια Απολήπιμη Ποσότητα (εκ. m ³ /έτος)	Σκοπός Απόληψης	Ετήσιος Όγκος Απόληψης (% Μέσης Ετήσιας Φυσικής Απορροής)	Θερινός Όγκος Απόληψης (% Μέσης Θερινής Φυσικής Απορροής)	Ένταση Πίεσης Απόληψης
EL0816R000200015N	ΠΗΝΕΙΟΣ Π. 5	River	633.53	Άρδευση	24.63	85.11	ΧΑΜΗΛΗ
EL0816R000200017H	ΠΗΝΕΙΟΣ Π. 6	River	516.6	Άρδευση	20.29	69.93	ΧΑΜΗΛΗ
EL0816R000200020N	ΠΗΝΕΙΟΣ Π. 8	River	468.18	Άρδευση	19.18	66.28	ΧΑΜΗΛΗ
EL0816R000202006N	ΤΙΤΑΡΗΣΙΟΣ Π. 1	River	44.81	Άρδευση	9.63	30.96	ΧΑΜΗΛΗ
EL0816L000000001H	ΤΕΧΝ. ΛΙΜΝΗ ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΙΟΥ	Lake	1.74	Άρδευση	38.79	-	ΜΕΣΑΙΑ

Με βάση τον παραπάνω πίνακα το επιφανειακό υδατικό σύστημα που υφίσταται μεσαία απόληψη (>30% της μέσης ετήσιας απορροής), είναι η Τεχνητή λίμνη Αργυροπουλίου. Κανένα ποτάμιο υδατικό σύστημα στην υπολεκάνη Τυρνάβου δεν εμφανίζει υψηλή απόληψη (>50% της μέσης ετήσιας απορροής). Ωστόσο, όλα τα τμήματα του Πηνειού, από την είσοδό του στην υπολεκάνη έως και την έξοδό του από αυτή, εμφανίζουν θερινή απόληψη πολύ μεγαλύτερη του 50% της αντίστοιχης φυσικής, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν σημαντικά μειωμένη ροή κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

12.6.2 ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στην υπολεκάνη Τυρνάβου συναντώνται δύο (2) υπόγεια υδατικά συστήματα (Υ.Υ.Σ.), σε σύνολο είκοσι επτά (27) για ολόκληρη την υδρολογική λεκάνη του Πηνειού. Αυτά είναι: το Υ.Υ.Σ. Δαμασίου-Τιτάνου και το Υ.Υ.Σ. Κώνου Τιταρήσιου.

Παλαιότερα πριν το 2000, οι κύριες απολήψεις για την ύδρευση της Λάρισας ήταν από το Σύστημα Κώνου – Τιταρήσιου. Σήμερα οι απολήψεις από το εν λόγω σύστημα έχουν μειωθεί και οι γεωτρήσεις είναι παλαιωμένες. Πλέον οι κύριες απολήψεις για την ύδρευση της Λάρισας τοποθετούνται στο καρστικό Σύστημα Δαμασίου – Τιτάνου (EL EL0800070).

Στον Πίνακα 12.8 που ακολουθεί δίνονται τα αναλυτικά στοιχεία των αντλήσεων για τα Υ.Υ.Σ. που αφορούν την περιοχή έρευνας σύμφωνα με τα στοιχεία από την 1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λ.Α.Π. του Υ.Δ. Θεσσαλίας (Ε.Γ.Υ. 2017).

Πίνακας 12.8. Ετήσια τροφοδοσία και απολήψεις από τα υπόγεια υδατικά συστήματα που αφορούν άμεσα την υπολεκάνη Τυρνάβου.

Κωδικός	Ονομασία	Μέση Ετήσια Τροφοδοσία (10 ⁶ m ³)	Μέσες Ετήσιες Απολήψεις (10 ⁶ m ³)	Άρδευση (10 ⁶ m ³)	Υδρευση (10 ⁶ m ³)
EL0800070	Δαμασίου-Τιτάνου	120	56.97	41.11	15.85
EL0800220	Κώνος Τιταρήσιου	90	58.48	54.74	3.73

12.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

12.7.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΑ

Κατά την εκτίμηση των επιπτώσεων και το χαρακτηρισμό των ΥΣ με βάση την πιθανότητα επίτευξης των περιβαλλοντικών στόχων της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ συναξιολογούνται για κάθε υδατικό σώμα τα ακόλουθα:

- Η ένταση της πίεσης από πηγές ρύπανσης και απολήψεις: υψηλή (H), μεσαία (M), χαμηλή (L).
- Τα διαθέσιμα δεδομένα και τα αποτελέσματα του προγράμματος παρακολούθησης.
- Κρίση του μελετητή, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.

Από το σύνολο των κριτηρίων κατατάχθηκαν τα Υ.Σ. σε σχέση με το εάν είναι πιθανό να πετύχουν ή όχι τους περιβαλλοντικούς στόχους της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Για τα Υ.Σ. της υπολεκάνης Τυρνάβου τα συνοπτικά αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

α) τα ποτάμια Υ.Σ. του Πηνειού και του Τιταρήσιου, εντός της υπολεκάνης, ανήκουν στην κατηγορία πιθανού κινδύνου (Probably At Risk – PAR), όσον αφορά τη μη επίτευξη των στόχων της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ.

β) αναφορικά με τα λιμναία Υ.Σ., η τεχνητή λίμνη Αργυροπουλίου, κατατάσσεται στην κατηγορία σε κίνδυνο (At Risk-AR) μη επίτευξης των στόχων της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ.

12.7.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

Το σύνολο των πηγών ρύπανσης (διάχυτων και σημειακών) με κυριότερες τη γεωργία, κτηνοτροφία και τα αστικά απόβλητα, αποτελούν εν δυνάμει πιέσεις ασκούμενες στους υπόγειους υδατικούς πόρους. Βάσει αναλύσεων, ένα τμήμα των παραγόμενων ρυπογόνων φορτίων εισρέουν στο υπέδαφος. Ένα σύνολο από γεωτρήσεις, πηγάδια και πηγαίες εκφορτίσεις παρακολουθείται για τη μεταβολή της χημικής κατάστασης των υπόγειων νερών. Κύριες παράμετροι που απαντούν στις υφιστάμενες βάσεις δεδομένων αποτελούν

οι συγκεντρώσεις νιτρικών, νιτρωδών, θειικών, χλωριόντων, αμμωνίας και ορισμένων άλλων ιχνοστοιχείων.

Το επίπεδο της χημικής κατάστασης που προκύπτει από την ανάλυση των υδροχημικών αναλύσεων δεν παρουσιάζει εκτεταμένα προβλήματα υποβάθμισης στα υπόγεια Υδατικά Συστήματα της υπολεκάνης Τυρνάβου. Το ίδιο συμβαίνει και για ολόκληρο το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας, με εξαίρεση κάποια συγκεκριμένα Υ.Υ.Σ. Ακόμα και στις περιπτώσεις αυτές ωστόσο η καταγραφόμενη επιβάρυνση δεν συνάδει με την υπολογιζόμενη εισροή ρύπων από διάχυτες και σημειακές πηγές ρύπανσης.

Το γεγονός αυτό, σχετίζεται αφενός με τις ιδιαιτερότητες της γεωλογικής και υδρογεωλογικής δομής, και αφετέρου με τους κρατούντες μηχανισμούς κίνησης και διασποράς ρύπων. Έτσι, η μειωμένη χημική επιβάρυνση στα Υ.Υ.Σ. αποδίδεται σε μια σειρά αιτιών, κυριότερα από τα οποία είναι τα ακόλουθα (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λ.Α.Π. του Υ.Δ. Θεσσαλίας 2017):

1. Όπως συμβαίνει και στην περιοχή έρευνας, η ύπαρξη μιας φρεάτιας υδροφορίας που διαχωρίζεται από την βαθύτερη υπό πίεση υδροφορία, από μια ζώνη επάλληλων στρώσεων κατά κύριο λόγο αργιλικού ή ιλυώδους σύστασης υλικού, λειτουργεί ως ζώνη περιορισμού της κίνησης των ρύπων προς τα βαθύτερα υδροφόρα στρώματα.

2. Η επικράτηση στην συχνά σημαντικού πάχους ακόρεστη ζώνη υλικών αργιλικής σύστασης που λειτουργούν ως ανασταλτικοί παράγοντες για την βαθιά διήθηση των ρύπων.

3. Η ύπαρξη οργανικού άνθρακα στα ανώτερα εδαφικά στρώματα που λειτουργεί επίσης ως παράγοντας αναστολής της κατακόρυφης κίνησης των ρύπων μέσω της δέσμευσής τους.

4. Η ανάπτυξη σημαντικού πάχους ακόρεστης ζώνης αερισμού που δρα ευεργετικά στο μεταβολισμό μορίων οργανικών ουσιών και δραστικών ουσιών φυτοφαρμάκων, αφού αυξάνει το χρόνο παραμονής τους και επιτρέπει την αποικοδόμησή τους πριν την άφιξή τους στην κορεσμένη ζώνη όπου πολλά από τα μόρια αυτά εμφανίζουν ιδιαίτερη σταθερότητα και εμμονή.

5. Η λειτουργία του πυκνού αποστραγγιστικού δικτύου στις καλλιεργούμενες λεκάνες η οποία αποστραγγίζει τα αρδευόμενα εδάφη. Μέσω της αποστράγγισης παραλαμβάνεται σημαντικό τμήμα του ρυπαντικού φορτίου το οποίο άλλως θα ακολουθούσε την πορεία της βαθιάς διείσδυσης και ρύπανσης των υπόγειων νερών.

6. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους που ελέγχουν μια σειρά πολύπλοκων διεργασιών δια των οποίων επιτυγχάνεται η δέσμευση ρύπων στην εδαφική ζώνη, η αποικοδόμηση ρυπογόνων ουσιών ή η έκλυσή τους στην ατμόσφαιρα.

Στον Πίνακα 12.9 παρουσιάζονται συνοπτικά τα ποιοτικά προβλήματα που εντοπίστηκαν στην υπολεκάνη Τυρνάβου και ο ποιοτικός τους χαρακτηρισμός βάσει της 1^η Αναθεώρησης του Σχεδίου Διαχείρισης Λ.Α.Π. του Υ.Δ. Θεσσαλίας.

Πίνακας 12.9. Πίνακας ποιοτικής κατάστασης ΥΥΣ της υπολεκάνης Τυρνάβου.

Κωδικός	Ονομασία	Είδος Υδροφορέα	Χημική κατάσταση ΥΥΣ	Ποιοτικά προβλήματα
EL0800070	Δαμασίου-Τιτάνου	Καρστικός	Καλή	Τοπικές επιβαρύνσεις NO ₃ λόγω αγροτικών δραστηριοτήτων. Τοπικές υπερβάσεις ιχνοστοιχείων Fe, Mn
EL0800220	Κώνος Τιταρήσιου	Κοκκώδης	Καλή	Τοπικές επιβαρύνσεις NO ₃ λόγω αγροτικών δραστηριοτήτων. Τοπικές υπερβάσεις ιχνοστοιχείων Fe, Mn

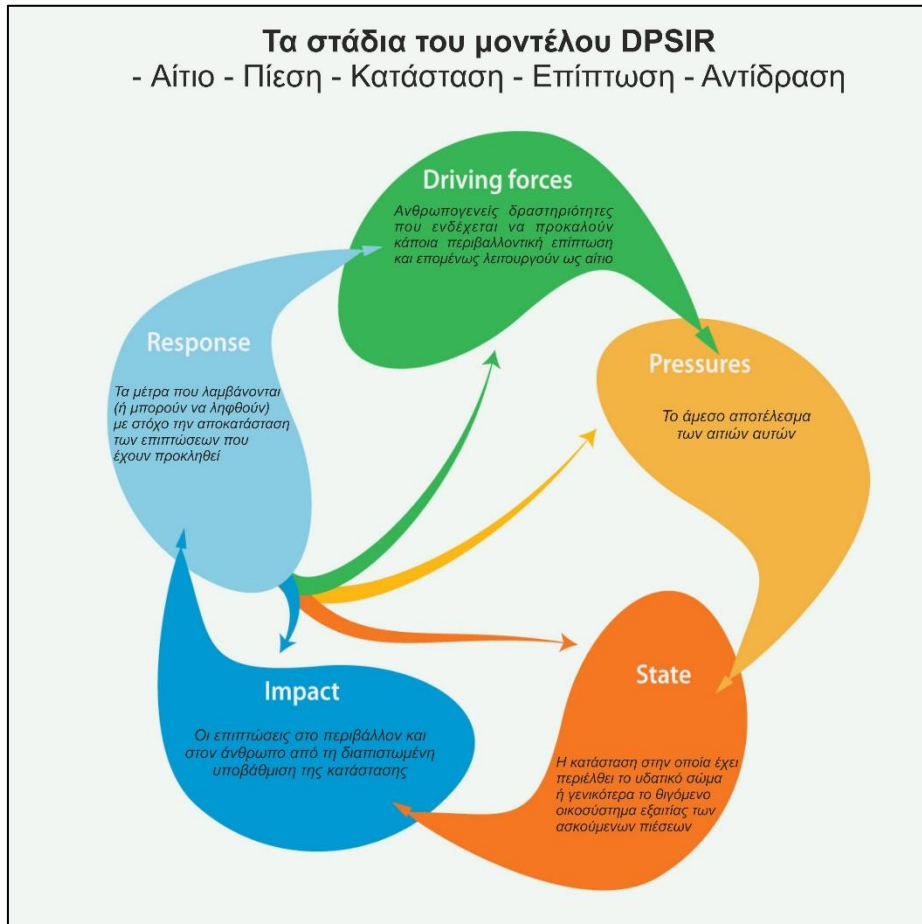
Σημειώνεται ότι στις προηγούμενες παραγράφους πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των ανθρωπογενών πιέσεων στην περιοχή έρευνας, με άντληση και επεξεργασία των δεδομένων από τη Διαχειριστική Μελέτη καθώς και την 1^η αναθεώρησή της για το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Η επεξεργασία αυτή βασίστηκε στο διαχωρισμό των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών συστημάτων, που ανήκουν στην υπολεκάνη Τυρνάβου, από τα υπόλοιπα υδατικά συστήματα της λεκάνης απορροής του Πηνειού. Στην επόμενη παράγραφο ωστόσο γίνεται αναλυτική περιγραφή των πιέσεων, των αποτελεσμάτων τους καθώς και των τρόπων αντιμετώπισής τους, με πιο συγκεκριμένη διαδικασία για την περιοχή έρευνας, χρησιμοποιώντας το μοντέλου DPSIR.

12.8 ΜΟΝΤΕΛΟ DPSIR

12.8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το μοντέλο DPSIR (**D**iving forces-**P**ressures-**S**tate-**I**mpact-**R**esponse) αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και προτάθηκε από τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD 2003), ως μεθοδολογία για τη δομή και την οργάνωση διαφόρων τύπων δεικτών, με τρόπο κατανοητό για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Βασίστηκε σε προηγούμενες μεθοδολογίες σε ένα περιβαλλοντικό πλαίσιο και υιοθετήθηκε ως εννοιολογικό πλαίσιο από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (Ε.Ε.Α.) το 1995 (Gabrielson & Bosch 2003). Το DPSIR αναπτύχθηκε έτσι ώστε να εκφράζει μια σχέση αιτίου-αποτελέσματος μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών συστημάτων. Το μοντέλο DPSIR μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναλυτικό εργαλείο για τη μελέτη θεμάτων που αφορούν το νερό. Επιτρέπει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των ζητημάτων μέσω της εξέτασης των σχετικών κινητήριων δυνάμεων (αιτίες) και πιέσεων (ρύπων) στο περιβάλλον, της επακόλουθης κατάστασης (ποιότητα) του περιβάλλοντος, όπως αντιπροσωπεύεται από τις επιπτώσεις του (υγεία, οικοσυστήματα), τις αντιδράσεις (πολιτικές, στόχους) και τις διεπαφές μεταξύ των στοιχείων του (Kristensen 2004) (Εικόνα 12.7). Πρόκειται δηλαδή για ένα περιβαλλοντικό μοντέλο, το οποίο προσπαθεί με τη χρήση περιβαλλοντικών δεικτών,

να περιγράψει την υφιστάμενη κατάσταση σε μια περιοχή, καθώς και να προσδιορίσει τα αίτια και την ένταση των πιέσεων που ασκούνται (Sors 2001). Περιπτώσεις υλοποίησης του μοντέλου DPSIR σχετικά με θέματα νερού υπάρχουν τόσο στη διεθνή όσο και στην ελληνική βιβλιογραφία (Karageorgis et al. 2005, Παγώνης κ.α. 2008, Omann et al. 2009, Chung et al. 2011, Mattas et al. 2014, Lyra et al. 2016).



Εικόνα 12.7. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας DPSIR, τροποποιημένο από (www.grida.no/resources/8124).

Η ανάλυση του πλαισίου DPSIR περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των κοινωνικοοικονομικών δυνάμεων (αστικοποίηση, εντατικοποίηση της γεωργίας, τουριστικές απαιτήσεις, βιομηχανική ανάπτυξη, αλιεία και ιχθυοκαλλιέργεια κλπ.) που δημιουργούν τις πιέσεις στο σύστημα. Οι πιέσεις αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν τη σταδιακή μετατροπή της χρήσης γης, την εξόρυξη πρώτων υλών, την παρατεταμένη άντληση των υδατικών πόρων, την απορροή αστικών λυμάτων και απορριμμάτων στη θάλασσα, τη δημιουργία φραγμάτων και λιμενικών έργων, και μαζί με τις μεταβολές στο παγκόσμιο κλίμα και τις διεργασίες που κυριαρχούν σε κάθε παράκτιο σύστημα προκαλούν αλλαγές στην περιβαλλοντική κατάσταση του συστήματος. Οι αλλαγές αυτές, για παράδειγμα ευτροφισμός ή τοξική ρύπανση, γίνονται αργά ή γρήγορα αντιληπτές λόγω των επιπτώσεων τόσο στο οικοσύστημα όσο και στην ανθρώπινη υγεία. Οι επιπτώσεις

οδηγούν στην επιλογή της κατάλληλης περιβαλλοντικής πολιτικής που θα στηριχτεί στις διαθέσιμες διαχειριστικές επιλογές (Alcamo et al. 2001, Τσίτσης 2020).

12.8.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ DPSIR ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται η κωδικοποίηση των ασκούμενων πιέσεων στην περιοχή έρευνας, ακολουθώντας τα πρότυπα του μοντέλου DPSIR. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ουσιαστικά τα στοιχεία και τα χαρακτηριστικά της περιοχής, όπως αυτά αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Για τη μελέτη της εξέλιξης της υπόγειας υδροφορίας και την εξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται συστηματική χρήση των μοναδικών αξιόπιστων υφιστάμενων δεδομένων σε μορφή χρονοσειράς και αποδεκτής χωρικής διασποράς: διακύμανση υπόγειας στάθμης και διακύμανση συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων. Τα δεδομένα αυτά, αν και δεν καλύπτουν την πλήρη έκταση μιας μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, είναι χαρακτηριστικά και αντιπροσωπευτικά για την περιοχή έρευνας, στην οποία η γεωργική παραγωγή με τη χρήση υπόγειων υδατικών πόρων, αποτελεί την κυρίαρχη δραστηριότητα. Για το λόγο αυτό εκτιμάται ότι από τη θεώρησή τους μπορούν να εξαχθούν, για τη συγκεκριμένη περιοχή, αξιόπιστα συμπεράσματα. Στον Πίνακα 12.10 αναφέρονται οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, που λειτουργούν ως κινητήρια δύναμη (αίτιο) προκαλώντας περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην περιοχή έρευνας και ως εκ τούτου είναι αυτές που αναλύονται παρακάτω στο μοντέλο DPSIR.

Πίνακας 12.10. Ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Αίτια) που αναλύονται στην εφαρμογή του μοντέλου DPSIR στην περιοχή έρευνας.

α/α	ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ
1	Άντληση υπόγειων υδάτων από συλλογικές γεωτρήσεις στο αλλουβιακό υδατικό σύστημα για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.
2	Άντληση υπόγειων υδάτων από ιδιωτικές γεωτρήσεις στο αλλουβιακό υδατικό σύστημα για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.
3	Άντληση νερού από την κοίτη του Πηνειού ποταμού σε σκοπό την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.
4	Άντληση υπόγειων υδάτων από ιδιωτικές γεωτρήσεις στο καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου-Κουτσόχερου για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών (περιοχή πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας).
5	Άντληση πηγαίου νερού από την τεχνητή λίμνη Αργυροπούλιου (περιοχή πηγών Μάτι Τυρνάβου) για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.
6	Άντληση υπόγειων υδάτων από γεωτρήσεις στο αλλουβιακό υδατικό σύστημα για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών.
7	Άντληση υπόγειων υδάτων από γεωτρήσεις στο καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου-Κουτσόχερου για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών (περιοχή πηγών Μάτι Τυρνάβου).
8	Άντληση υπόγειων υδάτων από γεωτρήσεις στο αλλουβιακό υδατικό σύστημα για την κάλυψη των βιομηχανικών αναγκών.
9	Απολήψεις νερού από τις περιθωριακές λεκάνες ανάντη του καρστικού συστήματος Δαμασίου-Τυρνάβου-Κουτσόχερου (λεκάνες Τσαριτσάνης, Ελασσόνας, Πέρα Κάμπου).

10	Εφαρμογή λιπαντικών αγωγών και αγωγών με τη χρήση φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων στις καλλιεργούμενες εκτάσεις (συχνά με μη ορθολογικό τρόπο).
11	Διάθεση υγρών αστικών αποβλήτων σε σηπτικούς και απορροφητικούς βόθρους.
12	Μη συστηματική παρακολούθηση της εξέλιξης των υδατικών πόρων και κατασκευής έργων εκμετάλλευσης νερού (γεωτρήσεις, υδρομαστεύσεις, απολήψεις κλπ).
13	Αμμοληψίες από την κοίτη του ποταμού Τιταρήσιου.
14	Μη ορθολογική εφαρμογή άρδευσης στον αγρό.
15	Διαρροές από τα δίκτυα μεταφοράς αρδευτικού και υδρευτικού νερού.
16	Κλιματική αλλαγή.

1. Αίτιο: Άντληση υπόγειων υδάτων από συλλογικές γεωτρήσεις στο αλλουβιακό υδατικό σύστημα για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.

Πιέσεις: α) Ταπείνωση της στάθμης των υπόγειων υδάτων.

β) Διαλυτοποίηση των παραγόμενων ρύπων σε μικρότερο όγκο νερού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων των ρύπων.

Κατάσταση: α) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

β) Διαμόρφωση συνθηκών ήπιας υπερεκμετάλλευσης με σταθερό όμως ρυθμό έντασης του φαινομένου.

γ) Αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών με σταθερό ρυθμό.

Επίπτωση: α) Αύξηση του λειτουργικού κόστους των παραγωγικών γεωτρήσεων και αδυναμία χρησιμοποίησης κάποιων εξ αυτών.

β) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας του υπόγειου νερού.

γ) Διατάραξη της υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος, που έχει ως συνέπεια την περιοδική ή παροδική αδυναμία τροφοδοσίας των κατάντη τμημάτων της ανατολικής Θεσσαλικής λεκάνης.

Αντίδραση: α) Εφαρμογή ορθολογικής τιμολογιακής πολιτικής για τη χρησιμοποίηση του νερού.

β) Αναδιάρθρωση των καλλιεργειών με έμφαση στις μη υδροβόρες και αποδοτικές καλλιέργειες.

γ) Βελτίωση του συστήματος μεταφοράς και εφαρμογής του νερού με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών.

δ) Κατασκευή εξωποτάμιων λιμνοδεξαμενών.

ε) Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου.

στ) Ανάπτυξη προγραμμάτων ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με την αναγκαιότητα ορθολογικής χρήσης του νερού.

2. Αίτιο: Άντληση υπόγειων υδάτων από ιδιωτικές γεωτρήσεις στο αλλουβιακό υδατικό σύστημα για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.

Πιέσεις: α) Ταπείνωση της στάθμης των υπόγειων υδάτων.

β) Διαλυτοποίηση των παραγόμενων ρύπων σε μικρότερο όγκο νερού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων των ρύπων.

γ) Αδυναμία ελέγχου των απολαμβανόμενων όγκων του νερού.

Κατάσταση: α) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

β) Διαμόρφωση συνθηκών ήπιας υπερεκμετάλλευσης με σταθερό όμως ρυθμό έντασης του φαινομένου.

γ) Αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών με σταθερό ρυθμό.

Επίπτωση: α) Αύξηση του λειτουργικού κόστους των παραγωγικών γεωτρήσεων και αδυναμία χρησιμοποίησης κάποιων εξ αυτών.

β) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας των υπόγειων υδάτων.

γ) Διατάραξη της υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος, που έχει ως συνέπεια την περιοδική ή παροδική αδυναμία τροφοδοσίας των κατάντη τμημάτων της ανατολικής θεσσαλικής λεκάνης.

Αντίδραση: α) Εφαρμογή ορθολογικής τιμολογιακής πολιτικής για τη χρησιμοποίηση του νερού.

β) Έλεγχος της απολαμβανόμενης ποσότητας νερού.

γ) Σταδιακή κατάργηση των ιδιωτικών γεωτρήσεων ή ένταξή τους στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα.

δ) Αναδιάρθρωση των καλλιεργειών με έμφαση στις μη υδροβόρες και αποδοτικές καλλιέργειες.

ε) Βελτίωση του συστήματος μεταφοράς και εφαρμογής του νερού με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών.

στ) Κατασκευή εξωποτάμιων λιμνοδεξαμενών.

ζ) Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου.

η) Ανάπτυξη προγραμμάτων ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με την αναγκαιότητα ορθολογικής χρήσης του νερού.

3. Αίτιο: Άντληση νερού από την κοίτη του Πηνειού ποταμού σε σκοπό την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.

Πιέσεις: α) Περιορισμός της απορροής του ποταμού.

β) Διαλυτοποίηση των παραγόμενων ρύπων σε μικρότερο όγκο νερού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων των ρύπων.

Κατάσταση: Αύξηση των συγκεντρώσεων των ρυπογόνων ουσιών.

Επίπτωση: α) Μείωση της στάθμης του Πηνειού ποταμού κατά τη θερινή περίοδο και περιορισμός της έκτασης της κοίτης κατά θέσεις.

β) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας του νερού του ποταμού.

γ) αδυναμία ικανοποίησης οικολογικής παροχής

Αντίδραση: α) Εφαρμογή ισχύουσας νομοθεσίας για την απαγόρευση των απολήψεων και την επιβολή των προβλεπόμενων αυστηρών κυρώσεων.

β) Ανάπτυξη προγραμμάτων ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με την αναγκαιότητα διαφύλαξης των επιφανειακών υδάτινων αποδεκτών.

4. Αίτιο: Άντληση υπόγειων υδάτων από ιδιωτικές γεωτρήσεις στο καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου-Κουτσόχερου για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών (περιοχή πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας).

Πιέσεις: α) Μείωση των παροχών των πηγών.

β) Μείωση της βασικής πηγής φυσικής τροφοδοσίας του αλλουβιακού υδατικού συστήματος.

γ) Ανεξέλεγκτη κατανάλωση νερού.

Κατάσταση: α) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

β) Διαμόρφωση συνθηκών ήπιας υπερεκμετάλλευσης με σταθερό όμως ρυθμό έντασης του φαινομένου

γ) Αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών με σταθερό ρυθμό.

Επίπτωση: α) Αύξηση του λειτουργικού κόστους των παραγωγικών γεωτρήσεων και αδυναμία χρησιμοποίησης κάποιων εξ αυτών.

β) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

γ) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας του υπόγειου νερού.

δ) Διατάραξη της υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος, που έχει ως συνέπεια την περιοδική ή παροδική αδυναμία τροφοδοσίας των κατάντη τμημάτων της ανατολικής Θεσσαλικής λεκάνης.

Αντίδραση: α) Εφαρμογή ορθολογικής τιμολογιακής πολιτικής για τη χρησιμοποίηση του νερού.

β) Έλεγχος της απολαμβανόμενης ποσότητας νερού.

γ) Σταδιακή κατάργηση των ιδιωτικών γεωτρήσεων ή ένταξή τους στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα.

δ) Αναδιάρθρωση των καλλιεργειών με έμφαση στις μη υδροβόρες και αποδοτικές καλλιέργειες.

ε) Βελτίωση του συστήματος μεταφοράς και εφαρμογής του νερού με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών.

στ) Κατασκευή εξωποτάμιων λιμνοδεξαμενών.

ζ) Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου.

η) Ανάπτυξη προγραμμάτων ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με τη σημασία του καρστικού συστήματος για την ευρύτερη περιοχή καθώς και την αναγκαιότητα ορθολογικής χρήσης του νερού.

5. Αίτιο: Άντληση πηγαίου νερού από την τεχνητή λίμνη Αργυροπούλιου (περιοχή πηγών Μάτι Τυρνάβου) για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.

Πιέσεις: α) Περιορισμός διαθέσιμου όγκου νερού για το υδροτοπικό σύστημα της λίμνης.

Κατάσταση: Μείωση της έκτασης αλλά και του βάθους του υδροτοπικού συστήματος της λίμνης Αργυροπούλιου.

Επίπτωση: α) Αλλαγή της υδροπεριόδου του υδροτοπικού συστήματος και περιορισμός των υφιστάμενων λειτουργιών του.

β) Ανόρυξη γεωτρήσεων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών εντός της περιοχής του ανοικτού συλλογικού αρδευτικού δικτύου του ΤΟΕΒ Αμπελώνα, υποσκέλισή του με αποτέλεσμα την οριστική κατάργησή του (1999).

Αντίδραση: α) Επιβολή ισχυουσών απαγορευτικών διατάξεων.

β) Ανάπτυξη προγραμμάτων ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με τη σημασία του υδροτοπικού συστήματος της λίμνης Αργυροπούλιου.

γ) Ενίσχυση αποκατάστασης των λειτουργιών του υδροτοπικού συστήματος με εισαγωγή των ειδών που εξαφανίστηκαν ή που βρίσκονται υπό τον κίνδυνο εξαφάνισης.

6. Αίτιο: Άντληση υπόγειων υδάτων από γεωτρήσεις στο αλλουβιακό υδατικό σύστημα για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών.

Πιέσεις: α) Ταπείνωση της στάθμης των υπόγειων υδάτων.

β) Διαλυτοποίηση των παραγόμενων ρύπων σε μικρότερο όγκο νερού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων των ρύπων.

Κατάσταση: α) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

β) Διαμόρφωση συνθηκών ήπιας υπερεκμετάλλευσης με σταθερό όμως ρυθμό έντασης του φαινομένου.

γ) Αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών με σταθερό ρυθμό.

Επίπτωση: α) Αύξηση του λειτουργικού κόστους των παραγωγικών γεωτρήσεων και αδυναμία χρησιμοποίησης κάποιων εξ αυτών.

β) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας του υπόγειου νερού.

γ) Διατάραξη της υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος, που έχει ως συνέπεια την περιοδική ή παροδική αδυναμία τροφοδοσίας των κατάντη τμημάτων της ανατολικής Θεσσαλικής λεκάνης.

Αντίδραση: α) Ανάπτυξη προγραμμάτων ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με την αναγκαιότητα ορθολογικής χρήσης του νερού.

β) Θεώρηση ενδεχόμενης αναπροσαρμογής της τιμολογιακής πολιτικής.

γ) Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου.

7. Αίτιο: Άντληση υπόγειων υδάτων από γεωτρήσεις στο καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου-Κουτσόχερου για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών (περιοχή πηγών Μάτι Τυρνάβου).

Πιέσεις: α) Μείωση των παροχών των πηγών.

β) Μείωση της βασικής πηγής φυσικής τροφοδοσίας του αλλουβιακού υδατικού συστήματος.

Κατάσταση: α) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

β) Διαμόρφωση συνθηκών ήπιας υπερεκμετάλλευσης με σταθερό όμως ρυθμό έντασης του φαινομένου.

γ) Αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών με σταθερό ρυθμό.

Επίπτωση: α) Αύξηση του λειτουργικού κόστους των παραγωγικών γεωτρήσεων και αδυναμία χρησιμοποίησης κάποιων εξ αυτών.

β) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

γ) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας του υπόγειου νερού.

δ) Διατάραξη της υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος, που έχει ως συνέπεια την περιοδική ή παροδική αδυναμία τροφοδοσίας των κατάντη τμημάτων της ανατολικής Θεσσαλικής λεκάνης.

Αντίδραση: α) Ανάπτυξη προγραμμάτων ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με τη σημασία του καρστικού συστήματος για την ευρύτερη περιοχή καθώς και την αναγκαιότητα ορθολογικής χρήσης του νερού.

β) Θεώρηση ενδεχόμενης αναπροσαρμογής της τιμολογιακής πολιτικής.

γ) Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου.

8. Αίτιο: Άντληση υπόγειων υδάτων από γεωτρήσεις στο αλλουβιακό υδατικό σύστημα για την κάλυψη των βιομηχανικών αναγκών.

Πιέσεις: α) Ταπείνωση της στάθμης των υπόγειων υδάτων.

β) Διαλυτοποίηση των παραγόμενων ρύπων σε μικρότερο όγκο νερού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων των ρύπων.

Κατάσταση: α) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

β) Διαμόρφωση συνθηκών ήπιας υπερεκμετάλλευσης με σταθερό όμως ρυθμό έντασης του φαινομένου.

γ) Αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών με σταθερό ρυθμό.

Επίπτωση: α) Αύξηση του λειτουργικού κόστους των παραγωγικών γεωτρήσεων και αδυναμία χρησιμοποίησης κάποιων εξ αυτών.

β) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας του υπόγειου νερού.

γ) Διατάραξη της υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος, που έχει ως συνέπεια την περιοδική ή παροδική αδυναμία τροφοδοσίας των κατάντη τμημάτων της ανατολικής θεσσαλικής λεκάνης.

Αντίδραση: α) Τιμολόγηση νερού βιομηχανικής χρήσης.

β) Ανάπτυξη νομοθετικού πλαισίου και εφαρμογής του για τον έλεγχο των απολαμβανόμενων ποσοτήτων νερού.

9. Αίτιο: Απολήψεις νερού από τις περιθωριακές λεκάνες ανάντη του καρστικού συστήματος Δαμασίου-Τυρνάβου-Κουτσόχερου (λεκάνες Τσαριτσάνης, Ελασσόνας, Πέρα Κάμπου).

Πιέσεις: Ανταγωνιστική χρήση διαθέσιμου όγκου νερού.

Κατάσταση: Μείωση φυσικού εμπλουτισμού υδατικού συστήματος.

Επίπτωση: α) Ταπείνωση της υπόγειας στάθμης.

β) Περιορισμός των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων.

Αντίδραση: α) Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων υδατικών πόρων.

β) Εφαρμογή τιμολογιακής πολιτικής κοστολόγησης του νερού.

10. Αίτιο: Εφαρμογή λιπαντικών αγωγών και αγωγών με τη χρήση φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων στις καλλιεργούμενες εκτάσεις (συχνά με μη ορθολογικό τρόπο).

Πιέσεις: α) Συσσώρευση υπολειμμάτων στην εδαφική ζώνη.

β) Διαστάλαξη των ρύπων στην κορεσμένη ζώνη των ΥΥΣ.

γ) Απορροή των ρύπων στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες.

Κατάσταση: α) Αύξηση του ρυπαντικού φορτίου των επιφανειακών και των υπόγειων υδατικών πόρων.

β) Αύξηση των συγκεντρώσεων των θρεπτικών και πιθανόν των συγκεντρώσεων ανθεκτικών ουσιών φυτοπροστατευτικών, στην εδαφική ζώνη.

Επίπτωση: α) Υποβάθμιση-επιβάρυνση των εδαφών.

β) Επιβάρυνση της χημικής ποιότητας του Πηνειού ποταμού.

γ) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας του υπόγειου υδατικού συστήματος.

Αντίδραση: α) Επιβολή των ισχυουσών απαγορευτικών διατάξεων.

β) Επέκταση του προγράμματος αποκατάστασης της νιτρορρύπανσης.

γ) Ανάπτυξη προγραμμάτων ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με την ορθολογική χρήση της λιπαντικής αγωγής και των διάφορων φυτοπροστατευτικών προϊόντων.

δ) Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου.

11. Αίτιο: Διάθεση υγρών αστικών αποβλήτων σε σηπτικούς και απορροφητικούς βόθρους.

Πιέσεις: Εισαγωγή ρυπογόνου φορτίου στην κορεσμένη παραγωγική ζώνη του ΥΥΣ.

Κατάσταση: Αύξηση, σε τοπική κλίμακα, των συγκεντρώσεων των ρύπων στο υπόγειο υδατικό σύστημα .

Επίπτωση: Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας των υπόγειων υδατικών πόρων.

Αντίδραση: α) Εφαρμογή νομοθεσίας απαγόρευσης της χρήσης απορροφητικών βόθρων και επιβολή των προβλεπόμενων κυρώσεων.

β) Ανάπτυξη προγράμματος ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης.

δ) Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου.

12. Αίτιο: Μη συστηματική παρακολούθηση της εξέλιξης των υδατικών πόρων και κατασκευής έργων εκμετάλλευσης νερού (γεωτρήσεις, υδρομαστεύσεις, απολήψεις κλπ).

Πιέσεις: α) Αδυναμία παρακολούθησης της εξέλιξης του υδατικού συστήματος.

β) Αδυναμία εντοπισμού των κρίσιμων καταστάσεων, που μπορούν να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμες ζημιές του υδατικού συστήματος.

Κατάσταση: α) Ανεξέλεγκτη χρήση του νερού.

β) Εγκατάσταση αρνητικού υδατικού ισοζυγίου

γ) Αύξηση των συγκεντρώσεων των ρυπογόνων ουσιών στους υδατικούς πόρους.

Επίπτωση: α) Περιορισμός των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων.

β) Περιορισμός της επιφανειακής απορροής του Πηνειού ποταμού.

γ) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας των επιφανειακών και των υπόγειων υδατικών πόρων.

Αντίδραση: α) Ανάπτυξη και λειτουργία δικτύου συστηματικής παρακολούθησης των επιφανειακών και των υπόγειων υδατικών πόρων.

β) Σχεδίαση και σύσταση φορέα διαχείρισης του προαναφερόμενου δικτύου παρακολούθησης.

γ) Ανάπτυξη μαθηματικού ομοιώματος υπόγειας ροής και διασποράς ρύπων για τη μελέτη εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης των διαθέσιμων υδατικών πόρων καθώς και για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης και μέτρων αποκατάστασης.

δ) Ανάπτυξη και σύνδεση με τα παραπάνω εργαλεία ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης (early warning system).

ε) Διάχυση των αποτελεσμάτων της συστηματικής παρακολούθησης με σκοπό την ενημέρωση και την ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης.

13. Αίτιο: Αμμοληψίες από την κοίτη του ποταμού Τιταρήσιου.

Πιέσεις: α) Περιορισμός της επιφάνειας διαβροχής της κοίτης.

β) Περιορισμός του χρόνου παραμονής του νερού επιφανειακής απορροής.

Κατάσταση: Δραματική μείωση του φυσικού εμπλουτισμού του υπόγειου υδατικού συστήματος.

Επίπτωση: α) Μείωση εκμεταλλεύσιμων υδατικών αποθεμάτων.

β) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας του υπόγειου νερού.

γ) Διατάραξη της υδροδυναμικής λειτουργίας του συστήματος, που έχει ως συνέπεια την περιοδική ή παροδική αδυναμία τροφοδοσίας των κατάντη τμημάτων της ανατολικής θεσσαλικής λεκάνης.

Αντίδραση: α) Επιβολή των απαγορευτικών διατάξεων για αμμοληψίες από την κοίτη του ποταμού Τιταρήσιου.

β) Έργα αποκατάστασης των λειτουργιών της φυσικής κοίτης με τοποθέτηση π.χ. συρματοκιβωτίων κ.λ.π.

γ) Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων υδατικών πόρων.

δ) Δημιουργία λεκανών κατάκλισης-επιφανειών μαιανδρισμού της κοίτης.

14. Αίτιο: Μη ορθολογική εφαρμογή άρδευσης στον αγρό.

Πιέσεις: α) Έκπλυση εδαφών.

β) Συσσώρευση αλάτων.

γ) Πρόκληση επιφανειακής απορροής.

δ) Πρόκληση διασταλάξεων, πλούσιων σε ρυπαντικό φορτίο, προς την κορεσμένη ζώνη του εδάφους.

Κατάσταση: α) Αύξηση ρυπαντικού φορτίου επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων.

β) Αύξηση των συγκεντρώσεων των αλάτων στην εδαφική ζώνη.

Επίπτωση: α) Υποβάθμιση του εδάφους.

β) Υποβάθμιση της χημικής ποιότητας επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων.

γ) Αύξηση κόστους άρδευσης.

δ) Μείωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων νερού.

Αντίδραση: α) Βελτιστοποίηση μεθόδων και πρακτικών άρδευσης.

β) Ανάπτυξη συστήματος πρόγνωσης αναγκών καλλιεργειών σε νερό για τον περιορισμό του όγκου νερού που χρησιμοποιείται.

γ) Σύσταση και λειτουργία ελεγκτικού μηχανισμού για τις αρδεύσεις.

δ) Εφαρμογή τιμολογιακής πολιτικής με κλιμακωτή χρέωση του νερού.

ε) Ανάπτυξη προγράμματος ευαισθητοποίησης της κοινής γνώμης σχετικά με τις ορθολογικές πρακτικές άρδευσης.

15. Αίτιο: Διαρροές από τα δίκτυα μεταφοράς αρδευτικού και υδρευτικού νερού.

Πιέσεις: α) Υπερβολική κατανάλωση νερού.

β) Πρόκληση επιφανειακής απορροής.

γ) Πρόκληση εκούσιου εμπλουτισμού της κορεσμένης ζώνης.

Κατάσταση: α) Τοπική περιοδική ανύψωση της υπόγειας στάθμης.

β) Πιθανή τοπική αύξηση της συγκέντρωσης των ρύπων.

Επίπτωση: α) Ενίσχυση της φυσικής τροφοδοσίας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων σε τοπική κλίμακα.

β) Πιθανή υποβάθμιση της χημικής ποιότητας των υδατικών πόρων.

γ) Αύξηση κόστους άρδευσης.

Αντίδραση: α) Συστηματική συντήρηση συλλογικών δικτύων.

β) Άμεση αντικατάσταση των ανοικτών δικτύων με υπόγεια υπό πίεση δίκτυα.

γ) Συστηματικός έλεγχος της κατάστασης του δικτύου και ανάπτυξη μηχανισμών άμεσης αποκατάστασης των βλαβών που προκύπτουν.

16. Αίτιο: Κλιματική αλλαγή.

i) Μεταβολή ύψους ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

ii) Μεταβολή μορφής (ραγδαιότητας) ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

iii) Εκτεταμένες περίοδοι ξηρασίας

iv) Αύξηση εξατμισοδιαπνοής.

Πιέσεις: Αύξηση των αρδευτικών αναγκών.

Κατάσταση: Μείωση του φυσικού εμπλουτισμού του υδατικού συστήματος.

Επίπτωση: α) Ταπείνωση της υπόγειας στάθμης.

β) Περιορισμός των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων.

Αντίδραση: α) Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων υδατικών πόρων.

β) Εφαρμογή τιμολογιακής πολιτικής κοστολόγησης του νερού.

13 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

13.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για μια σαφέστερη κατανόηση των μηχανισμών ροής σε ένα υπόγειο υδατικό σύστημα, οδήγησε στη ραγδαία αύξηση της χρήσης, άρα και της εξέλιξης, των διάφορων τύπων μοντέλων προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Τρία είναι τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία και καθιστούν τα μοντέλα των υπόγειων υδάτων πρακτικά εργαλεία (Prickett 1979, Πλιάκας 2003, Μυριούνης 2008):

- 1) Η δυνατότητα τους στην επίλυση υπερβολικά σύνθετων προβλημάτων ροής υπόγειων υδάτων.
- 2) Η εύκολη και ελεύθερη διάθεσή τους σε κάθε ενδιαφερόμενο χρήστη.
- 3) Ο εύκολος τρόπος μετάδοσης της αποκτούμενης εμπειρίας στη λειτουργία του λογισμικού, σε ένα ευρύ φάσμα ανθρώπων μέσω ενός απλού ηλεκτρονικού υπολογιστή, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στην επίλυση των ιδιαίτερων προβλημάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Η γενικότερη χρησιμότητα των μοντέλων αυτών μπορεί να εστιαστεί στις παρακάτω εφαρμογές (US National Council 1990, ASTM D5447-93, Πισινάρας 2008):

- υποστήριξη στην αξιολόγηση υδρογεωλογικών προβλημάτων,
- σχεδιασμός μέτρων αντιμετώπισης και αποκατάστασης,
- αναγνώριση και αποτύπωση των υδρογεωλογικών συνθηκών,
- εντοπισμός ελλείψεων στα απαιτούμενα δεδομένα και καθοδήγηση για την κάλυψη των ελλείψεων με επιπλέον δεδομένα.

Τέλος, μια βασική πτυχή, σχετικά με τη διαχείριση και την προστασία των υπόγειων υδατικών πόρων, αποτελεί η δυνατότητα αξιολόγησης εναλλακτικών διαχειριστικών σεναρίων κάτι που μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση των μοντέλων ροής υπόγειων υδάτων. Το γεγονός αυτό καθιστά ακόμα πιο επιτακτική τη χρήση των μοντέλων αυτών σήμερα, καθώς η ικανότητα πρόγνωσης συμβάλει στη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Kukuric and Hall 1998, Brown and Trott 2014).

13.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

Τα μοντέλα υπόγειων υδάτων μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τα κριτήρια κατάταξης. Ωστόσο, η πιο ολοκληρωμένη ταξινόμηση των μοντέλων υπόγειων υδάτων και αυτή που έχει επικρατήσει, είναι η ταξινόμηση κατά τα πρότυπα ASTM (American Society for Testing and Material D5880-95). Τα κυριότερα κριτήρια ταξινόμησης, με βάση τη μέθοδο αυτή, είναι: η μεθοδολογία δόμησης, η

μαθηματική επίλυση των κυριότερων διαφορικών εξισώσεων, η μεταβλητή κατάσταση, η πιστότητα και η ακρίβεια.

Ανάλογα με τη μεθοδολογία δόμησης τα μοντέλα διακρίνονται ως εξής:

- Φυσικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά αναπτύσσονται στην πλειοψηφία τους δοχεία, τα οποία περιέχουν το υδροφόρο μέσο δια μέσω του οποίου πραγματοποιείται η υπόγεια ροή. Χρησιμοποιούνται κυρίως για εκπαιδευτικούς σκοπούς καθώς δεν είναι σε θέση να προσομοιώσουν τις πολύπλοκες συνθήκες των πραγματικών υδρογεωλογικών συστημάτων, παρά το γεγονός ότι ειδικά στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκαν αρκετά εκτεταμένα για την μελέτη προβλημάτων υπόγειας ροής.
- Αναλογικά μοντέλα. Τα αναλογικά μοντέλα είναι κατά βάση ηλεκτρικά ανάλογα αντιστάσεων-πυκνωτών. Η χρήση τους έχει περιοριστεί καθώς αντικαταστάθηκαν από λογισμικά Η/Υ.
- Μαθηματικά μοντέλα. Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούν την πιο σύγχρονη μέθοδο προσομοίωσης της υπόγειας ροής αλλά και της μεταφοράς ρύπων στα υπόγεια ύδατα. Τα μοντέλα αυτά οφείλουν την ανάπτυξή τους στη ραγδαία εξέλιξη των Η/Υ.

Ανάλογα με τη μέθοδο μαθηματικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων, τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται σε αναλυτικά και αριθμητικά. Τα αναλυτικά μοντέλα παρέχουν υψηλότερη ακρίβεια σε προβλήματα ροής και μεταφοράς διαλυτών ουσιών υπερτερώντας έτσι έναντι των αριθμητικών. Ωστόσο, η εφαρμογή των συγκεκριμένων μοντέλων είναι περιορισμένη εξαιτίας των τεχνικών δυσκολιών της γρήγορης επίλυσής του συστήματος των εξισώσεων, οι οποίες τα χαρακτηρίζουν. Από την άλλη πλευρά, τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως για την προσομοίωση πολύπλοκων υδρογεωλογικών συνθηκών, καθώς είναι καταλληλότερα στις περιπτώσεις όπου το υπό μελέτη σύστημα περιλαμβάνει ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, ανισοτροπία και χωρικά μεταβαλλόμενες υδραυλικές παραμέτρους, ρυθμούς άντλησης και ρυθμούς τροφοδοσίας.

Από τις αριθμητικές μεθόδους, αυτές που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο είναι των πεπερασμένων διαφορών, των πεπερασμένων στοιχείων, των οριακών στοιχείων και των αναλυτικών στοιχείων. Από τις μεθόδους αυτές, τα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούν αυτή των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση προβλημάτων ροής ή μεταφοράς ρύπου. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η διακριτοποίηση της περιοχής έρευνας γίνεται σε κελιά (ή κυψελίδες) τετραγωνικής ή ορθογωνικής διατομής, στην περίπτωση δισδιάστατων προβλημάτων και σε ορθορομβικά κελιά όταν πρόκειται για τρισδιάστατο πρόβλημα. Αντίστοιχα, οι διαστάσεις των κελιών μπορεί να είναι ίδιες ή μεταβαλλόμενες, συνθέτοντας έτσι ένα ομοιόμορφο ή μη πλέγμα (Anderson and Woessner 1992, Zdehlik 2016).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει υψηλότερη ακρίβεια και ευελιξία στην διακριτοποίηση της περιοχής προσομοίωσης, η οποία διακριτοποίηση γίνεται σε τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία για δισδιάστατα προβλήματα και τετραεδρικά, εξαεδρικά ή πρισματικά στοιχεία για την περίπτωση των τρισδιάστατων προβλημάτων. Η επιλογή

μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε περιοχής έρευνας και τη φύση του εν δυνάμει προβλήματος.

Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι πιο εύκολο να προγραμματιστεί και να κατανοηθεί και ο όγκος των δεδομένων που απαιτούνται για την κατασκευή του πλέγματος, στην περίπτωση αυτή, είναι μικρότερος. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει καλύτερη προσέγγιση στην περίπτωση ακανόνιστων ορίων και εσωτερικών γεωλογικών δομών, καθώς επίσης μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα σημειακές πηγές και καταβόθρες, επιφάνειες διήθησης και τη μεταβαλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια του υπογείου νερού. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι στις πεπερασμένες διαφορές υπολογίζεται μία τιμή του υδραυλικού φορτίου για κάθε κομβικό σημείο και αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή για το αντίστοιχο κελί ενώ στα πεπερασμένα στοιχεία το υδραυλικό φορτίο ορίζεται πλήρως σε κάθε σημείο του στοιχείου με τη χρήση των συναρτήσεων παρεμβολής.

Αναφορικά με τη μεταβλητή κατάσταση (state variable), τα μοντέλα υπόγειων υδάτων διακρίνονται ως εξής:

- Μοντέλα ροής υπόγειων υδάτων. Στα μοντέλα αυτά, στην περίπτωση μονοφασικής ροής περιλαμβάνεται μόνο μία εξίσωση, η οποία κατά περίπτωση υπολογίζει το υδραυλικό φορτίο και την πίεση (ή το δυναμικό), ενώ σε περιπτώσεις πολυφασικής ροής χρησιμοποιείται μία ξεχωριστή εξίσωση για κάθε φάση.
- Μοντέλα μεταφοράς ρύπου. Στην περίπτωση των μοντέλων αυτών, η εξίσωση υπολογισμού της ροής συνοδεύεται από μία εξίσωση για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ρύπου στο υδρογεωλογικό σύστημα.

Τέλος, ως προς την πιστότητα και την ακρίβειά τους, τα μοντέλα υπόγειων υδάτων διαχωρίζονται, σε αυτά που χρησιμοποιούνται για να καταδείξουν αν είναι αναγκαία η ακριβής προσομοίωση (αναγνωριστικά μοντέλα) και στα εφαρμοσμένα-τεχνικά μοντέλα. Στα πρώτα, η πιστότητα και η ακρίβεια περιγραφής ενός υδρογεωλογικού συστήματος είναι σχετικά μικρή και για το λόγο αυτό εφαρμόζονται κυρίως κατά την προσομοίωση γενικευμένων μηχανισμών λειτουργίας ενός φυσικού συστήματος. Αντιθέτως, τα εφαρμοσμένα ή τεχνικά μοντέλα έχουν εφαρμογή στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος, όταν σ' αυτό συμβαίνουν συγκεκριμένες μεταβολές των οριακών συνθηκών, των φορτίσεων και των υδραυλικών παραμέτρων (Πισινάρας 2008).

13.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Προκειμένου να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί ένα μοντέλο προσομοίωσης υπόγειας ροής, θα πρέπει να ακολουθείται κάθε φορά μια σειρά διαδικασιών-πρωτόκολλο, αρχής γενομένης από τον σαφή καθορισμό του σκοπού για τον οποίο προορίζεται (Anderson &

Woessner 1992). Ένα τυπικό πρωτόκολλο ανάπτυξης μοντέλου προσομοίωσης περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- καθορισμός των αντικειμενικών στόχων της προσομοίωσης,
- ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου του φυσικού συστήματος,
- επιλογή του κατάλληλου λογισμικού-κώδικα,
- σχεδιασμός του μοντέλου υπόγειας ροής,
- ρύθμιση του μοντέλου και διεξαγωγή ανάλυσης ευαισθησίας,
- επαλήθευση του μοντέλου και εφαρμογή προγνωστικών σεναρίων εξέλιξης του συστήματος,
- παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του μοντέλου προσομοίωσης.

Κατά τη διαδικασία της παραπάνω ακολουθίας, υπάρχει περίπτωση να παρουσιασθούν αλληλοεπικαλύψεις και έτσι κάποια προηγούμενα στάδια να αναθεωρούνται με την προσθήκη νέων δεδομένων, επαναπροσδιορίζοντας ενδεχομένως και το εννοιολογικό μοντέλο. Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 13.1.

Ο καθορισμός των αντικειμενικών στόχων αποτελεί, όπως ειπώθηκε, το πρώτο και πολύ βασικό βήμα στην ανάπτυξη ενός μοντέλου ροής υπόγειων υδάτων. Τα προβλήματα, για τα οποία προορίζεται να δώσει λύσεις το μοντέλο, καθορίζουν τις λεπτομέρειες καθώς και το επίπεδο ακρίβειας που απαιτείται κατά την προσομοίωση.

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί μια ερμηνεία ή λειτουργική περιγραφή όλων των συνθηκών, που διέπουν το υπό μελέτη σύστημα και ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο παραδοχών, με τις οποίες το πραγματικό πρόβλημα ανάγεται σε μια απλοποιημένη μορφή, αποτελώντας έτσι μια λειτουργική περιγραφή των χαρακτηριστικών και της δυναμικής του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος (Πισινάρας 2008, Μυριούνης 2009, Ματιάτος 2012, Λάμπας 2018). Ο ρόλος του εννοιολογικού μοντέλου δηλαδή είναι η ομαδοποίηση των δεδομένων υπαίθρου σε ένα σύνολο υποθέσεων και εννοιών, οι οποίες μπορούν να ποσοτικοποιηθούν. Ως εκ τούτου, η προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού ενός (ή και περισσοτέρων) υδατικού συστήματος με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων, απαιτεί την όσο το δυνατό μεθοδικότερη συλλογή δεδομένων και μετρήσεων υπαίθρου σε ό,τι αφορά τα γεωλογικά, υδρογεωλογικά, υδρολογικά, κλιματολογικά, τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής μελέτης, έτσι ώστε να αποσαφηνιστούν πλήρως οι μηχανισμοί λειτουργίας του υπό εξέταση υδατικού συστήματος. Τα σημαντικότερα στοιχεία σύνθεσης του εννοιολογικού μοντέλου συνοψίζονται παρακάτω:



Εικόνα 13.1. Στάδια ανάπτυξης μοντέλου προσομοίωσης (ASTM D5447-93).

❖ Γεωλογικό υπόβαθρο: Το γεωλογικό πλαίσιο αφορά στη δομή και την κατανομή των υδροφόρων και αδιαπέρατων στρωμάτων στην περιοχή προσομοίωσης. Παράμετροι

σημαντικού ενδιαφέροντος είναι το πάχος των στρωμάτων, η συνέχειά τους και η λιθολογική τους δομή.

❖ Υδρολογικό υπόβαθρο: Το υδρολογικό υπόβαθρο ενός εννοιολογικού μοντέλου περιλαμβάνει τα φυσικά όρια του συστήματος, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν ή ελέγχουν την υπόγεια ροή, την ανάλυση της κατεύθυνσης ροής του υπογείου νερού και τον τύπο του μέσου. Το εννοιολογικό μοντέλο πρέπει να αποσαφηνίζει σε πιο βαθμό το υπό μελέτη σύστημα συμπεριφέρεται ως πορώδες μέσο. Το υδρολογικό υπόβαθρο περιλαμβάνει επίσης τα όρια του συστήματος τα οποία δεν είναι φυσικά και μεταβάλλονται με τον χρόνο.

❖ Υδραυλικές ιδιότητες: Στα υδραυλικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται η μεταβιβαστικότητα (T), η υδραυλική αγωγιμότητα (K) και η αποθηκευτικότητα (S) του συστήματος. Οι υδραυλικές ιδιότητες μπορεί να είναι ομοιογενείς ή ετερογενείς οπότε και επηρεάζουν σημαντικά την περαιτέρω εξέλιξη της προσομοίωσης. Οι ιδιότητες αυτές είναι σημαντικό να τεκμηριώνονται από μετρήσεις πεδίου, ώστε να καθοριστεί το εύρος μεταβολής τους κατά το στάδιο της ρύθμισης.

❖ Οριακές συνθήκες: Οι εισροές και οι εκροές ενός υδατικού συστήματος, η χωρική τους κατανομή η χρονική μεταβλητότητά τους, περιγράφουν την υδραυλική επικοινωνία του χώρου προσομοίωσης με την περιβάλλουσα περιοχή και επηρεάζουν τους μηχανισμούς υπόγειας ροής εντός του χώρου του μοντέλου. Οι πιο συνηθισμένες εισροές και εκροές σε ένα υδατικό σύστημα είναι οι γεωτρήσεις άντλησης ή εμπλουτισμού, η εξατμισοδιαπνοή, καθώς και οι διάφορες διαδικασίες φυσικού εμπλουτισμού (κατείσδυση, υδραυλική επικοινωνία με επιφανειακά υδατικά σώματα ή με παρακείμενα υπόγεια υδροφόρα συστήματα). Η αναγνώριση και περιγραφή των εισροών και των εκροών πρέπει απαραίτητως να γίνουν κατά την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου. Η περιγραφή περιλαμβάνει τους ρυθμούς και την χρονική μεταβολή των εισροών και των εκροών.

Μετά την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, ακολουθεί η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου λογισμικού-κώδικα, που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών του φυσικού συστήματος, όπως αυτά αναγνωρίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο.

Ο σχεδιασμός του μοντέλου αποτελεί ουσιαστικά τη διαδικασία εκείνη κατά την οποία το εννοιολογικό μοντέλο του υδρογεωλογικού συστήματος μετατρέπεται σε μαθηματικό πρόβλημα, έτσι ώστε να μπορεί να εισαχθεί στον αριθμητικό κώδικα. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός μοντέλου ροής υπόγειων υδάτων είναι: οι διαστάσεις του, η διακριτοποίηση στο χώρο και στο χρόνο, οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες και οι υδραυλικές του ιδιότητες.

Κατά το στάδιο της ρύθμισης-βαθμονόμησης γίνεται επεξεργασία των δεδομένων, τα οποία εισάγονται στον αριθμητικό κώδικα. Με τον όρο ρύθμιση ενός μοντέλου νοείται, η διαδικασία εκείνη κατά την οποία τόσο οι υδραυλικές παράμετροι όσο και οι αρχικές και οριακές συνθήκες προσαρμόζονται εντός καθορισμένων ορίων, έτσι ώστε να επιτευχθεί

όσο το δυνατόν καλύτερη ταύτιση μεταξύ προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών φορτίου, ροής κ.α. Το στάδιο αυτό της ρύθμισης πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα: όταν το υδροφόρο σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και σε δυναμικά μεταβαλλόμενη κατάσταση. Μετά τη ρύθμιση ακολουθεί η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου, η οποία αποτελεί μια μέθοδο ποσοτικού προσδιορισμού της επίδρασης που ασκείται στο μοντέλο, όταν μεταβάλλονται οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων (υδραυλική αγωγιμότητα, αποθηκευτικότητα κ.α.). Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι να ποσοτικοποιηθεί η αβεβαιότητα που εμπεριέχεται στις βασικές παραμέτρους του συστήματος, στις οριακές συνθήκες και τις πιέσεις (Anderson & Woessner 1992).

Κατά το στάδιο της επαλήθευσης (validation ή verification) του μοντέλου συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του, με ένα άλλο σύνολο δεδομένων πεδίου, τα οποία αντιπροσωπεύουν διαφορετικές οριακές συνθήκες ή πιέσεις. Το στάδιο αυτό εφαρμόζεται με σκοπό να προσδιοριστεί η δυνατότητα του μαθηματικού μοντέλου να προσομοιάσει την υδροδυναμική κατάσταση του υπό μελέτη συστήματος (Konikow 1978). Στις περισσότερες των περιπτώσεων εφαρμογής ενός μαθηματικού μοντέλου, μετά την επαλήθευση του μοντέλου ακολουθεί η εφαρμογή προγνωστικών προσομοιώσεων εξέλιξης του υδατικού συστήματος. Οι προσομοιώσεις αυτές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη και την ανάλυση διαφόρων σεναρίων, τα οποία καθορίζονται από τους αντικειμενικούς στόχους.

13.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟ-ΛΕΚΑΝΗ ΤΥΡΝΑΒΟΥ

13.4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Όπως ειπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη ενός μοντέλου ροής υπόγειων υδάτων αποτελεί ο καθορισμός των αντικειμενικών στόχων της προσομοίωσης. Για την παρούσα έρευνα, η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου αποσκοπούσε στην προσομοίωση των μηχανισμών λειτουργίας και της υδροδυναμικής εξέλιξης του υπόγειου υδατικού συστήματος της υπολεκάνης Τυρνάβου. Η προσομοίωση αυτή είχε ως στόχο, αρχικά, την επιβεβαίωση ενός αξιόπιστου υδατικού ισοζυγίου μεταξύ των διακινούμενων όγκων ύδατος από και προς το υπόγειο υδατικό σύστημα, την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του συστήματος αυτού υπό το καθεστώς διάφορων κλιματικών μεταβολών και τον έλεγχο διάφορων εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης.

13.4.2 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Λεπτομέρειες σχετικά με το σύνολο των δεδομένων, τα οποία συνθέτουν το εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής μελέτης, παρουσιάσθηκαν αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια. Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα από την υδροχημική μελέτη, τη μελέτη της πιεζομετρίας

και την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου αναπτύσσεται στη συνέχεια μια λειτουργική περιγραφή των χαρακτηριστικών και της δυναμικής του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος. Για την παρουσίαση του εννοιολογικού μοντέλου, όντας αυτό μια απλοποιημένη αναπαράσταση του πραγματικού υδατικού συστήματος, γίνονται ορισμένες παραδοχές, οι οποίες θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Το αλλουβιακό υδατικό σύστημα της υπολεκάνης Τυρνάβου αποτελείται από μια ελεύθερη υδροφορία, η οποία αναπτύσσεται στο βορειοδυτικό τμήμα της υπολεκάνης, γύρω από τον κώνο κορημάτων του ποταμού Τιταρήσιου. Η υδροφορία αυτή προς το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης μεταπίπτει σε ένα σύστημα δύο υδροφοριών, μιας φρεάτιας χαμηλού δυναμικού και μιας βαθύτερης υπό πίεση (ή μερικώς υπό πίεση) μεγάλου δυναμικού, οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους από επάλληλα ημιπερατά έως αδιαπέρατα στρώματα ιλύος και αργίλου, που σε κλίμακα λεκάνης μπορούν να θεωρηθούν ως ένα ενιαίο στρώμα. Το μέγιστο πάχος του αργιλικού αυτού στρώματος είναι 50m στο κεντρικό τμήμα ενώ λεπταίνει προς τα περιθώρια της υπολεκάνης, όπου και αποσβένεται. Το πάχος της φρεάτιας υδροφορίας ποικίλλει, όμως γενικότερα είναι μικρότερο από 70m, ενώ το πάχος του βαθύτερου υπο-πίεση υδροφόρου υπερβαίνει τα 400m στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και λεπταίνει προς τα περιθώρια της υπολεκάνης. Στις περιοχές ανάπτυξης των κώνων κορημάτων των ποταμών Πηνειού και Τιταρήσιου, στα σημεία εξόδου τους από το ορεινό ανάγλυφο της πεδιάδας, η λιθολογία του υδατικού συστήματος χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χονδρόκοκκα υλικά (άμμοι, κροκάλες, λατύπες), τα οποία αποτελούν υλικά απόθεσης των ποταμών. Το αδιαπέρατο υπόβαθρο του αλλουβιακού υδατικού συστήματος, αποτελείται από μεταμορφωμένους σχηματισμούς της κρυσταλλοσχιτώδους σειράς της Πελαγονικής ζώνης, που εμφανίζεται με μεγάλη επιφανειακή εξάπλωση στα βόρεια όρια της υπολεκάνης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εισροές και οι εκροές του υδατικού συστήματος της περιοχής έρευνας, οι οποίες παρουσιάζονται στο χάρτη της Εικόνας 13.2 και αναλύονται παρακάτω. Ο χάρτης αυτός ουσιαστικά αποτελεί σύνθεση, των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση των ποσοτικών δεδομένων (Εικόνα 7.14) και την ανάλυση των ποιοτικών-ισοτοπικών δεδομένων (Εικόνα 11.11), όπως αυτά αναφέρθηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια.

ΕΙΣΡΟΕΣ

- Βασική πηγή τροφοδοσίας του υπόγειου υδατικού συστήματος αποτελούν οι πλευρικές μεταγγίσεις από τους καρστικούς σχηματισμούς στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης, οι οποίοι βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τα αλλουβιακά ιζήματα (Παράγραφοι 6.3.2., 9.2.2).
- Εξίσου σημαντική πηγή τροφοδοσίας αποτελούν οι πλευρικές μεταγγίσεις από τους κώνους κορημάτων πρωτίστως του ποταμού Τιταρήσιου και δευτερευόντως του Πηνειού (Παράγραφοι 5.3.1, 5.3.2, 6.3.2). Οι κώνοι αυτοί συμμετέχουν επίσης στην τροφοδοσία και

μέσω των αυξημένων διηθήσεων στη ζώνη ανάπτυξής τους (Panagoroulos et al. 2001, Κουκίδου 2010).

➤ Οι πλευρικές μεταγγίσεις από τις Νεογενείς αποθέσεις των μεσο-θεςσαλικών λόφων στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, αποτελούν πηγή τροφοδοσίας περιορισμένης έκτασης (Παράγραφος 9.2.2).

➤ Στο βόρειο τμήμα της υπολεκάνης, η ανάπτυξη τοπικής επιλεκτικής και μάλλον ασθενούς υδροφορίας που αναπτύσσεται στο κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο (Panagoroulos 1995), τροφοδοτεί το υδατικό σύστημα μέσω πλευρικών μεταγγίσεων. Η υδροφορία αυτή, λόγω της φύσης των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, δεν πρέπει να αναπτύσσεται στο υγιές τμήμα του συμπαγούς πετρώματος, αλλά πιθανότατα σε ζώνες διάρρηξης, διάβρωσης ή και εξαλλοίωσης (Βρουχάκης κ.α. 2017), (Παράγραφοι 9.2.1, 9.2.2).

➤ Από τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων και όλα όσα ειπώθηκαν στο κεφάλαιο της ισοτοπικής υδρολογίας, προέκυψε τροφοδοσία της ευρύτερης περιοχής μελέτης, στα ανατολικά τουλάχιστον τμήματά της, από τους ανθρακικούς σχηματισμούς του ορεινού όγκου της Όσσας (Κεφάλαιο 11).

➤ Η κατείδυση από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα συνεισφέρει στην επαναπλήρωση του υπόγειου υδατικού δυναμικού (Παράγραφος 7.6 - υδατικό ισοζύγιο). Το ποσοστό κυμαίνεται από 5-15% ανάλογα με την εδαφική σύσταση, την τοπογραφική κλίση κ.α. (Panagoroulos et al. 2006, Κουκίδου 2010). Η επιφανειακή απορροή συνεισφέρει σε ένα μικρό ποσοστό στην τροφοδοσία, κυρίως κατά τις περιόδους έντονων βροχοπτώσεων.

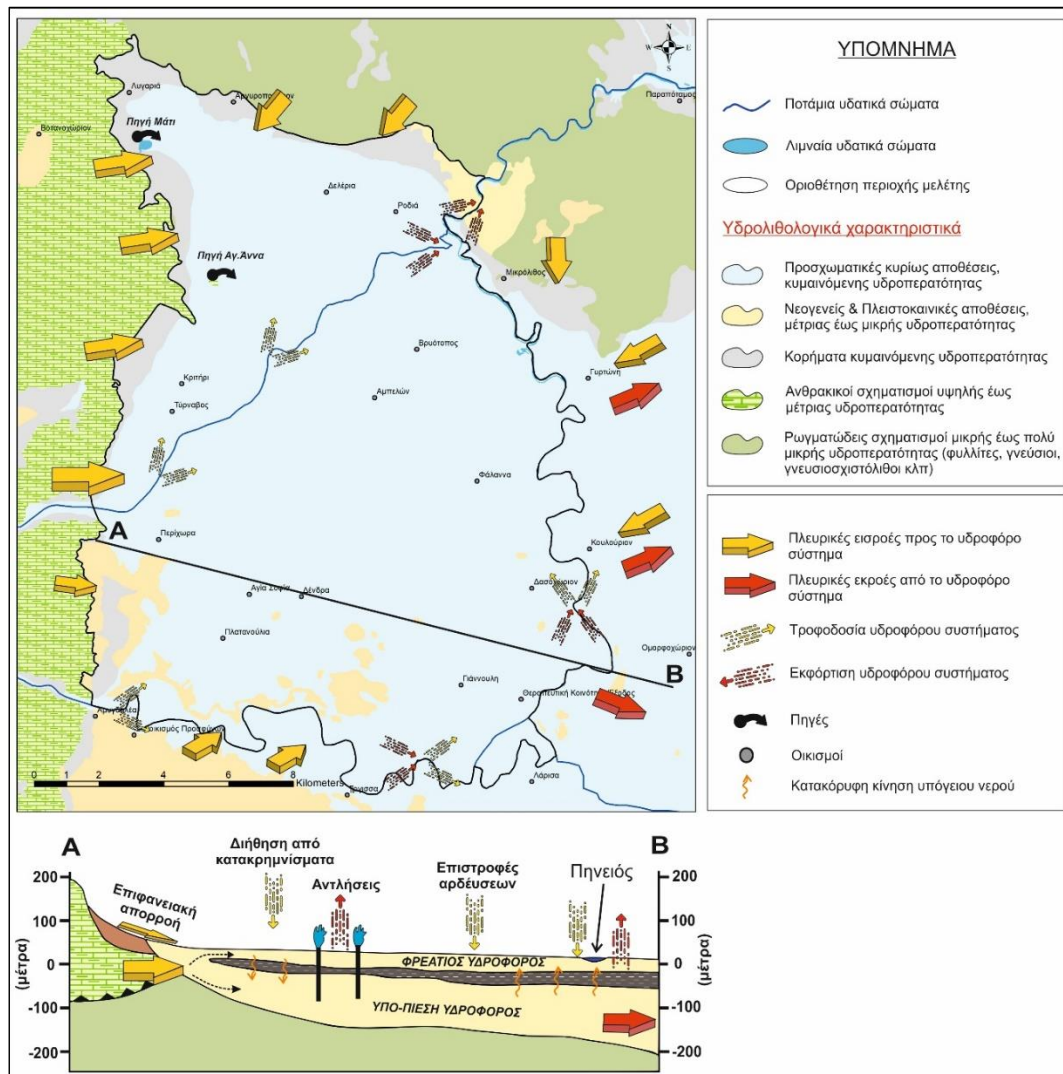
➤ Οι επιστροφές αρδεύσεων κατά την αρδευτική περίοδο συμβάλλουν στην τροφοδοσία του υδατικού συστήματος, επιβαρύνοντας όμως ταυτόχρονα την ποιότητα του υπόγειου νερού (Παράγραφος 7.6 - υδατικό ισοζύγιο).

ΕΚΡΟΕΣ

➤ Ο βασικότερος παράγοντας που συντελεί στην εκφόρτιση του υπόγειου υδατικού δυναμικού, είναι οι αντλήσεις που πραγματοποιούνται στην περιοχή μελέτης με σκοπό την κάλυψη αρδευτικών, υδρευτικών, κτηνοτροφικών και βιομηχανικών αναγκών (Παράγραφος 7.6 - υδατικό ισοζύγιο).

➤ Πλευρικές μεταγγίσεις από το υπόγειο υδατικό σύστημα προς την περιθωριακή λεκάνη στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής, μετά την έξοδο του Πηνειού από αυτήν. Ωστόσο, επειδή η γεωμετρία και η γεωλογία του συστήματος στην εν λόγω περιοχή είναι τέτοια που εμποδίζει τη ροή των υπόγειων υδάτων από την υπολεκάνη διαμέσου των σχηματισμών, η εκφόρτιση τους συστήματος σε αυτή την περιοχή διευκολύνεται από τους ποταμούς Πηνειό και Τιταρήσιο (Παράγραφος 7.6, Εικόνα 7.17).

➤ Πλευρικές μεταγγίσεις από το υπόγειο υδατικό σύστημα προς την επέκταση της υπολεκάνης προς τα ανατολικά (Παράγραφος 7.6, Εικόνα 7.17).



Εικόνα 13.2. Εννοιολογικό μοντέλο υπόγειας ροής (εισροές-εκροές) της περιοχής μελέτης.

Το στρώμα της αργίλου, το οποίο διαχωρίζει τις δύο αλλουβιακές υδροφορίες (φρεάτια και υπό πίεση), παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία και εξέλιξη του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Κι αυτό γιατί παρόλο που η υδραυλική αγωγιμότητα (η κατακόρυφη συνιστώσα της) του στρώματος αυτού είναι ιδιαίτερα μικρή, σε κλίμακα της περιοχής μελέτης, θεωρείται ότι παίζει ρυθμιστικό ρόλο στο σύστημα υπόγειας ροής και συνεπακόλουθα στην υδροχημική εξέλιξη της υπόγειας υδροφορίας. Η φορά της κατακόρυφης κίνησης εξαρτάται από το σχετικό υψόμετρο της πιεζομετρικής επιφάνειας του επιφανειακού και του βαθύτερου υδροφόρου. Από προηγούμενες μελέτες (Λουκάς κ.α. 2003) προκύπτει ότι, σε γενικές γραμμές, η κατακόρυφη κίνηση έχει φορά προς τα πάνω στα εσωτερικά τμήματα της υπολεκάνης, ενώ μεταβαίνοντας προς τα περιθώρια, προοδευτικά μεταβάλλεται προς τα κάτω (Εικόνα 13.2., Τομή ΑΒ). Ωστόσο, εξαιτίας της συνεχιζόμενης υπεράντλησης των υπόγειων υδατικών πόρων, όπως έχει ήδη ειπωθεί, ο φρεάτιος υδροφόρος τείνει να εξαντληθεί οπότε και η κατακόρυφη κίνηση, όπου υπάρχει,

τείνει να είναι παντού καθοδική (Παράγραφος 6.3.1). Κατ' αναλογία, λόγω της υπεράντλησης των υδατικών πόρων, η πιεζομετρική επιφάνεια του βαθέως υδροφόρου αναμένεται συχνά να βρίσκεται σε υψόμετρα μικρότερα της οροφής του αργιλικού στρώματος, με αποτέλεσμα τον μηδενισμό της κατακόρυφης συνιστώσας κίνησης.

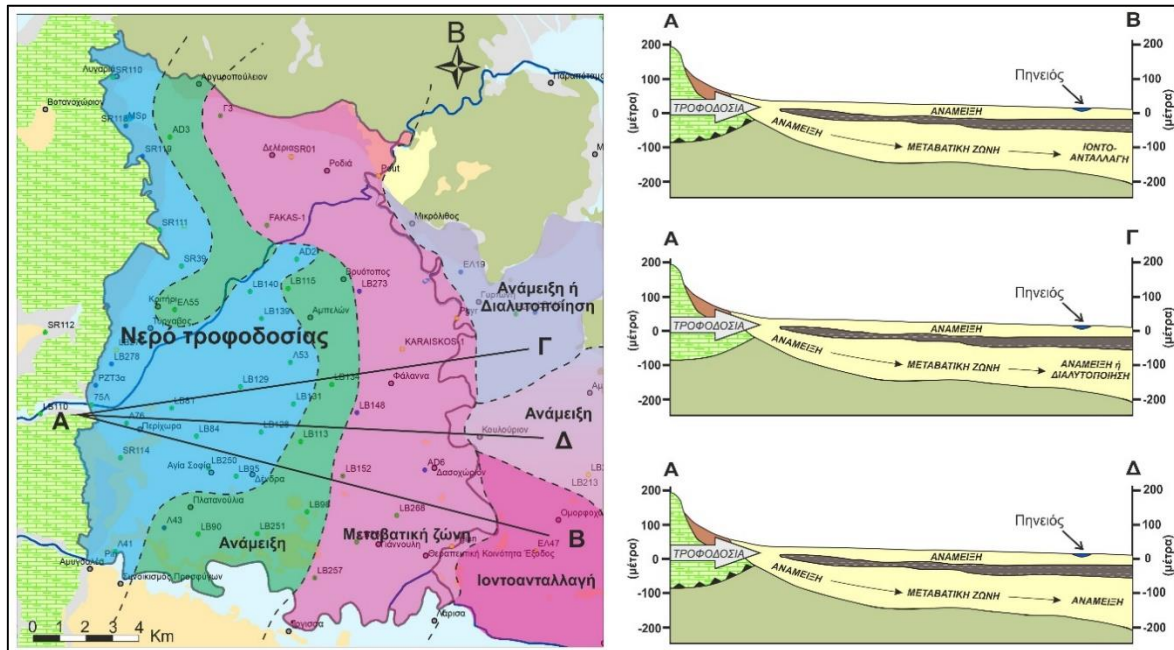
Αναφορικά με την υδροχημική εξέλιξη της περιοχής (Εικόνα 13.3), σύμφωνα και με όσα ειπώθηκαν στην παράγραφο της υδρογεωχημικής ανάλυσης (Παράγραφος 9.2), το φρέσκο νερό τροφοδοσίας από το καρστ του δυτικού περιθωρίου κινείται προς τα ανατολικά όπου και διαχωρίζεται προς τους δύο αλλουβιακούς υδροφόρους (φρεάτιο και βαθύτερο). Στον περιορισμένης δυναμικής φρεάτιο υδροφόρο αναμιγνύεται με το υπάρχον νερό επιφανειακής προέλευσης, ενώ κατά την κίνησή του στον υπό-πίεση υδροφόρο στα χαμηλότερα στρώματα συμβαίνουν οι εξής διαδικασίες:

i) όσο μεγαλώνει η απόσταση από το καρστ, περιορίζεται ο ρυθμός τροφοδοσίας του συστήματος, γεγονός που επιτρέπει την ανάμειξη νερού τροφοδοσίας με το νερό του υδατικού συστήματος. Ακολουθεί μια μεταβατική ζώνη, όπου το υπόγειο νερό παραμένει περισσότερο χρόνο στον υδροφόρο, καταλήγοντας στη συνέχεια στη περιοχή όπου το φαινόμενο της ιοντοανταλλαγής βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη (Εικόνα 13.3., τομή ΑΒ). Χωρικά η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στη νοτιοανατολική επέκταση της υπολεκάνης.

ii) κατά τον ίδιο τρόπο το νερό τροφοδοσίας αμέσως μετά τη μετάβαση από ζώνες έντονης τροφοδοσίας στη ζώνη περιορισμένης τροφοδοσίας και μεγαλύτερου χρόνου παραμονής, εισέρχεται σε μια ζώνη όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα διαλυτοποίησης ή εκ νέου ανάμειξης (Εικόνα 13.3., τομή ΑΓ), με νερό διαφορετικής σύστασης από αυτό της αρχικής ανάμειξης. Χωρικά αυτό συμβαίνει στην επέκταση του κεντρικού τμήματος της υπολεκάνης.

iii) στην περίπτωση αυτή το νερό τροφοδοσίας αμέσως μετά τη μεταβατική ζώνη εισέρχεται σε μια περιοχή όπου λαμβάνουν χώρα εκ νέου φαινόμενα ανάμειξης (Εικόνα 13.3., τομή ΑΔ), με νερό και σε αυτή τη περίπτωση, διαφορετικής σύστασης από αυτό της αρχικής ανάμειξης. Χωρικά αυτό συμβαίνει στην επέκταση της υπολεκάνης προς τα ανατολικά και μεταξύ των δύο προηγούμενων περιοχών.

Και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις το νερό της τελικής ανάμειξης, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στο κεφάλαιο της ισοτοπικής υδρολογίας, προφανώς προέρχεται κυρίως από τα ανθρακικά πετρώματα του ορεινού όγκου της Όσσας, όπου με τη βοήθεια της ρηξιγενούς τεκτονικής και της αντικλινικής δομής της Όσσας, ένα μέρος των υπόγειων νερών κινείται προς την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 13.3. Ενωσιολογικό μοντέλο υδροχημικής εξέλιξης της περιοχής μελέτης.

13.4.3 Ο ΚΩΔΙΚΑΣ MODFLOW – ΕΞΙΣΩΣΗ ΡΟΗΣ

Η περιοχή έρευνας καλύπτεται στο σύνολό της από Τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις, αποτελούμενες από υλικά ποταμοχερσαίας ή/και ποταμολιμναίας προέλευσης. Η δομή αυτή προκρίνει την επιλογή ενός μαθηματικού κώδικα, ο οποίος να έχει καλή εφαρμογή σε πορώδη μέσα, να στηρίζεται στο νόμο του Darcy και να επιλύει της εξίσωση της συνέχειας στα υπόγεια ύδατα. Ως εκ τούτου, για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης του υπόγειου υδατικού συστήματος Τυρνάβου, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988), το οποίο αναπτύχθηκε από την Αμερικάνικη Υπηρεσία Γεωλογικής Επισκόπησης (USGS).

Ο κώδικας MODFLOW χρησιμοποιείται κατά κόρον, από πολλούς ερευνητές, για την διερεύνηση και επίλυση προβλημάτων σχετικών με τη ροή των υπόγειων υδάτων στην κορεσμένη ζώνη πορώδους μέσου. Το υπό μελέτη υδρογεωλογικό σύστημα προσομοιώνεται με ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων, με βάση τις οποίες αναπαριστώνται τόσο η ροή όσο και τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Ο συγκεκριμένος κώδικας βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, συνδυάζοντας ουσιαστικά την εξίσωση ροής του Darcy με την εξίσωση της συνέχειας. Χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων μόνιμης (steady state) ή μη μόνιμης ροής (transient state) σε δύο ή και τρεις διαστάσεις, όπου το συνεχές σύστημα αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων τόσο ως προς το χώρο, όσο και ως προς το χρόνο (Τζιμόπουλος & Μπαλλάς 2005). Τα βασικά χαρακτηριστικά του κώδικα MODFLOW αναφέρονται παρακάτω:

- σε κάθε μεμονωμένο κελί εφαρμόζεται η αρχή των πεπερασμένων διαφορών,
- ροή δύναται να υπάρχει μόνο εντός των καθορισμένων ορίων του μοντέλου,
- το μέσο, το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί, δύναται να είναι ανομοιογενές και ανισότροπο,
- το σύστημα ροής δύναται να έχει ακανόνιστο σχήμα και να περικλείει συνδυασμούς υδροφόρων (ελεύθερους, υπό πίεση, μερικώς υπό πίεση, αρτεσιανούς).

Εκτός των παραπάνω χαρακτηριστικών λειτουργίας, ο κώδικας MODFLOW στηρίζεται και σε ορισμένες παραδοχές, βασικότερες των οποίων είναι οι εξής:

- η πυκνότητα του υπόγειου ύδατος θεωρείται αμετάβλητη,
- η κίνηση του υπόγειου ύδατος πραγματοποιείται σε τρεις ορθογωνικές διαστάσεις (x, y, z),
- για κάθε κελί, οι ιδιότητές του κατανέμονται ομοιόμορφα και ομοιογενώς.

Αναφορικά με την διακριτοποίηση του προσομοιωμένου χώρου, το MODFLOW χρησιμοποιεί τη μορφή πλέγματος, αποτελούμενη από στοιχειώδη τρισδιάστατα κελιά ορθογωνικής διατομής, η θέση των οποίων καθορίζεται με τη μορφή γραμμών, στηλών και στρωμάτων.

Η τρισδιάστατη κίνηση υπόγειου ύδατος σταθερής πυκνότητας, υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής διαμέσου ενός ετερογενούς και ανισότροπου πορώδους μέσου, περιγράφεται από τη διαφορική Εξίσωση 13.1 (Anderson & Woessner 1992):

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W \quad (13.1)$$

όπου:

T_{xx} , T_{yy} και T_{zz} : οι τιμές της μεταβιβαστικότητας κατά μήκος των x, y και z αξόνων συντεταγμένων (L^2t^{-1})

h : το υδραυλικό φορτίο (L)

W : είναι η ογκομετρική ροή ανά μονάδα χρόνου και αναπαριστά εισροές ή/και εκροές του νερού (t^{-1})

S_s : ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου (L^{-1})

t : ο χρόνος (t)

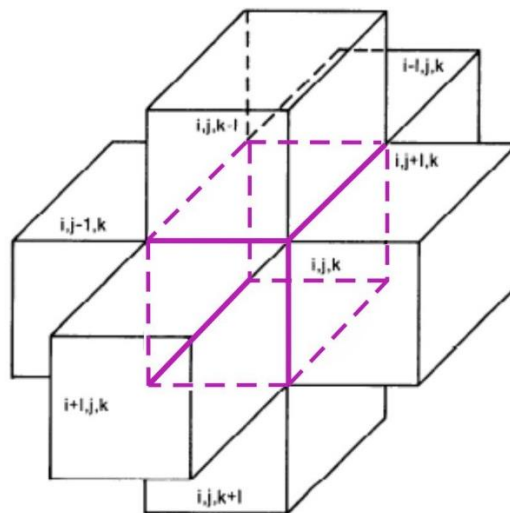
Στη γενική περίπτωση, η ειδική αποθηκευτικότητα και η υδραυλική αγωγιμότητα είναι συναρτήσεις του χώρου ($S_s = S_s(x,y,z)$, $T_{xx} = T_{xx}(x,y,z)$, $T_{yy} = T_{yy}(x,y,z)$, $T_{zz} = T_{zz}(x,y,z)$), ενώ η παροχή ανά μονάδα όγκου είναι συνάρτηση τόσο του χώρου όσο και του χρόνου ($W = W(x,y,z,t)$). Η Εξίσωση 13.1 περιγράφει, όπως ειπώθηκε, την μη μόνιμη υπόγεια ροή σε ετερογενές και ανισότροπο μέσο, με την παραδοχή ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας συμπίπτουν με το γενικό σύστημα συντεταγμένων.

Η παραπάνω εξίσωση σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών της πιεζομετρικής στάθμης και των οριακών συνθηκών, αποτελεί τη μαθηματική αναπαράσταση της ροής του υπόγειου νερού στο υδρογεωλογικό σύστημα.

Η επίλυση της εξίσωσης σε αναλυτική μορφή είναι μια αλγεβρική έκφραση, η οποία δίνει τη χωροχρονική μεταβολή του υδραυλικού φορτίου $h(x,y,z,t)$, έτσι ώστε όταν αντικατασταθούν οι παράγωγοι του h σε σχέση με το χώρο και το χρόνο σε αυτή, τότε οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες ικανοποιούνται (McDonald & Harbaugh 1988). Η χωροχρονική μεταβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση των ροών, ενώ παράλληλα χαρακτηρίζει και το πεδίο ροής.

13.4.2.1 Αριθμητική προσέγγιση του μαθηματικού μοντέλου

Η αριθμητική προσέγγιση της εξίσωσης (13.1) με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών περιγράφεται αναλυτικά από τους McDonald και Harbaugh (1988). Στη συνέχεια περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά της. Στην Εικόνα 13.4 παρουσιάζεται ένα τυχαίο κελί (i,j,k) του τρισδιάστατου πλέγματος των πεπερασμένων διαφορών μαζί με τα γειτονικά του κελιά. Σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας, το άθροισμα των εισροών και των εκροών στο κελί (i,j,k) ισούται με τη μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού στο κελί αυτό.



Εικόνα 13.4. Τρισδιάστατη απεικόνιση κανάβου προσομοίωσης με το κεντρικό κελί και τα γειτονικά του (McDonald & Harbaugh 1988, Harbaugh et al. 2000).

Το ισοζύγιο εισροών-εκροών στο κελί (i,j,k) , με δεδομένη τη σταθερή πυκνότητα του υπόγειου νερού, περιγράφεται από την Εξίσωση 13.2 (Essink 2000):

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Delta V \quad (13.2)$$

όπου:

S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου (L^{-1})

Q_i : ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κελί (L^3T^{-1})

V : ο όγκος του συγκεκριμένου κελιού (L^3)

$\Delta\Phi$: η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου σε χρονικό διάστημα Δt

Σύμφωνα με το νόμο του Darcy, η εισροή νερού κατά μήκος της διεύθυνσης της γραμμής i στο κελί (i,j,k) από το κελί $(i,j-1,k)$, παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.5 και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

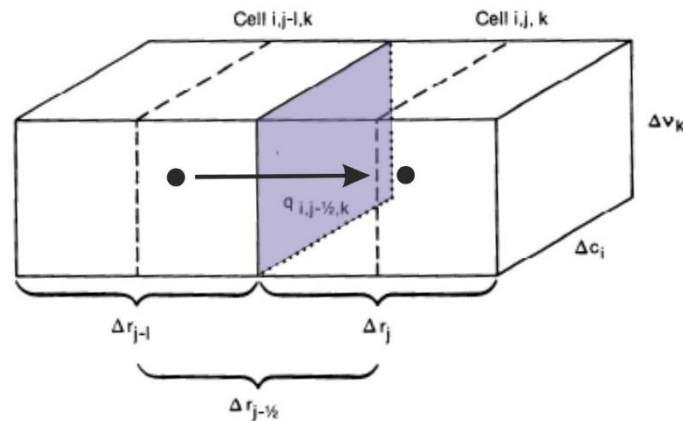
$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (13.3)$$

όπου:

KR_i : η υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος της γραμμής R_i μεταξύ των κόμβων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$

$\Delta c_i \Delta v_i$: η επιφάνεια διατομής μεταξύ των κελιών

Δr : η απόσταση μεταξύ των κελιών (i,j,k) και $(i,j-1,k)$



Εικόνα 13.5. Ροή νερού μεταξύ δύο διαδοχικών κελιών του πλέγματος (McDonald & Harbaugh 1988, Harbaugh et al. 2000).

Αντίστοιχα, η ροή κατά την ίδια διεύθυνση της γραμμής R_i μεταξύ των κελιών (i,j,k) και $(i,j+1,k)$, περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (13.4)$$

Κατά παρόμοιο τρόπο, αντίστοιχες εξισώσεις περιγράφουν τη ροή μεταξύ των υπόλοιπων πλευρών του κελιού (i,j,k) , οι οποίες απλουστεύονται αν συνδυαστούν οι διαστάσεις του κελιού με την υδραυλική αγωγιμότητα, προκύπτοντας έτσι μια σταθερά που ονομάζεται «αγωγιμότητα» (conductance). Η αγωγιμότητα συμβολίζεται με CR , CC , CV κατά τη

διεύθυνση της γραμμής, της στήλης και του στρώματος αντίστοιχα και σύμφωνα με την Εικόνα 13.5 ισούται με:

$$CR_{i,j+1/2,k} = K_{i,j+1/2,k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (13.5)$$

Οι εξωτερικές εισροές στο κελί (i,j,k) περιγράφονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k,n} + q_{i,j,k,n} \quad (13.6)$$

όπου:

$a_{i,j,k,n}$: η ροή από τη n-οστή εξωτερική πηγή στο κελί (i,j,k) και

$p_{i,j,k,n}, q_{i,j,k,n}$: σταθερές

Για N εξωτερικές πηγές, η συνολική ροή στο κελί (i,j,k) θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$QT_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = h_{i,j,k} \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (13.7)$$

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση 10.2 τη Σχέση 10.7, προκύπτει ότι:

$$CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = \frac{Ss_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \quad (13.8)$$

λαμβάνοντας υπόψη και τη Σχέση 13.5.

Η προσέγγιση της παραγώγου του χρόνου $\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ με πεπερασμένες διαφορές, εκφράζεται ως διαφορά του υδραυλικού φορτίου σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές t_x και t_{x-1} ως εξής:

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)_x = \frac{h_{i,j,k}^x - h_{i,j,k}^{x-1}}{t_x - t_{x-1}} \quad (13.9)$$

Από την Εξίσωση 13.9, προκύπτει ότι η παράγωγος του υδραυλικού φορτίου ισούται με την μεταβολή του στον κόμβο i,j,k στο διάστημα που προηγήθηκε ($t_x - t_{x-1}$) και τελειώνει τη χρονική στιγμή (t_x) κατά την οποία υπολογίζεται το φορτίο. Για το λόγο αυτό, η προσέγγιση αυτή ονομάζεται «οπισθοδρομούσες διαφορές» (backward differences). Αντίστοιχα, όταν η παράγωγος της Εξίσωσης 13.9 προσεγγίζεται μεταξύ των χρονικών βημάτων (t_x) και (t_{x+1}), έχουμε τις «προς τα εμπρός διαφορές» (forward differences), ενώ όταν προσεγγίζεται μεταξύ των χρονικών βημάτων (t_{x-1}) και (t_{x+1}) έχουμε τις κεντρικές διαφορές (Wang and Anderson 1982).

Η Εξίσωση 13.9, εφόσον αναπτυχθεί κατά τις «οπισθοδρομούσες διαφορές», οδηγεί σε μία εξίσωση όπου οι άγνωστοι όροι είναι οι επτά τιμές του υδραυλικού φορτίου κατά το χρονικό βήμα (x). Με βάση το γεγονός ότι, η εξίσωση αυτή δεν μπορεί να λυθεί ανεξάρτητα, καθώς εμπεριέχει επτά αγνώστους, οι n εξισώσεις που σχηματίζονται για κάθε

έναν από τους n κόμβους, οδηγούν τελικά στη δημιουργία ενός συστήματος $n-1$ εξισώσεων με n αγνώστους (Πισινάρας 2008). Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων επιλύεται με επαναληπτικές μεθόδους και ο κώδικας MODFLOW δίνει τις παρακάτω επιλογές:

- Η υπό προϋποθέσεις μέθοδος συζυγών κλίσεων (Preconditioned Conjugate-Gradient Package – **PCG**).
- Η ισχυρά πεπλεγμένη μέθοδος (Strongly Implicit Procedure Package – **SIP**).
- Η μέθοδος των τμηματικά διαδοχικών υπερχαλαρώσεων (Slice-Successive Overrelaxation Package – **SOR**).
- Η μέθοδος συζυγών κλίσεων σταθεροποιημένης επιτάχυνσης (WHS solver for Visual MODFLOW - **WHS**).
- Η επίλυση αλγεβρικών πολυπλεγματικών μεθόδων για συστήματα (Algebraic Multigrid Methods for Systems and Algebraic Multigrid Solver – **AMG**).
- Η επίλυση γεωμετρικών πολυπλεγματικών μεθόδων (Geometric Multigrid Solver – **GMG**).

Η μέθοδος WHS, αποτελεί πρόσθετη μέθοδο στην έκδοση Visual MODFLOW, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Για τις παραπάνω μεθόδους υπάρχουν αναλυτικές μαθηματικές περιγραφές και συγκρίσεις από διάφορους ερευνητές. Ο Hill (1990a) επισημαίνει τις σημαντικότερες διαφορές αναφορικά με την αποτελεσματικότητα των επαναληπτικών μεθόδων σε τρισδιάστατα μη γραμμικά προβλήματα, όπου προτείνεται εναλλακτικά η χρήση περισσότερων της μία μεθόδων. Οι Osiensky & Williams (1997) έλεγξαν τις μεθόδους SIP, SOR, PCG για αδυναμίες που παρουσιάζουν στην ακρίβεια των υπολογισμών και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος SOR παρουσιάζει αρκετούς επισφαλείς υπολογισμούς.

13.4.2.2 Βασικά πακέτα λογισμικού του κώδικα MODFLOW

Ο κώδικας MODFLOW χρησιμοποιεί ένα σύνολο υπό-προγραμμάτων (πακέτων) έτσι ώστε αυτά να εκτελέσουν διάφορες εντολές (διεργασίες) για τις ανάγκες της προσομοίωσης. Στη συνέχεια αναφέρονται τα πιο σημαντικά και τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πακέτα που εμπεριέχονται στον κώδικα MODFLOW:

1. Basic Package (BAS): Το πακέτο αυτό είναι το βασικό του μοντέλου και αποτελεί συνδετικό κρίκο μεταξύ των υπόλοιπων χρησιμοποιούμενων υπό-προγραμμάτων. Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών, ο υπολογισμός της διάρκειας των χρονικών βημάτων και η εμφάνιση των αποτελεσμάτων είναι κάποιες από τις εργασίες που εκτελεί. Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες που αφορούν (Βουδούρης 2004, Καραπιλάφης 2008):

- α) τον αριθμό των γραμμών και των στηλών του πλέγματος,
- β) τον αριθμό των στρωμάτων,

- γ) τη χρονική περίοδο προσομοίωσης και το βήμα κάθε περιόδου,
- δ) τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης,
- ε) τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του πλέγματος.

2. Block-Centered Flow Package (BCF): Το βοηθητικό αυτό πρόγραμμα υπολογίζει τους όρους των αλγεβρικών εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη ροή εντός του πορώδους μέσου. Συγκεκριμένα, υπολογίζει τη ροή από κελί σε κελί καθώς και τη ροή που αποθηκεύεται. Εδώ εισάγονται πληροφορίες που αφορούν:

- α) τον τύπο του υδροφόρου,
- β) τις συνθήκες ροής (μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση ροής),
- γ) τις διαστάσεις των κελιών,
- δ) την υδραυλική αγωγιμότητα και τη μεταβιβαστικότητα,
- ε) το συντελεστή εναποθήκευσης ή το ενεργό πορώδες.

3. Well Package (WEL): Με το πακέτο αυτό εισάγονται στις αλγεβρικές εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών οι όροι εκείνοι, που αντιπροσωπεύουν τη ροή μέσα από γεωτρήσεις. Θετικές τιμές παροχής υποδηλώνουν τροφοδοσία του συστήματος ενώ αρνητικές τιμές, άντληση του συστήματος μέσω των γεωτρήσεων.

4. Recharge Package (RCH): Το πακέτο αυτό προσομοιώνει την επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδατικό σύστημα. Τα δεδομένα του εμπλουτισμού εισάγονται μόνο στο ανώτερο ή στο ανώτερο ενεργό στρώμα του μοντέλου και αφορούν είτε την απευθείας κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις.

5. River Package (RIV): Προσθέτει στις αλγεβρικές εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών τους όρους εκείνους, που αντιπροσωπεύουν τη ροή σε ποταμούς, χειμάρρους και λίμνες. Σε κάθε κελί, στο οποίο εμπεριέχεται όριο ποταμού (ή χειμάρρου ή λίμνης) απαιτούνται από το πρόγραμμα τα εξής δεδομένα:

- α) το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του ποταμού (River stage),
- β) το απόλυτο υψόμετρο του πυθμένα του ποταμού (River bottom),
- γ) την αγωγιμότητα (Conductance).

6. Drain Package (DRN): Το συγκεκριμένο πακέτο προσομοιώνει τη ροή μέσα σε τάφρους αποστράγγισης.

7. Evapotranspiration: Προσομοιώνει τα αποτελέσματα της εξατμισοδιαπνοής απευθείας από την κορεσμένη ζώνη (αφορά περιπτώσεις πολύ ρηχής φρεάτιας υδροφορίας).

8. General Head Boundary (GHB): Στο πακέτο αυτό εισάγονται στις αλγεβρικές εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών οι όροι εκείνοι, που αντιπροσωπεύουν την υπόγεια υδραυλική επικοινωνία μεταξύ πορωδών μέσων. Προσομοιώνονται ουσιαστικά οι πλευρικές τροφοδοσίες από και προς μια εξωτερική πηγή. Η τροφοδοσία αυτή είναι ανάλογη με τη

διαφορά του υδραυλικού φορτίου ανάμεσα στην πηγή αυτή και το κελί της περιοχής προσομοίωσης και εξαρτάται επίσης από την αγωγιμότητα (C). Σε κάθε κελί, στο οποίο ορίζονται συνθήκες (GHB) απαιτούνται από το πρόγραμμα τα εξής δεδομένα:

- α) την τιμή υδραυλικού φορτίου στον εξωτερικό χώρο του μοντέλου και σε θεωρητική απόσταση τέτοια που δεν επηρεάζει το δίκτυο ροής εντός του μοντέλου, ,
- β) την αγωγιμότητα, η οποία αντιπροσωπεύει την αντίσταση της ροής ανάμεσα στο (GHB) και το υπόγειο νερό της περιοχής προσομοίωσης.

9. Solver Package: Είναι το πακέτο το οποίο επιλύει το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών.

Η αναγνώριση και η ευρεία χρήση του κώδικα MODFLOW, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των εφαρμογών, δημιούργησε την ανάγκη για πακέτα λογισμικού τα οποία παρέχουν διαδραστική επεξεργασία των δεδομένων εισόδου και εξόδου. Τα πακέτα αυτά παρέχουν στον χρήστη τη δυνατότητα εισαγωγής αρχείων GIS, δυνατότητα στατιστικής και γεωστατιστικής επεξεργασίας και πληθώρα άλλων δυνατοτήτων, οι οποίες κάνουν πιο απλή και πιο γρήγορη τη διαδικασία της προσομοίωσης (Πισινάρας 2008). Τέτοια πακέτα λογισμικού είναι το Groundwater Modeling System (GMS), το Groundwater Vistas, το Argus One και το Visual MODFLOW. Το τελευταίο, στην έκδοση 4.6, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του υδρογεωλογικού συστήματος της περιοχής έρευνας.

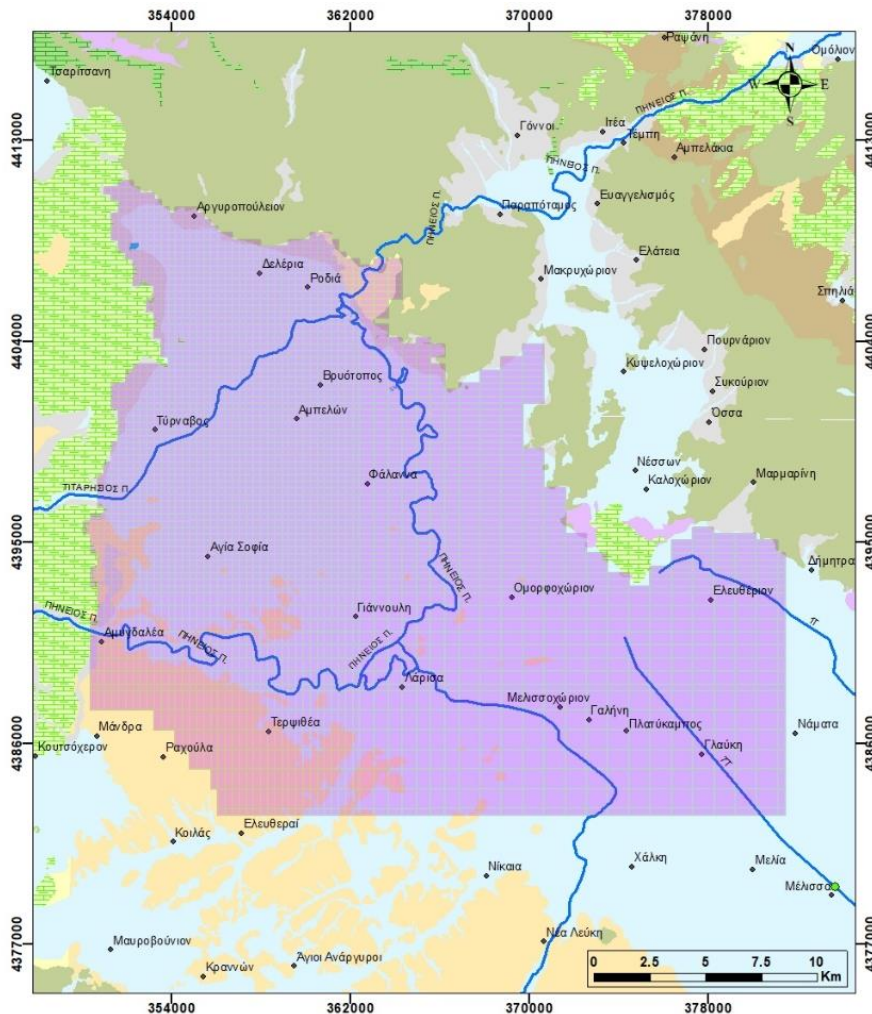
13.4.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

13.4.4.1 Διακριτοποίηση της περιοχής έρευνας

Σε ένα αριθμητικό μοντέλο, κατά το πρώτο στάδιο, δημιουργείται ένας διακριτοποιημένος τομέας, ο οποίος αποτελείται από μια σειρά κόμβων και συνδεδεμένα με αυτούς τεμάχια πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων (Anderson et al. 2015). Το κομβικό αυτό πλέγμα αποτελεί το πλαίσιο του αριθμητικού μοντέλου και ο σχεδιασμός του καθορίζει τις λεπτομέρειες που απαιτούνται από τις ανάγκες της προσομοίωσης. Ο σχεδιασμός του πλέγματος στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών προσφέρει σχετική ευκολία στη χρήση και στη διαμόρφωση του μοντέλου και συνεπώς ευκολία και στη λύση του υπό μελέτη προβλήματος. Παράλληλα με τη χρήση της μεθόδου αυτής, δεν απαιτούνται υπολογιστικά συστήματα υπερβολικών απαιτήσεων και ως εκ τούτου η προσομοίωση μπορεί να λάβει χώρα σε έναν συνηθισμένο ισχυρό προσωπικό υπολογιστή.

Οι διαστάσεις των μεμονωμένων κελιών του πλέγματος καθορίζουν και την ακρίβεια της αναπαράστασης του πεδίου ροής. Τα μεγαλύτερα κελιά απαιτούν λιγότερα δεδομένα καλύπτοντας ευρύτερες περιοχές του πλέγματος, ωστόσο η ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι χαμηλή. Απεναντίας, τα κελιά μικρότερων διαστάσεων οδηγούν σε ακριβέστερη αναπαράσταση των συνθηκών ροής, αλλά τα δεδομένα και συνεπώς η επιφόρτιση του

υπολογιστικού συστήματος είναι μεγαλύτερη. Σύμφωνα με το γενικό κανόνα, έτσι και στην περίπτωση της παρούσας άσκησης, τα κελιά μικρότερων διαστάσεων σχεδιάστηκαν στην κύρια περιοχή ενδιαφέροντος, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κελιά μεγαλύτερων διαστάσεων (Εικόνα 13.6). Το πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας προσομοίωσης αποτελείται από 3268 ορθογωνικά κελιά καταμερισμένα σε 63 στήλες και 81 σειρές και η συνολική επιφάνεια που καλύπτουν τα κελιά αυτά ανέρχεται σε 580.5 km².



Εικόνα 13.6. Το πλέγμα διακριτοποίησης της ευρύτερης περιοχής έρευνας.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.6, στο δυτικό και κεντρικό τμήμα της κύριας περιοχής έρευνας, οι διαστάσεις των κελιών είναι μικρότερες σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα του πλέγματος, γεγονός που υποδηλώνει, σύμφωνα με τα παραπάνω, τη σημασία των περιοχών αυτών καθώς:

- Ο κώνος του Τιταρήσιου και το καρστικό σύστημα στο δυτικό περιθώριο της υπολεκάνης του Τυρνάβου έχουν σημαντικό ρόλο στην τροφοδοσία του συστήματος. Ως

εκ τούτου ο βασικός έλεγχος της ροής του συστήματος, ασκείται από την υδρογεωλογική δομή του χώρου και την υδροδυναμική λειτουργία αναπτυσσόμενων υδροφοριών.

- Υπάρχει σημαντική διαφορά των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας του δυτικού και του κεντρικού τμήματος της περιοχής έρευνας σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα, όπως προέκυψε από παλαιότερες αναλύσεις δοκιμών άντλησης και όπως αναμενόταν λόγω της λιθολογίας της υπολεκάνης. Τέτοιες αντιθέσεις έχουν ως αποτέλεσμα αριθμητικές αστάθειες στην επίλυση ενός μοντέλου, οι οποίες μπορούν να αποφευχθούν με ένα πυκνότερο σχεδιασμό του πλέγματος (Anderson et al. 2015).
- Ο μεγαλύτερος αριθμός παραγωγικών γεωτρήσεων βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας. Οι πιέσεις που ασκήθηκαν στο μοντέλο ως αποτέλεσμα των αντλήσεων από τις γεωτρήσεις αυτές, αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά το σύστημα ροής στο τμήμα αυτό της περιοχής.
- Στόχο των προγνωστικών προσομοιώσεων αποτελεί η εξέταση της βιωσιμότητας των υπογείων υδατικών πόρων κάτω από διάφορα σενάρια εκμετάλλευσης. Το κριτήριο αξιολόγησης που υιοθετήθηκε ήταν η βιωσιμότητα των υφιστάμενων γεωτρήσεων παραγωγής σε κάθε ένα από τα εναλλακτικά σχέδια διαχείρισης των υπόγειων υδάτων. Ως εκ τούτου, απαιτείται λεπτομερέστερη αναπαράσταση των υφιστάμενων περιοχών εκμετάλλευσης σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα της περιοχής προσομοίωσης.

Σημειώνεται επίσης ότι η περιοχή προσομοίωσης, όπως αυτή φαίνεται από την Εικόνα 13.6, καλύπτει διπλάσια έκταση από την κύρια περιοχή έρευνας, όπως αυτή ορίσθηκε στα πρώτα κεφάλαια της διατριβής. Δύο είναι οι λόγοι της επέκτασης αυτής προς τα ανατολικά και αναφέρονται παρακάτω:

1) Από τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων σε σχέση τόσο με την τεκτονική δομή της Όσας αλλά και την ποιοτική σύσταση των υπόγειων υδάτων της περιοχής αυτής, προέκυψε πιθανή τροφοδοσία της κύριας περιοχής έρευνας από το καρστικό τμήμα της Όσας, όπως αναλυτικά αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο της ισοτοπικής υδρογεωλογίας. Ως εκ τούτου η προέκταση της περιοχής έρευνας προς τα ανατολικά για τις ανάγκες της προσομοίωσης, θεωρήθηκε σκόπιμη έτσι ώστε να συμπεριληφθούν και τα τμήματα εκείνα των εισροών από τα ανατολικά.

2) Προκειμένου να αποφευχθούν πιθανές επιδράσεις, σε μεγάλα τμήματα της κύριας περιοχής έρευνας λόγω της μικρής απόστασης των περιοχών αυτών, από τις καθοριζόμενες οριακές συνθήκες. Η ανατολική επέκταση της περιοχής προσομοίωσης, θεωρήθηκε αποδεκτή λύση έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση στο σύστημα ροής της κύριας περιοχής από τις οριακές αυτές συνθήκες.

Αναφορικά με την κατακόρυφη διακριτοποίηση του πλέγματος, σύμφωνα και με το εννοιολογικό μοντέλο, όπως αυτό αποδίδεται στην Εικόνα 13.2, έχει ως εξής:

ο φρεάτιος υδροφόρος αντιπροσωπεύεται από το στρώμα (Layer) 1 στο μοντέλο προσομοίωσης. Το στρώμα αυτό δηλώνεται ως ελεύθερος υδροφόρος και κάθε κελί του στρώματος αυτού περιγράφεται από τις τρεις συνιστώσες τις υδραυλικής αγωγιμότητας

K_x , K_y , K_z , το υψόμετρο του πυθμένα του στρώματος, την τιμή της διαρροής (leakance) μεταξύ των επάλληλων στρωμάτων, την ειδική απόδοση (συντελεστής ειδικής εναποθηκευτικής ικανότητας) και τις οριακές συνθήκες, όπως αυτές θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Ο βαθύτερος υδροφόρος αντιπροσωπεύεται από το στρώμα (Layer) 2 στο μοντέλο προσομοίωσης και δηλώνεται ως στρώμα μεταβαλλόμενης κατάστασης. Αυτό σημαίνει ότι αντιμετωπίζεται από το λογισμικό, ως υπό-πίεση υδροφόρος, όταν η στάθμη του υπόγειου ύδατος βρίσκεται πάνω από την οροφή του στρώματος αυτού και ως ελεύθερος υδροφόρος, όταν η στάθμη υποχωρεί κάτω από την οροφή του στρώματος. Η μεταβιβαστικότητα σε κάθε μεμονωμένο κελί υπολογίζεται από την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας που εισάγεται και το υπολογιζόμενο κορεσμένο πάχος του υδροφόρου ($T=K*b$ m²/s). Κάθε κελί του στρώματος αυτού περιγράφεται από τις τρεις συνιστώσες τις υδραυλικής αγωγιμότητας K_x , K_y , K_z , το υψόμετρο της οροφής και του πυθμένα του στρώματος και τις οριακές συνθήκες. Επίσης, σε κάθε κελί αποδίδονται δύο (2) τιμές αποθηκευτικότητας: η τιμή της ειδικής απόδοσης (S_y), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην περίπτωση που επικρατούν συνθήκες ελεύθερης υδροφορίας και η τιμή της ειδικής υδροχωρητικότητας (S_s), στην περίπτωση που επικρατούν συνθήκες υπό πίεση υδροφορίας.

Το στρώμα της αργίλου, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο υδροφόρων, αντιπροσωπεύεται στην προσομοίωση από μία αδιάστατη επιφάνεια διεπαφής μεταξύ του στρώματος 1 και 2. Κάθε κελί της επιφάνειας αυτής περιγράφεται από μια τιμή κατακόρυφης διαρροής L , που ορίζεται από τη σχέση $L = \frac{K'_z}{b'}$, όπου K'_z η κατακόρυφη συνιστώσα της υδραυλικής αγωγιμότητας και b' το πάχος της αντιστατικής επιφάνειας. Η τιμή της διαρροής αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της υδραυλικής αντίστασης και τις κυμάνσεις του πάχους του στρώματος της αργίλου. Σημειώνεται ότι σε παλαιότερες εκδόσεις του λογισμικού MODFLOW, απαιτούνταν η εισαγωγή της τιμής της κατακόρυφης αγωγιμότητας (VCONT) (ή κατακόρυφη διαρροή, Vertical Leakance) μεταξύ δύο στρωμάτων. Στην έκδοση του Virtual MODFLOW γίνεται η εισαγωγή της κατακόρυφης υδραυλικής αγωγιμότητας (K_z) για κάθε κελί κάθε στρώματος και στην συνέχεια υπολογίζεται αυτόματα η τιμή της κατακόρυφης διαρροής.

13.4.4.2 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες αποτελούν βασικό κομμάτι ενός μοντέλου ροής υπόγειων υδάτων. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, οριακή συνθήκη ονομάζεται η μαθηματική έκφραση της κατάστασης του φυσικού συστήματος, που περιορίζει τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου στο χώρο (ASTM D5609-94). Ο κατάλληλος καθορισμός των οριακών συνθηκών αποτελεί πολύ κρίσιμο παράγοντα για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις. Στη συνέχεια αναφέρονται οι διάφοροι τύποι

οριακών συνθηκών με τις αρχές και τους περιορισμούς που τους διέπουν κατά την εφαρμογή τους σε ένα μοντέλο προσομοίωσης.

- *Οριακή συνθήκη καθορισμένου φορτίου (ή συνθήκη Dirichlet).* Στην οριακή αυτή συνθήκη το δυναμικό των υπόγειων υδάτων έχει καθορισμένη τιμή στο συγκεκριμένο κελί γεγονός που συνεπάγεται μια άπειρη πηγή τροφοδοσίας. Για τον λόγο αυτό η συνθήκη αυτή πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγάλη προσοχή, καθώς μπορεί να επιφέρει μεγάλα σφάλματα στο υδατικό ισοζύγιο του μοντέλου. Τα καθορισμένα φορτία αντιπροσωπεύουν ιδανικά την περίπτωση διεπαφής ενός μοντέλου με τη θάλασσα ή με μια μεγάλη λίμνη (Anderson et al. 2015). Στο Visual MODFLOW η οριακή συνθήκη αυτού του τύπου προσομοιώνεται με το πακέτο “Constand Head (CHD)”.
- *Οριακή συνθήκη καθορισμένης ροής (ή συνθήκη Neumann).* Στην περίπτωση αυτή, η ροή που εισέρχεται ή εξέρχεται στον υδροφόρο από ένα συγκεκριμένο κελί είναι σταθερή για κάθε περίοδο φόρτισης της προσομοίωσης. Μια ειδική περίπτωση της οριακής αυτής συνθήκης είναι η συνθήκη μηδενικής ροής. Η ειδική αυτή συνθήκη ισχύει στην περίπτωση της διεπαφής ενός υδατικού συστήματος με ένα αδιαπέρατο όριο, καθώς και στην περίπτωση όπου προσομοιώνεται το όριο κατά μήκος υπόγειων υδροκλιτών. Στο Visual MODFLOW η οριακή συνθήκη καθορισμένης ροής προσομοιώνεται με το πακέτο “Wells”.
- *Οριακή συνθήκη μεταβαλλόμενης ροής εξαρτώμενης από μεταβαλλόμενο φορτίο (ή συνθήκη Cauchy).* Στην οριακή αυτή συνθήκη η ροή διαμέσου του κελιού εξαρτάται από την υδραυλική κλίση μεταξύ του σταθερού φορτίου που αντιστοιχεί σε μια εξωτερική πηγή και του φορτίου που υπολογίζεται στο κελί του μοντέλου που εφαρμόζεται η οριακή συνθήκη. Η συγκεκριμένη συνθήκη μπορεί να εφαρμοσθεί για να προσομοιωθούν ποτάμια, στραγγιστικά δίκτυα ή πλευρικές εισροές εντός και εκτός του μοντέλου. Η οριακή αυτή συνθήκη προσομοιώνεται με το πακέτο “General Head Boundary (GHB)” σε ότι αφορά τις πλευρικές μεταγίσεις, με το πακέτο “River (RIV)” σε ότι αφορά την υδραυλική επικοινωνία με ποτάμια και το πακέτο “drain (DRN)” σε ότι αφορά τη λειτουργία των στραγγιστικών δικτύων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και με βάση τους μηχανισμούς λειτουργίας του υδατικού συστήματος καθορίστηκαν οι οριακές συνθήκες για την παρούσα έρευνα, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια και παρουσιάζονται στην Εικόνα 13.7. Σημειώνεται ότι, αναφορικά με τις οριακές συνθήκες της περιοχής, εφαρμόστηκε ο ίδιος τύπος συνθήκης και για τα δύο στρώματα, εκτός από τις οριακές συνθήκες των ποταμών, οι οποίες και εφαρμόστηκαν μόνο στο ανώτερο στρώμα. Επίσης, ο ίδιος τύπος οριακών συνθηκών εφαρμόστηκε τόσο στο στάδιο της ρύθμισης, σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής, όσο και στο στάδιο της επαλήθευσης.

Στο δυτικό όριο της περιοχής, κατά μήκος της επαφής της υπολεκάνης με το καρστικό σύστημα, επιλέχθηκε η οριακή συνθήκη μεταβλητού φορτίου και ροής, η οποία προσομοιώνεται με το πακέτο GHB. Η οριακή συνθήκη αυτή προσομοιώνει τη σύνδεση με μια πηγή που βρίσκεται εκτός των ορίων της περιοχής προσομοίωσης και υποδηλώνει την ύπαρξη μιας πλευρικής υδατικής πηγής τροφοδοσίας.

Το ανατολικό άκρο του υδατικού συστήματος, ως φυσικό όριο της περιοχής προσομοίωσης, απορρίφθηκε, λόγω της μεγάλης απόστασης από την κύρια περιοχή έρευνας. Μια τέτοια προσέγγιση θα απαιτούσε πολύ μεγάλο όγκο ψηφιοποιημένων δεδομένων καθώς και τη διάθεση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η προσομοίωση σε εύλογο χρονικό διάστημα. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε επέκταση της περιοχής προσομοίωσης προς τα ανατολικά σε τέτοια απόσταση, ώστε να μην ασκηθεί καμία επίδραση στο σύστημα ροής της κύριας περιοχής μελέτης από την τοποθέτηση ενός τεχνητού ορίου κατά μήκος της ανατολικής πλευράς.

Και στην περίπτωση αυτή τα GHB θεωρήθηκαν ως η καλύτερη επιλογή για το ανατολικό περιθώριο της περιοχής προσομοίωσης για τους ακόλουθους λόγους:

α) η διαδικασία υπολογισμού της ροής δεν είναι εύκολη και συνεπώς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα, ειδικά όταν οι υπολογισμοί πρέπει να γίνονται για κάθε περίοδο φόρτισης της προσομοίωσης. Απεναντίας, τα φορτία είναι ευκολότερο να εξαχθούν καθώς υπάρχουν διαθέσιμα υδρογραφήματα ορισμένων γεωτρήσεων και συνεπώς η μία από τις δύο απαιτούμενες παραμέτρους για τον προσδιορισμό των GHB μπορεί να αποκτηθεί με ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας.

β) η ροή που ορίζεται σε ένα όριο καθορισμένης ροής δεν μπορεί να μεταβληθεί εντός μιας περιόδου φόρτισης. Ωστόσο, στην πραγματικότητα η ροή αναμένεται να μεταβάλλεται ιδιαίτερα κατά την περίοδο του καλοκαιριού, όταν οι εφαρμοζόμενες πιέσεις στο υδατικό σύστημα, είναι υψηλές λόγω των αυξημένων αντλήσεων. Επομένως, ένα όριο μόνιμης ροής δεν θα προσομοίωνε με ακρίβεια την υδραυλική εξέλιξη του συστήματος σε αντίθεση με τα GHB, τα οποία επιτρέπουν τις μεταβλητές ροές, με αποτέλεσμα να αποδίδεται μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση του καθεστώτος ροής.

γ) συνολικά, η επιλογή αυτού του τύπου οριακής συνθήκης αφήνει μεγαλύτερους βαθμούς ελευθερίας στο σύστημα, ασκώντας μικρότερο έλεγχο στις εγγύς των ορίων περιοχές.

Στα GHB η εξωτερική πηγή τροφοδοτεί την περιοχή του μοντέλου με ρυθμό ροής που είναι ανάλογος προς τη διαφορά φορτίου ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και στην περιοχή του μοντέλου. Η ροή αυτή εξαρτάται επίσης και από την αγωγιμότητα (Conductance) των υλικών που παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής και του κελιού (ή των κελιών) του μοντέλου, με το οποίο έρχεται σε επαφή. Η αγωγιμότητα αυτή ορίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα του κελιού επί την εγκάρσια διατομή αυτού και διαιρούμενη με την απόστασή της από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Η γραμμική συσχέτιση της ροής προς το κελί με την πιεζομετρική στάθμη (φορτίο) σε αυτό εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q_{b_{i,j,k}} = C_{b_{i,j,k}} * (h_{b_{i,j,k}} - h_{i,j,k}) \quad (13.10)$$

όπου:

$Q_{b_{i,j,k}}$ = η ροή προς το κελί i,j,k από τη γειτονική πηγή

$C_{b_{i,j,k}}$ = η αγωγιμότητα (Conductance) ανάμεσα στην πηγή και το κελί i,j,k

$h_{b_{i,j,k}}$ = η πιεζομετρική στάθμη στην πηγή

$h_{i,j,k}$ = η πιεζομετρική στάθμη στο κελί i,j,k

Ο όγκος του υπόγειου νερού που θα εισέλθει ή θα εξέλθει κατά μήκος των ορίων του μοντέλου εξαρτάται από την υδραυλική κλίση, κατά μήκος του ορίου, την αγωγιμότητα (Conductance) στην οριακή ζώνη και το μέγεθος της διατομής. Τα δεδομένα που απαιτούνται από τον κώδικα Visual MODFLOW για την προσομοίωση της οριακής συνθήκης GHB είναι η αγωγιμότητα των κελιών GHB καθώς και η στάθμη στα κελιά αυτά. Τα δεδομένα στάθμης των κελιών προήλθαν από τις γεωτρήσεις παρατήρησης, ενώ οι τιμές της αγωγιμότητας εκτιμήθηκαν κατά τη διαδικασία της ρύθμισης.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της υδροδυναμικής εξέλιξης και της ισοτοπικής υδρογεωλογίας, πλευρικές εισροές τροφοδοτούν την υπολεκάνη Τυρνάβου από:

- το κρυσταλλικό υπόβαθρο της Πελαγονικής ζώνης στα βόρεια κράσπεδα της υπολεκάνης,
- τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους στα νότια όρια της υπολεκάνης,
- τη μάζα της Όσσας διαμέσου της ρηξιγενούς τεκτονικής δομής στα νοτιοανατολικά περιθώρια της υπολεκάνης.

Και οι τρεις παραπάνω περιπτώσεις πλευρικών εισροών αναπαριστώνται με οριακές συνθήκες μόνιμης ροής. Οι ροές αυτές κατά μήκος αυτών των ορίων υπολογίσθηκαν με τη βοήθεια του νόμου του Darcy, όπως ακριβώς έγινε και στην περίπτωση του υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου. Για τις ανάγκες του μοντέλου οι εισροές αυτές προσομοιώθηκαν με τη χρήση του πακέτου των γεωτρήσεων (Wells), τοποθετώντας θετικό πρόσημο στο ρυθμό παροχής, υποδεικνύοντας έτσι ότι πρόκειται για όγκο νερού που προσφέρεται στο υδατικό σύστημα. Οι οριακές συνθήκες μόνιμης ροής προτιμήθηκαν σε αυτές τις περιπτώσεις έναντι των GHB για τους εξής λόγους:

α) η ενδεχόμενη χρήση των GHB θα είχε επιφέρει σημαντική επισφάλεια στα δεδομένα, όχι μόνο λόγω των δυσκολιών στον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας αλλά κυρίως λόγω της ανεπάρκειας γεωτρήσεων κατά μήκος των παραπάνω ορίων της περιοχής προσομοίωσης, από τις οποίες θα προέκυπταν οι τιμές των φορτίων,

β) τα GHB μπορούν να επηρεάσουν μεγάλα τμήματα της περιοχής προσομοίωσης διαστρεβλώνοντας πολλές φορές τα αποτελέσματα που προκύπτουν,

γ) οι πλευρικές εισροές από τις τρεις περιοχές που αναφέρθηκαν, δεν είναι πολύ υψηλές, όπως αποδείχθηκε και από τους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου. Για το λόγο αυτό, ακόμα και αν οι πλευρικές εισροές μεταβάλλονται σε μια περίοδο φόρτισης, κατά την οποία περίοδο, δόθηκε στις εισροές αυτές μια σταθερή τιμή, το σφάλμα που υπεισέρχεται στα αποτελέσματα θα είναι αρκετά μικρό έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Η προσομοίωση των δύο μεγάλων ποταμών της περιοχής έρευνας (Πηνειός, Τιταρήσιος), έλαβε χώρα με τη χρήση του πακέτου River (RIV). Με το πακέτο αυτό προσομοιώνεται η

αλληλεπίδραση του επιφανειακού ύδατος με το υπόγειο υδατικό σύστημα. Ο υπολογισμός της ροής βασίζεται στην αγωγιμότητα (Conductance) των αποθέσεων της κοίτης του ποταμού, στο ύψος της στάθμης του ποταμού (H_{riv}), στο απόλυτο υψόμετρο της κοίτης και στο υπολογιζόμενο φορτίο στο κελί της οριακής συνθήκης ($h_{i,j,k}$). Όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν να αλλάξουν μεμονωμένα σε κάθε περίοδο φόρτισης της προσομοίωσης. Για ένα τυχαίο κελί σειράς “i”, στήλης “j” και στρώματος “k”, η ροή (Q_{riv}) που εισέρχεται ή εξέρχεται, αναφορικά με το πακέτο RIV, δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{riv} = C * (H_{riv} - h_{i,j,k}) \quad (13.11)$$

όπου $C=KLW/M$ και

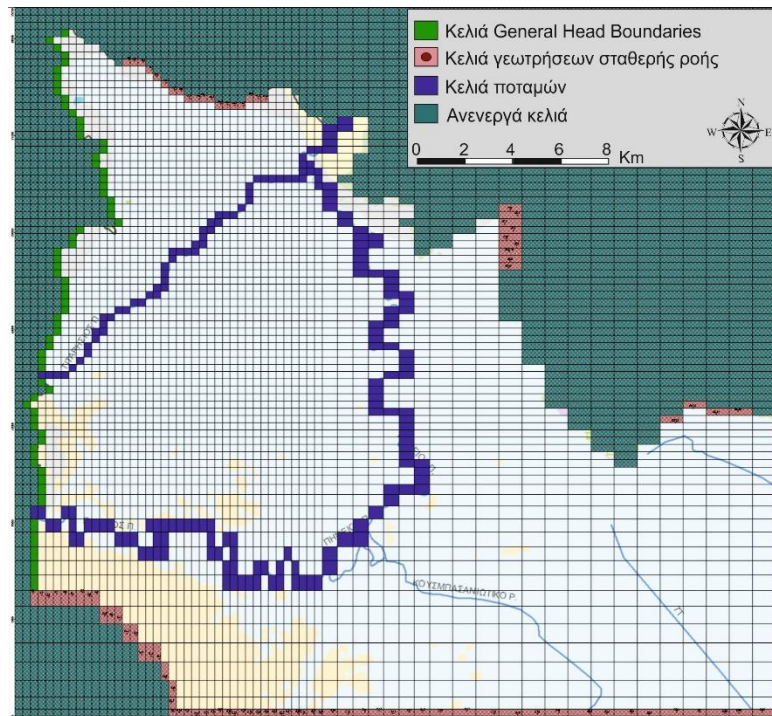
K = υδραυλική αγωγιμότητα της κοίτης (m/d),

L = μήκος του κελιού (m),

W = πλάτος της κοίτης (m),

M = πάχος των αποθέσεων της κοίτης (m).

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός, ότι οι οριακές συνθήκες αντιπροσωπεύουν την υδραυλική αλληλεπίδραση μεταξύ της περιοχής του μοντέλου και του περιβάλλοντος χώρου, θα ήταν αποδεκτός οποιοσδήποτε συνδυασμός ύψους στάθμης και τιμών αγωγιμότητας της κοίτης του ποταμού, που θα οδηγούσε σε ρεαλιστική αναπαράσταση της υδραυλικής αλληλεπίδρασης μεταξύ ποταμού-υδροφόρου για τους σκοπούς της τρέχουσας άσκησης μοντελοποίησης. Ως εκ τούτου, με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα για τους δύο ποταμούς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοίτης τους, οι υδραυλικές αγωγιμότητες υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τη Σχέση 13.11 και καθορίστηκαν μαζί με ύψη στάθμης, για κάθε κελί το οποίο ορίστηκε ως οριακή συνθήκη ποταμού. Συνεπώς, οι καθορισμένες τιμές προσαρμόστηκαν ώστε να πληρούν τα κριτήρια του υδατικού ισοζυγίου και κατανομής φορτίου στο υδατικό σύστημα, κατά τη διάρκεια της ρύθμισης του μοντέλου.



Εικόνα 13.7. Καθορισμός οριακών συνθηκών για την περιοχή έρευνας.

13.4.4.3 Υδραυλικές παράμετροι

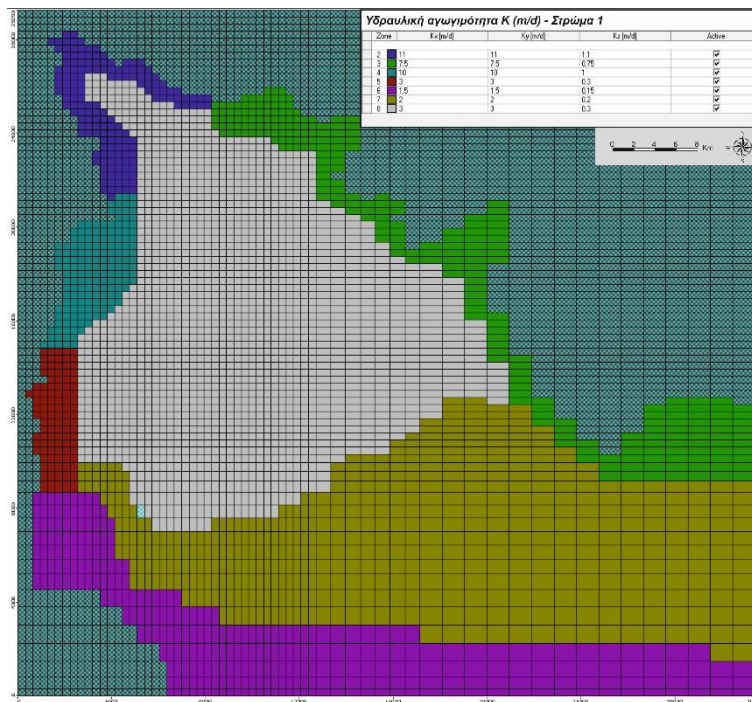
Οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, έχουν ληφθεί από αναλύσεις δοκιμαστικών αντλήσεων, η εκτέλεση ωστόσο των οποίων δεν καλύπτει με λεπτομέρεια το σύνολο της περιοχής, ειδικά όταν αυτή χαρακτηρίζεται από πολύπλοκη δομή και υψηλό βαθμό ετερογένειας, όπως είναι η υπολεκάνη Τυρνάβου. Οι καθοριζόμενες τιμές των υδραυλικών παραμέτρων, για τον λόγο αυτό, θα είναι μια προσέγγιση της πραγματικότητας, προσέχοντας ωστόσο η προσέγγιση αυτή να γίνει με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Έτσι, σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα και τον βαθμό πολυπλοκότητας της περιοχής προσομοίωσης, πρέπει να αποδοθεί ένας ορισμένος αριθμός διαφορετικών τιμών για κάθε παράμετρο. Ο αριθμός αυτός δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλος, καθώς με αυτόν τον τρόπο θα μειωθεί η ακρίβεια της επίλυσης, εφόσον αυξάνεται η αβεβαιότητα για κάθε εκχωρηθείσα τιμή, αλλά δεν μπορεί να είναι και πολύ μικρός, καθώς έτσι θα επέλθει υπερβολική απλοποίηση και επισφάλεια στα ληφθέντα αποτελέσματα (Yeh 1986, Panagoroulios 1995).

Η χρησιμοποίηση της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) προτιμήθηκε έναντι της μεταβιβαστικότητας (T), έτσι ώστε οι υδραυλικές παράμετροι να παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Βάσει των αποτελεσμάτων από παλαιότερες δοκιμαστικές αντλήσεις, που έγιναν στην περιοχή (Sogreah 1974), αλλά και των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών των υδροφόρων του συστήματος, διαμορφώθηκαν κατάλληλα ζώνες τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και για τα δυο στρώματα του μοντέλου. Οι τιμές που αρχικά αποδόθηκαν, τροποποιήθηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-

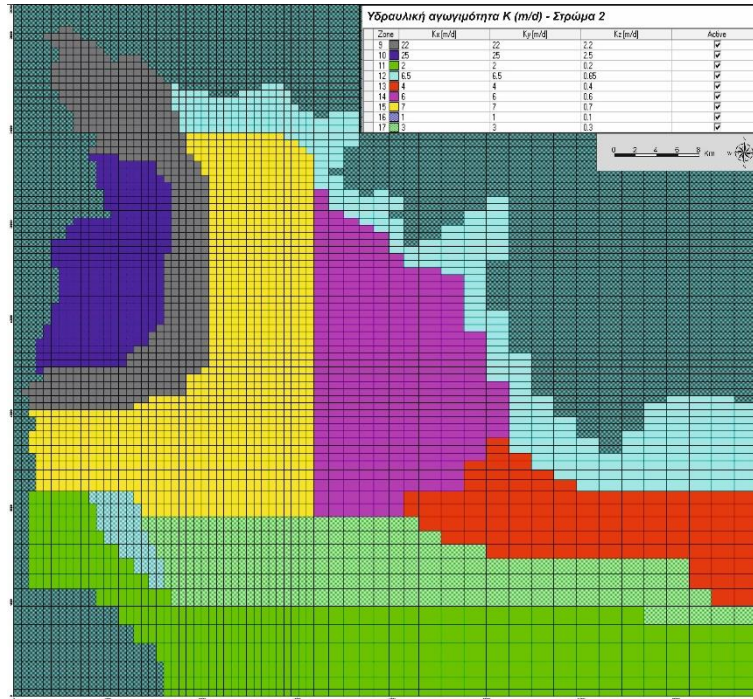
σφάλματος κατά τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου και αποδίδονται στις Εικόνες 13.8 και 13.9 για τον ανώτερο και κατώτερο υδροφόρο αντίστοιχα.

Η χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας και στα δύο στρώματα, όπως αυτή αποδίδεται στις Εικόνες 13.8 και 13.9, έρχεται σε συμφωνία με τα γεωλογικά-υδρογεωλογικά δεδομένα, τα οποία αναφέρθηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια. Έτσι, οι τιμές του K μειώνονται προς το κεντρικό και ανατολικό τμήμα της υπολεκάνης, είναι μικρότερες στο στρώμα 1 έναντι του στρώματος 2 και το νότιο τμήμα της περιοχής προσομοίωσης παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.

Τέλος, σύμφωνα με θεωρητικές μελέτες αλλά και πειράματα πεδίου, προκύπτει ότι σε μη συμπαγείς και στρωματοποιημένες αποθέσεις η σχέση K_x/K_z μπορεί να φθάσει μέχρι και 100, υποδηλώνοντας έτσι μεγάλη ανισοτροπία κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (Missimer et al. 2002, Anderson et al. 2015). Στην παρούσα προσομοίωση, έγινε η παραδοχή ότι το καθένα από τα 2 στρώματα είναι ομοιογενή και ισότροπα κατά την οριζόντια διεύθυνση, οπότε μια αναλογία ανισοτροπίας $K_x/K_z=10$ (και $K_y/K_z=10$) θεωρήθηκε ικανοποιητική.

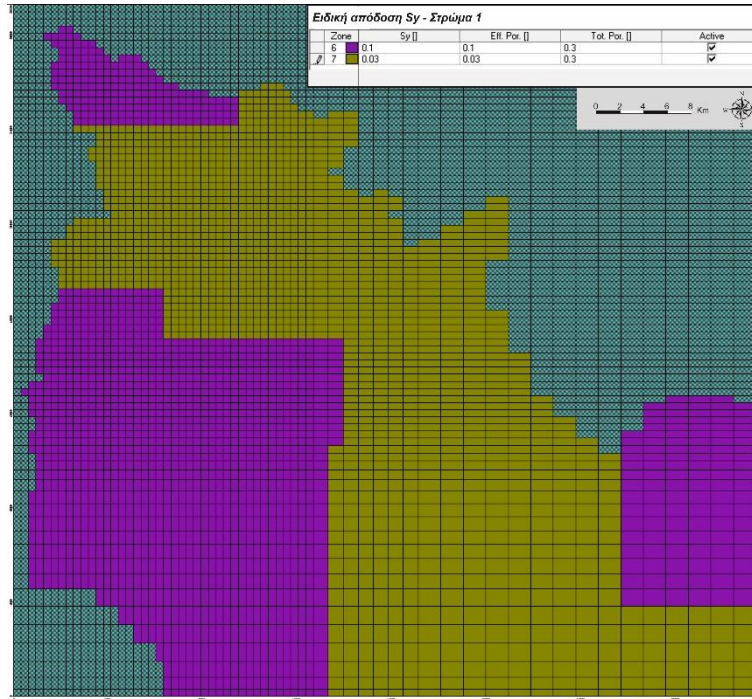


Εικόνα 13.8. Χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας K (m/day) για το στρώμα 1 του μοντέλου.

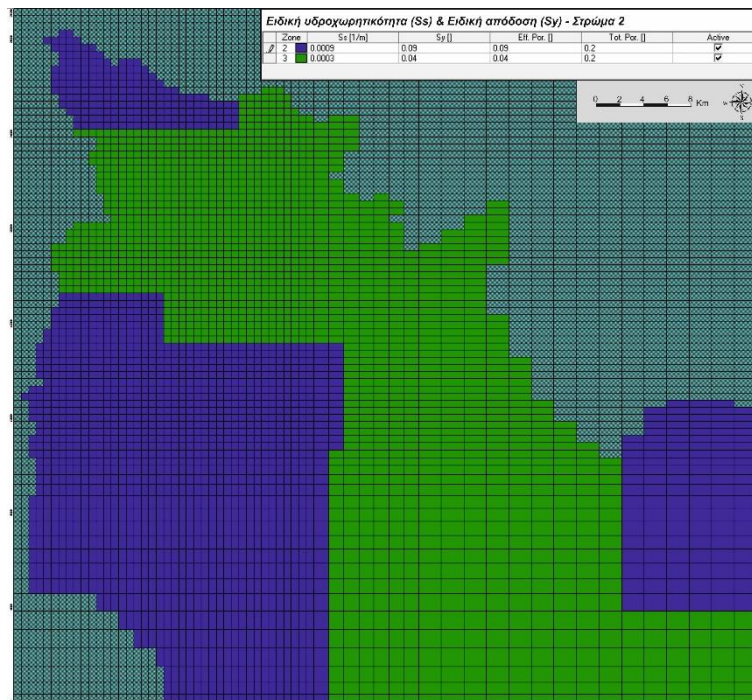


Εικόνα 13.9. Χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας K (m/day) για το στρώμα 2 του μοντέλου.

Όπως και στην περίπτωση της υδραυλικής αγωγιμότητας έτσι και για τις τιμές της αποθηκευτικότητας (S), χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων των παλαιότερων δοκιμαστικών αντλήσεων καθώς και τα λιθολογικά χαρακτηριστικά των δύο υδροφόρων. Ωστόσο, ο αριθμός των τιμών της αποθηκευτικότητας που προέκυψαν είναι περιορισμένος λόγω της φύσης των διεξαγόμενων δοκιμών. Για το λόγο αυτό η κατανομή της αποθηκευτικότητας γίνεται σε ευρύτερες ζώνες σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Και εδώ όμως, οι τιμές των ζωνών αυτών προσαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ρύθμισης του μοντέλου (Εικόνες 13.10, 13.11). Υπενθυμίζεται ότι σε κάθε κελί αποδίδονται δύο τιμές αποθηκευτικότητας: η τιμή της ειδικής απόδοσης (S_y), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην περίπτωση που επικρατούν συνθήκες ελεύθερης υδροφορίας και η τιμή της ειδικής υδροχωρητικότητας (S_s), στην περίπτωση που επικρατούν συνθήκες υπό πίεση υδροφορίας. Για το στρώμα 2 απαιτούνται και οι δύο τιμές καθώς, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, ανάλογα με τη θέση της πιεζομετρικής επιφάνειας σε σχέση με την οροφή του στρώματος, μπορεί να επικρατήσουν συνθήκες είτε ελεύθερης είτε υπό-πίεση υδροφορίας.



Εικόνα 13.10. Χωρική κατανομή της ειδικής απόδοσης S_y για το στρώμα 1 του μοντέλου.



Εικόνα 13.11. Χωρική κατανομή της ειδικής υδροχωρητικότητας (S_s) και της ειδικής απόδοσης (S_y) για το στρώμα 2 του μοντέλου.

13.4.4.4 Αρχικές συνθήκες

Πριν την έναρξη της βαθμονόμησης ενός μοντέλου υπόγειας ροής, είναι απαραίτητος ο ορισμός των αρχικών συνθηκών ή αλλιώς συνθηκών έναρξης. Ο καθορισμός των αρχικών

συνθηκών συνίσταται στον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής των φορτίων στην αρχή μιας περιόδου προσομοίωσης. Στην περίπτωση που η κατανομή των αρχικών φορτίων απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα, αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων επίλυσης για την επίτευξη σύγκλισης σε λύση. Σας αποτέλεσμα, αυξάνεται αρκετά ο χρόνος που χρειάζεται το μοντέλο για να επιλυθεί, ενώ συχνά οι υψηλές αριθμητικές ταλαντώσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την αδυναμία επίλυσής του, ή την σύγκλιση σε μη ακριβή λύση (Rushton and Wedderburn 1973, Panagoroulos 1995, Ajami et al. 2014). Στην συνέχεια αναφέρονται οι αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες τις παρούσας προσομοίωσης, τόσο σε κατάσταση μόνιμης όσο και μη μόνιμης ροής.

Αρχικές συνθήκες σε κατάσταση μόνιμης ροής

Όπως συμβαίνει στο σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων, όπου χρησιμοποιούνται τα υπόγεια νερά για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, έτσι και για την περιοχή έρευνας, συνθήκες μόνιμης ροής δεν μπορούν ρεαλιστικά να επιτευχθούν. Πρόκειται ουσιαστικά για μια κατάσταση δυναμικά μόνιμης ροής, όπου το εισερχόμενο νερό είναι όσο και το εξερχόμενο με ταυτόχρονη αντιστάθμιση των μεταβολών της εναποθηκευτικής ικανότητας του υδροφόρου μέσα στο έτος. Στην περίπτωση της καθαρά μόνιμης ροής, εξαρχής η διαφορά των αποθηκευτικών αποθεμάτων θεωρείται μηδενική χωρίς να υπάρχουν ελλείματα και αναπληρώσεις κατά τη διάρκεια του έτους. Η βαθμονόμηση στην τελευταία περίπτωση είναι πιο εύκολο να επιτευχθεί μη λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα χρόνο και την αποθηκευτικότητα των υδροφόρων.

Σε πολλές περιπτώσεις επιλέγεται η υγρή περίοδος, ως περίοδος βαθμονόμησης (αρχικές συνθήκες) γιατί τότε υπάρχει ένα γεμάτο υδροφόρο σύστημα χωρίς ιδιαίτερες πιέσεις, με αποτέλεσμα η διαδικασία της βαθμονόμησης να γίνεται ευκολότερη. Ωστόσο, για την περίπτωση της υπολεκάνης Τυρνάβου, επιλέχθηκε ως περίοδος βαθμονόμησης, σε κατάσταση μόνιμης ροής, η ξηρή περίοδος τους έτους 2017, όπου υπάρχουν περισσότερα και πυκνότερα πρωτογενή δεδομένα υπόγειας στάθμης. Επίσης, το 2017, με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα δεν είναι ούτε ακραία ξηρό, ούτε ακραία υγρό έτος, ενώ δεν προηγήθηκαν και ακραία υδρολογικά έτη πριν από αυτό. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση, επιλέχθηκε η πιεζομετρική κατάσταση στα τέλη του Σεπτεμβρίου του 2017 (Οκτώβριος), ως αρχικές συνθήκες μόνιμης ροής, θεωρώντας ότι αυτή η περίοδος είναι πιο κοντά στη μέση κατάσταση από την αντίστοιχη περίοδο του Απριλίου και ταυτόχρονα με περισσότερα δεδομένα στάθμης. Κι αυτό γιατί τον Απρίλιο οι υπόγειες στάθμες βρίσκονται στην υψηλότερη τιμή τους, ενώ την περίοδο του Οκτωβρίου έχει σταματήσει να λειτουργεί ο πυρήνας αρδευτικών αντλήσεων και το σύστημα έχει ξεκινήσει την επανάκαμψή του.

Αρχικές συνθήκες σε κατάσταση μη μόνιμης ροής

Στην περίπτωση της μη μόνιμης ροής, η διαδικασία που συνήθως ακολουθείται αναφορικά με τις αρχικές συνθήκες, είναι να υπεισέρχονται ως αρχικά φορτία, τα παραγόμενα από τη ρύθμιση του μοντέλου σε κατάσταση μόνιμης ροής. Στη συνέχεια, μετά το πρώτο στάδιο της ρύθμισης, τα παραγόμενα φορτία από την πρώτη περίοδο φόρτισης (ή την τελευταία), επαναχρησιμοποιούνται, ως αρχικά φορτία κατά τα επόμενα στάδια της ρύθμισης σε κατάσταση μη μόνιμης ροής.

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε και στην παρούσα άσκηση προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας στο δεύτερο στάδιο της ρύθμισης τα φορτία από την πρώτη περίοδο φόρτισης του πρώτου σταδίου, καθώς με τη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος προέκυψε ότι αποδίδουν καλύτερα αποτελέσματα.

13.4.4.5 Προσαρμογή υδατικού ισοζυγίου στην ευρύτερη περιοχή προσομοίωσης

Το υδατικό ισοζύγιο, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, αποτελεί ένα κριτήριο αξιολόγησης της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Ωστόσο, τα στοιχεία του υδατικού ισοζυγίου, τα οποία υπολογίσθηκαν αναλυτικά στο 7^ο Κεφάλαιο για το έτος 2017, χρήζουν προσαρμογής εξαιτίας της επέκτασης της περιοχής έρευνας προς τα ανατολικά, για τις ανάγκες της προσομοίωσης. Σε σύγκριση με την κύρια περιοχή έρευνας, η εκτεταμένη περιοχή προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη κατά 4 km προς τα ανατολικά και κατά 7.5 km προς τα νότια. Η επέκταση προς αυτές τις δύο κατευθύνσεις, συνεπάγεται αύξηση της έκτασης κατά 330 km² περίπου και έτσι στη συνέχεια αναφέρονται οι προσαρμογές που έγιναν, στις παραμέτρους του υδατικού ισοζυγίου λόγω της αύξησης αυτής.

Πλευρικές εισροές από το καρστικό σύστημα: Το μήκος της διεπαφής του καρστικού συστήματος με την αλλουβιακή υπολεκάνη αυξήθηκε κατά περίπου 7 km, λόγω της κατά νότο προέκτασης της περιοχής. Σύμφωνα με τους αρχικούς υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου και θεωρώντας ότι οι πλευρικές εισροές εισέρχονται στους αλλουβιακούς υδροφόρους ομοιόμορφα, η επιπλέον ροή ύδατος (Q_{plus}) στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$Q_{plus} = Q_{rate} * 7000 \quad (13.12)$$

όπου Q_{rate} ο ρυθμός ροής σύμφωνα με τους αρχικούς υπολογισμούς σε m³/d/m.

Με βάση τις τιμές του Πίνακα 7.11 και τη Σχέση 13.12 προκύπτει ότι οι πλευρικές εισροές από το καρστ για την περιοχή προσομοίωσης για το έτος 2017 είναι:

$$Q_{καρστ} = 121,818,620 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Πλευρικές εισροές από τους μέσο-θεσσαλικούς λόφους: Οι πλευρικές αυτές εισροές υπολογίσθηκαν από την εξίσωση του νόμου του Darcy, υπολογίζοντας τις μέσες κλίσεις από τους αντίστοιχους πιεζομετρικούς χάρτες (Εικόνα 7.18). Από την ίδια εξίσωση και

αυξάνοντας το μήκος διατομής, λόγω της ανατολικής επέκτασης, κατά 4 km, προκύπτει ότι οι νέες πλευρικές εισροές θα είναι:

$$Q_{N-NA} = 9,417,200 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Πλευρικές εισροές από το κρυσταλλικό υπόβαθρο: Με την ίδια λογική, οι πλευρικές εισροές από το κρυσταλλικό υπόβαθρο στο βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας, αυξάνοντας το μήκος κατά 4 km θα είναι:

$$Q_{\text{υποβάθρου}} = 1,724,625 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Πλευρικές υπόγειες εισροές από τους ανθρακικούς σχηματισμούς της Όσσας: Συγκρίνοντας την Εικόνα 7.19, από την οποία προέκυψαν οι κλίσεις με βάση τις οποίες υπολογίσθηκε η τροφοδοσία από τη μάζα της Όσσας, με την εκτεταμένη περιοχή προσομοίωσης, υπολογίζεται ότι το μήκος της διατομής για τους νέους υπολογισμούς αυξάνεται κατά 5 km. Οπότε η προσαρμοσμένη τροφοδοσία από τα ανθρακικά πετρώματα της Όσσας θα είναι:

$$Q_{\text{Όσσα}} = 6,166,888 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Πλευρικές υπόγειες εκφορτίσεις προς την ανατολική-νοτιοανατολική συνέχεια του αλλουβιακού συστήματος: Και στην περίπτωση αυτή οι πλευρικές εκροές προς τα ΝΑ υπολογίσθηκαν με τον νόμο του Darcy. Αν τα επιπλέον 7.5 km της επέκτασης προστεθούν στους υπολογισμούς που είχαν γίνει στην αρχική εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου για την κύρια περιοχή έρευνας, τότε οι νέες πλευρικές εκροές θα είναι:

$$Q_{\text{επέκταση}} = 70,777,800 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Απευθείας κατείδυση βροχόπτωσης στην αλλουβιακή υπολεκάνη: Η τροφοδοσία της περιοχής προσομοίωσης από την απευθείας κατείδυση της βροχόπτωσης, υπολογίσθηκε σε αυτό το στάδιο της προσομοίωσης με τον τρόπο που θα αναλυθεί ακολούθως και εισήχθη στο Visual MODFLOW με τη βοήθεια του πακέτου "Recharge".

Με τη βοήθεια του GROWA (Kunkel and Wendland 2002), ενός εμπειρικού χωρικά κατανεμημένου υδρολογικού ομοιώματος υδατικού ισοζυγίου το οποίο εφαρμόστηκε στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού (Panagoroulos et al. 2018), χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακοί χάρτες χωρικής κατανομής του συντελεστή κατείδυσης, για τον υπολογισμό της τροφοδοσίας της περιοχής προσομοίωσης.

Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της κατείδυσης του έτους 2017, χρησιμοποιήθηκε ψηφιακός χάρτης χωρικής κατανομής με μέγεθος κελιού (100m * 100m), του μέσου συντελεστή κατείδυσης από το 1971 έως και το 2000. Ο ψηφιακός αυτός χάρτης πολλαπλασιαζόμενος επί την ετήσια βροχόπτωση του έτους 2017 με τη χρήση του ArcGIS, απέδωσε την απευθείας κατείδυση για την περιοχή προσομοίωσης σε έναν ψηφιακό χάρτη διακριτοποίησης (100m * 100m). Το άθροισμα των τιμών της κατείδυσης για κάθε κελί πολλαπλασιαζόμενο επί 10,000 m² (μέγεθος κελιού) αποδίδει το ρυθμό τροφοδοσίας από την βροχόπτωση για το έτος 2017 και είναι:

$$Q_{\text{βροχ.λεκάνης}} = 44,848,135 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Υπολογισμός αντλήσεων για την κάλυψη αρδευτικών, υδρευτικών, κτηνοτροφικών και βιομηχανικών αναγκών

Ο υπερδιπλασιασμός της περιοχής έρευνας για τις ανάγκες της προσομοίωσης οδηγεί στον εκ νέου υπολογισμό των αντλήσεων, κυρίως για τις αρδευτικές ανάγκες, δευτερευόντως για την ύδρευση και συμπληρωματικά για τις κτηνοτροφικές και βιομηχανικές ανάγκες. Ως εκ τούτου, στη συνέχεια αναλύεται η προσέγγιση του υπολογισμού των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών και για την κτηνοτροφία και τις μικρές βιομηχανίες, αυτές ενσωματώνονται στις συνολικές αντλήσεις καθώς το ποσοστό συμμετοχής τους είναι πολύ μικρό και όχι ικανό να αλλάξει τα δεδομένα στη σύνταξη του ισοζυγίου.

Αρδευτικές ανάγκες

Τα μόνα διαθέσιμα δεδομένα για την επιπλέον έκταση της περιοχής προσομοίωσης, από τα οποία θα μπορούσε να υπολογισθούν οι αρδευτικές ανάγκες, είναι ο καταμερισμός των καλλιεργειών από τα στοιχεία του Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε.. Με βάση τα δεδομένα αυτά, θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν δραματικές αλλαγές στην κατανομή των καλλιεργειών από το 2015, καθώς και την Κ.Υ.Α. με αριθμό Φ 16/6631/89, σχετικά με τα ανώτατα και κατώτατα όρια των αναγκαίων ποσοτήτων για την ορθολογική χρήση του αρδευτικού νερού (ανά καλλιέργεια και ανά υδατικό διαμέρισμα), υπολογίσθηκε η εξατμισοδιαπνοή για κάθε καλλιέργεια για το έτος 2017 (ET_c).

Προκειμένου να υπολογισθούν οι απαιτούμενες ανάγκες νερού για άρδευση ανά καλλιέργεια, συνυπολογίσθηκαν δύο παράγοντες διόρθωσης στις τιμές της εξατμισοδιαπνοής που προκύπτουν από την παραπάνω Κ.Υ.Α. Ο πρώτος αφορά την απόδοση των μεθόδων άρδευσης, η οποία με βάση την ίδια Κ.Υ.Α. κυμαίνεται για την περιοχή έρευνας από 75 έως 85%. Ωστόσο, λόγω της βελτίωσης των μεθόδων άρδευσης από το 1989 έως σήμερα (π.χ. επικράτηση της στάγδην άρδευσης), στους υπολογισμούς για την περιοχή έρευνας έγινε αποδεκτή μια μέση απόδοση 90%. Ο δεύτερος παράγοντας διόρθωσης αφορά τις απώλειες του δικτύου άρδευσης, οι οποίες εκτιμήθηκαν στο 15% των αρδευτικών αναγκών (Panagoroulos 1995). Με βάση τα παραπάνω, οι διορθωμένες αρδευτικές ανάγκες για κάθε καλλιέργεια (ET_{tot}) υπολογίσθηκαν από τη σχέση:

$$ET_{tot} = ET_c + A + B \quad (13.13)$$

όπου:

ET_c , οι αρδευτικές ανάγκες βάσει τις Κ.Υ.Α. Φ 16/6631/89,

$A = (1-0.9) \cdot ET_c$, ο συντελεστής διόρθωσης των μεθόδων άρδευσης,

$B = 0.15 \cdot (ET_c + A)$, ο συντελεστής διόρθωσης των δικτύων άρδευσης.

Όλοι οι συντελεστές της Σχέσης 13.13 εκφράζονται σε $\text{m}^3/\text{αρδ. περίοδο}/\text{στρέμμα}$ και οι υπολογισμοί ανά καλλιέργεια, παρέχονται στους Πίνακες Π2.1 έως Π2.7 του Παραρτήματος 2. Σημειώνεται επίσης ότι, ως αρδευτική περίοδος για τις ανάγκες της

προσομοίωσης ελήφθη η περίοδος Μαΐου-Σεπτεμβρίου, για τα σιτηρά οι αρδευτικές ανάγκες θεωρήθηκαν μηδενικές για το σύνολο της αρδευτικής περιόδου, ενώ για το βαμβάκι και το καλαμπόκι οι αρδευτικές ανάγκες θεωρήθηκαν μηδενικές για το μήνα Σεπτέμβριο.

Από τον υπολογισμό των αρδευτικών αναγκών αφαιρέθηκε η συνεισφορά της βροχόπτωσης (P), με τον υπολογισμό της ενεργού βροχόπτωσης (P_e), η οποία σύμφωνα με τον FAO (1978) δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις, υπό τον περιορισμό ότι η κλίση της περιοχής είναι 4-5%. Η προϋπόθεση αυτή τηρείται στην περίπτωση αυτή οπότε η ενεργός βροχόπτωση θα είναι:

$$P_e = 0.8 * P - 25 \quad \text{αν } P > 75 \text{ mm / μήνα} \quad (13.14)$$

$$P_e = 0.6 * P - 10 \quad \text{αν } P < 75 \text{ mm / μήνα} \quad (13.15)$$

Από τους υπολογισμούς που φαίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 2 (ανά Τ.Ο.Ε.Β. και ανά περιοχές εκτός Τ.Ο.Ε.Β.), προκύπτει ότι οι αρδευτικές ανάγκες για το 2017 (Πίνακας 13.1), για όλη την περιοχή προσομοίωσης είναι:

$$Q_{\text{άρδ.}} = 127,229,706 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Πίνακας 13.1. Αρδευτικές ανάγκες ανά περιοχή για το 2017, όπως υπολογίσθηκαν στο Παράρτημα 2.

ΠΕΡΙΟΧΗ	Αρδευτικές Ανάγκες
Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου	$Q_{\text{τύρ.}} = 14,491,652$
Τ.Ο.Ε.Β. Αγίας Σοφίας	$Q_{\text{Αγ.σοφ.}} = 15,917,748$
Τ.Ο.Ε.Β. Αμπελώνα	$Q_{\text{Αμπ.}} = 30,494,348$
Κύρια περιοχή εκτός Τ.Ο.Ε.Β.	$Q_{\text{εκτός ΤΟΕΒ}} = 13,491,747$
Επέκταση περιοχής	$Q_{\text{επέκτασης}} = 52,834,211$
	ΣΥΝΟΛΟ 127,229,706 m³/y

Υδρευτικές ανάγκες

Για το υπολογισμό των υδρευτικών αναγκών της ευρύτερης περιοχής προσομοίωσης, αντλήθηκαν στοιχεία από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛ.ΣΤΑΤ.), για την εκτίμηση του πληθυσμού της περιοχής αυτής. Ουσιαστικά πρόκειται για τη Δημοτική Ενότητα Πλατυκάμπου (αφαιρώντας την Τ.Κ. Χάλκης) και την Τ.Κ. Τερψιθέας, οπότε ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τον υπολογισμό που έγινε για την κύρια περιοχή έρευνας και τη χρήση της Εξίσωσης 7.13, εκτιμήθηκε ο πληθυσμός αυτός για το 2017. Ο επιπλέον πληθυσμός, με βάση τα προηγούμενα, υπολογίσθηκε στους 8,372 κατοίκους και η επιπλέον ετήσια κατανάλωση για το 2017 σε $1,911,323 \text{ m}^3$. Οπότε, αν $Q_{\text{ύδρ.1}}$, οι υδρευτικές ανάγκες πριν την επέκταση και $Q_{\text{ύδρ.2}}$, οι επιπλέον υδρευτικές ανάγκες, τότε είναι:

$$Q_{\text{ύδρ.}} = Q_{\text{ύδρ.1}} + Q_{\text{ύδρ.2}} = 39,840,748 + 1,911,323 = 41,752,071 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Επιστροφές λόγω απωλειών από τα δίκτυα ύδρευσης: Οι επιστροφές από δίκτυα ύδρευσης επανυπολογίζονται, λαμβάνοντας υπόψη και τα νέα πληθυσμιακά δεδομένα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην περίπτωση αυτή είναι:

$$Q_{\text{απ.δικτύων}} = 1,722,932 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Επιστροφές-επαναδιηθήσεις από τα αρδευτικά δίκτυα: Και ο υπολογισμός των επιστροφών αρδεύσεων γίνεται με βάση τις νέες αρδευτικές ανάγκες, που εκτιμήθηκαν προηγουμένως. Αυτές είναι:

$$Q_{\text{επ.αρδεύσεων}} = 0.05 * Q_{\text{άρδ.}} = 6,361,485 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Πλευρικές υπόγειες εισροές από τα ιζήματα των ποταμών Τιταρήσιου και Πηνειού: Δεν προκύπτουν τροποποιήσεις στις αρχικά υπολογιζόμενες πλευρικές εισροές των ιζημάτων των ποταμών Τιταρήσιου και Πηνειού πριν της είσοδό τους στην υπολεκάνη, καθώς δεν μεταβάλλεται το μήκος στους αντίστοιχους υπολογισμούς που είχαν γίνει. Έτσι, οι πλευρικές αυτές εισροές είναι:

$$Q_{\text{ιζημάτων}} = 1,646,789 \text{ m}^3/\text{y}.$$

Τέλος, η παραδοχή που είχε γίνει για της εισροές και εκροές των ποταμών Πηνειού και Τιταρήσιου, στο αντίστοιχο κεφάλαιο υπολογισμού του ισοζυγίου, γίνεται και στην περίπτωση αυτή, οπότε ισχύει η σχέση (7.14), $Q_{\text{εισ.ποταμών}} = Q_{\text{εκ.ποταμών}}$.

13.4.5 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η ρύθμιση ενός υδρογεωλογικού μοντέλου αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές διαδικασίες ανάπτυξης της προσομοίωσης, καθώς στη διαδικασία αυτή καθορίζεται το κατά πόσο το μοντέλο θα αποδίδει τις πραγματικές ροές και μεταβολές της πιεζομετρικής στάθμης. Η μέθοδος της δοκιμής και σφάλματος (trial and error) αποτελεί μια μη αυτοματοποιημένη μέθοδο ρύθμισης ενός μοντέλου και είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Κατά τη μέθοδο αυτή δοκιμάζονται διάφορες τιμές των ρυθμιζόμενων παραμέτρων και αξιολογείται η αντίδραση του συστήματος στις μεταβολές που προκάλεσαν οι παράμετροι αυτές. Η μέθοδος αυτή απαιτεί μετρήσεις υπαίθρου, εμπειρία του χρήστη και καλή γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών.

Προτείνεται η ρύθμιση του μοντέλου να πραγματοποιείται, τόσο σε συνθήκες μόνιμης όσο και σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (ASTM D5981-2002), καθώς η ρύθμιση μόνο σε συνθήκες μόνιμης ροής, γενικά, δεν οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα. Κατά την μόνιμη ροή, δεν υπεισέρχεται στην προσομοίωση η έννοια του χρόνου, οπότε δεν συνυπολογίζεται η παράμετρος των αποθηκευμένων ποσοτήτων ύδατος και η μεταβολή των τάσεων σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Ως εκ τούτου, στην παρούσα άσκηση προσομοίωσης για την υπολεκάνη Τυρνάβου, πραγματοποιήθηκε αρχικά ρύθμιση σε συνθήκες μόνιμης ροής κατά την οποία εκτιμήθηκε η υδραυλική αγωγιμότητα (K) του υδατικού συστήματος.

Στη συνέχεια, η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε κατά τη ρύθμιση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής και προσαρμόστηκαν τόσο ο συντελεστής ειδικής απόδοσης (S_y) όσο και η τιμή της ειδικής υδροχωρητικότητας (S_s).

Για την αξιολόγηση της ρύθμισης ενός μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τόσο στατιστικές όσο και γραφικές μέθοδοι (ASTM D5490-93, Hill 2000). Στην παρούσα άσκηση προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα κριτήρια:

- *Διαγράμματα διασποράς*: είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος αξιολόγησης των στόχων της ρύθμισης ενός μοντέλου προσομοίωσης. Στα διαγράμματα αυτά κατασκευάζεται η γραφική παράσταση των προσομοιωμένων τιμών σε συνάρτηση με τα πρωτογενή δεδομένα. Καλύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν όλα τα σημεία τείνουν να ταυτιστούν με την ευθεία $y=x$, όπου το y αντιστοιχεί στις προσομοιωμένες τιμές και το x στις μετρημένες.
- *Ο συντελεστής συσχέτισης (Correlation Coefficient)*: αποτελεί μία παράμετρο που δείχνει πόσο διεσπαρμένες είναι οι τιμές γύρω από την ευθεία παλινδρόμησης. Όταν η τιμή του είναι κοντά στη μονάδα τότε επιτυγχάνεται καλύτερη προσαρμογή των τιμών προς την ευθεία γραμμή και επομένως καλύτερη ρύθμιση του μοντέλου.
- *Το μέσο σφάλμα (Mean Error)*: το οποίο αντιστοιχεί στο μέσο όρο των διαφορών μεταξύ των προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών της υπόγειας στάθμης. Η παράμετρος αυτή αποτελεί μέτρο του συνολικού σφάλματος της προσομοίωσης.
- *Το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error)*: το οποίο αντιστοιχεί στο μέσο όρο της απόλυτης τιμής των διαφορών μεταξύ των προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών της υπόγειας στάθμης. Η πρόβλεψη της υπόγειας στάθμης θεωρείται απόλυτη, όταν τόσο το μέσο σφάλμα όσο και το μέσο απόλυτο σφάλμα τείνουν στο μηδέν.
- *Το τυπικό σφάλμα εκτίμησης (Standard Error of the Estimate)*: το οποίο αποτελεί μέτρο της μεταβλητότητας του σφάλματος γύρω από την αναμενόμενη τιμή σφάλματος και εκφράζεται από την εξίσωση:

$$SEE = \sqrt{\frac{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (E_j - ME)^2}{N}} \quad (13.16)$$

όπου E_j είναι το σφάλμα της γεώτρησης παρατήρησης j , N το πλήθος των παρατηρήσεων και ME το μέσο σφάλμα.

- *Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error)*: είναι η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς μεταξύ προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών. Αποτελεί μέτρο της απόκλισης μεταξύ των τιμών που μετρήθηκαν και αυτών που προβλέπει το μοντέλο και δίνεται από τη σχέση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (13.17)$$

όπου x_i , y_i είναι οι μετρημένες και οι προσομοιωμένες τιμές αντίστοιχα και n ο αριθμός των παρατηρήσεων.

- *Το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Normalized Root Mean Square*

Error): η παράμετρος αυτή εκφράζεται από την εξίσωση:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(X_o)_{max} - (X_o)_{min}} \quad (13.18)$$

Το *NRMSE* εκφράζεται ως ποσοστό και είναι πιο αντιπροσωπευτικό μέτρο της σύγκλισης μεταξύ προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών υπόγειας στάθμης σε σχέση με το *RMSE*, διότι λαμβάνει υπόψη την κλίμακα του εύρους τιμών υδραυλικού φορτίου (Πισινάρας 2008, Waterloo Hydrogeologic Inc. 2015).

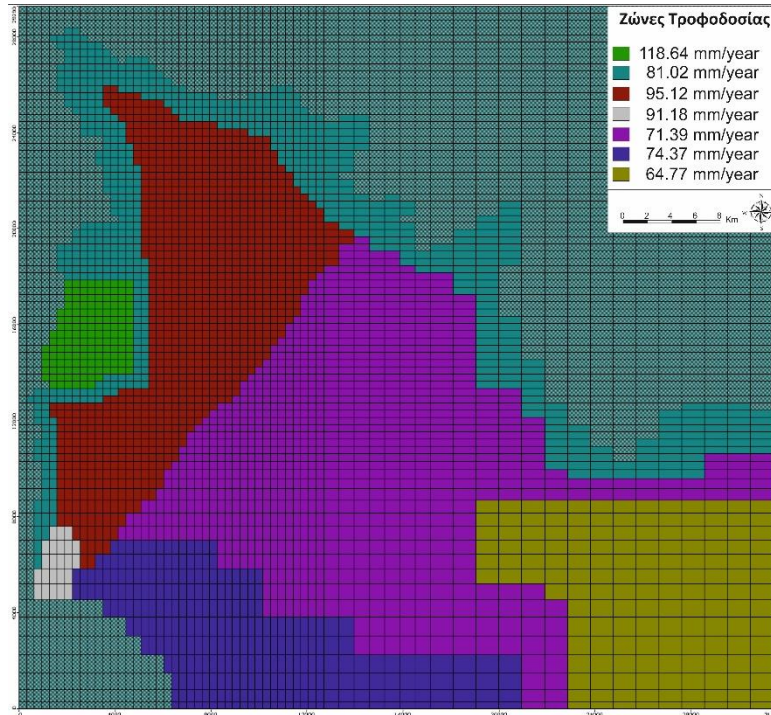
- Σύγκριση των πιεζομετρικών χαρτών που δημιουργήθηκαν με βάση τα πρωτογενή δεδομένα υπόγειας στάθμης, με αυτούς που δημιουργήθηκαν από τις προσομοιωμένες τιμές στάθμης.
- Σύγκριση των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου που προέκυψε από τα υπάρχοντα δεδομένα και υπολογισμούς, με τις αντίστοιχες παραμέτρους του ισοζυγίου που προκύπτουν από την προσομοίωση.

13.4.5.1 Ρύθμιση σε συνθήκες μόνιμης ροής (*Steady state calibration*)

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, ως περίοδος ρύθμισης σε συνθήκες μόνιμης ροής επιλέχθηκε το ημερολογιακό έτος 2017. Τις εισροές προς το υδατικό σύστημα, κατά την προσομοίωση σε συνθήκες μόνιμης ροής, αποτελούν οι πλευρικές εισροές και η κατείσδυση από τη βροχόπτωση. Οι πλευρικές εισροές υπολογίσθηκαν στην Παράγραφο 13.4.4.5 και προσομοιώθηκαν με το πακέτο “Wells” του Visual MODFLOW (εκτός των εισροών από το καρστ, που προσομοιώθηκαν με την οριακή συνθήκη GHB). Καθώς πρόκειται για εισροές προς το υδατικό σύστημα, ο ρυθμός ροής για κάθε γεώτρηση εισάγεται με θετικό πρόσημο στο λογισμικό. Συνολικά 93 γεωτρήσεις προστέθηκαν στα βόρεια (19), νότια (62) και ανατολικά (12) περιθώρια της περιοχής προσομοίωσης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.7.

Αναφορικά με την τροφοδοσία από την βροχόπτωση, στην Παράγραφο 13.4.4.5 υπολογίσθηκε ο συνολικός όγκος που έπρεπε να εισαχθεί σε ολόκληρη την περιοχή προσομοίωσης, μόνο όμως για το επιφανειακό στρώμα (Layer 1). Λόγω της ανομοιομορφίας του συντελεστή κατείσδυσης, ο όγκος αυτός δεν κατανεμήθηκε ομοιόμορφα στο σύνολο της επιφάνειας της περιοχής. Πρακτικά για τη συνολική έκταση της περιοχής προσομοίωσης (580.5km²) προέκυψαν 58,050 τιμές συντελεστή κατείσδυσης, μία για κάθε κελί 10,000m², με βάση τον ψηφιακό χάρτη (Παράγραφος 13.4.4.5, Panagoroulos et al. 2018). Το πακέτο “Recharge” ωστόσο δεν υποστηρίζει την εισαγωγή Raster δεδομένων και ως εκ τούτου ήταν αδύνατη η εισαγωγή της κατείσδυσης με ένα τόσο μεγάλο πλήθος τιμών. Η λύση στο πρόβλημα αυτό δόθηκε με τον διαχωρισμό της περιοχής προσομοίωσης σε ζώνες (βάσει πολυγώνων Thiessen, Εικόνα 7.20), και τη χρήση της εντολής “Zonal Statistics” του ArcGIS. Με τον τρόπο αυτό, το πλήθος των 58,050 τιμών συντελεστή κατείσδυσης διαιρέθηκε σε 7 τμήματα, σε κάθε ένα από τα οποία εφαρμόστηκε η εντολή “Zonal Statistics” και προέκυψε μια τιμή συντελεστή κατείσδυσης

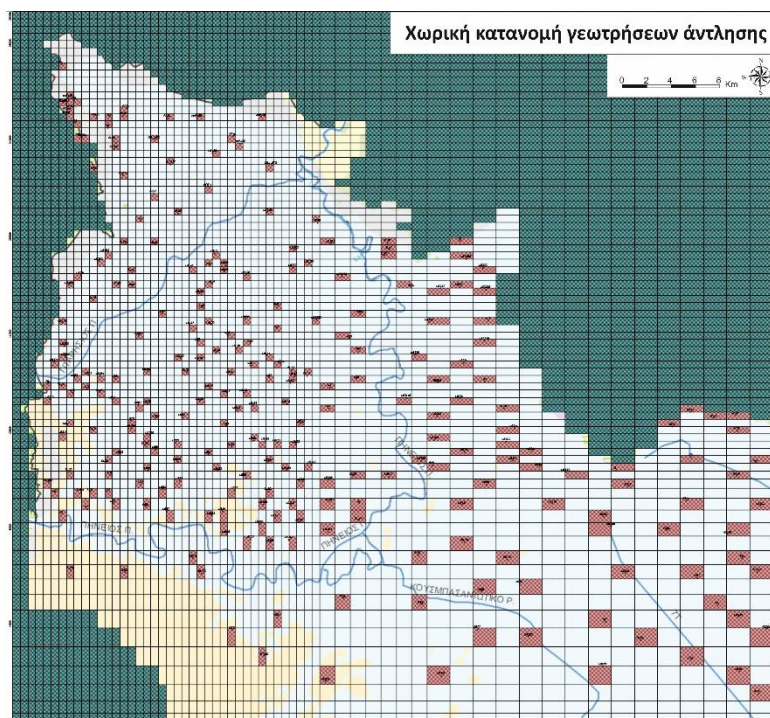
(βασισμένη ωστόσο με ένα μεγάλο αριθμό τιμών προερχόμενων από μια βάση δεδομένων από το 1971 έως και το 2000) αντιπροσωπευτική για κάθε ζώνη στην οποία διαχωρίστηκε η περιοχή προσομοίωσης (Εικόνα 7.20). Οι τιμές αυτές πολλαπλασιαζόμενες με την ετήσια βροχόπτωση έδωσαν την τιμή κατείσδυσης για κάθε ζώνη, οι οποίες και εισήχθησαν με τη βοήθεια του πακέτου “Recharge” (Εικόνα 13.12).



Εικόνα 13.12. Ζώνες τροφοδοσίας από τη βροχόπτωση με βάση την κατανομή του συντελεστή κατείσδυσης (Panagoroulos, 1995, Panagoroulos et al. 2018).

Οι εκροές που απορρέουν από το σύστημα, αφορούν τις αντλήσεις και τις πλευρικές εκφορτίσεις από την ΝΑ επέκταση του συστήματος. Οι αντλήσεις υπολογίστηκαν στην Παράγραφο 13.4.4.4 και προσομοιώθηκαν και αυτές με το πακέτο “Wells”, μόνο που στην περίπτωση αυτή, ο ρυθμός άντλησης εισάχθηκε με αρνητικό πρόσημο, καθώς πρόκειται για εκροές από το υδατικό σύστημα. Και στην περίπτωση αυτή, στις γεωτρήσεις άντλησης δεν αποδόθηκε ο ίδιος ρυθμός άντλησης. Εφόσον οι αρδευτικές ανάγκες υπολογίστηκαν σε πέντε (5) διαφορετικές ζώνες (τρεις ζώνες των Τ.Ο.Ε.Β., μία ζώνη εκτός Τ.Ο.Ε.Β. και εντός της κύριας περιοχής, μία ζώνη στην περιοχή επέκτασης) και γνωρίζοντας τον αριθμό γεωτρήσεων ανά ζώνη, αποδόθηκε σε κάθε γεώτρηση το κλάσμα των αναγκών που της αντιστοιχούσε. Ουσιαστικά προέκυψαν πέντε (5) σελ τιμών παροχής (m^3/day) γεωτρήσεων, ένα για κάθε ζώνη. Η χωρική κατανομή των γεωτρήσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.13.

Αναφορικά με τις πλευρικές εκφορτίσεις από την ΝΑ επέκταση του συστήματος, αυτές προσομοιώθηκαν, όπως ειπώθηκε στην Παράγραφο 13.4.4.2, με την οριακή συνθήκη GHB.



Εικόνα 13.13. Χωρική κατανομή γεωτρήσεων άντλησης για τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής (steady state).

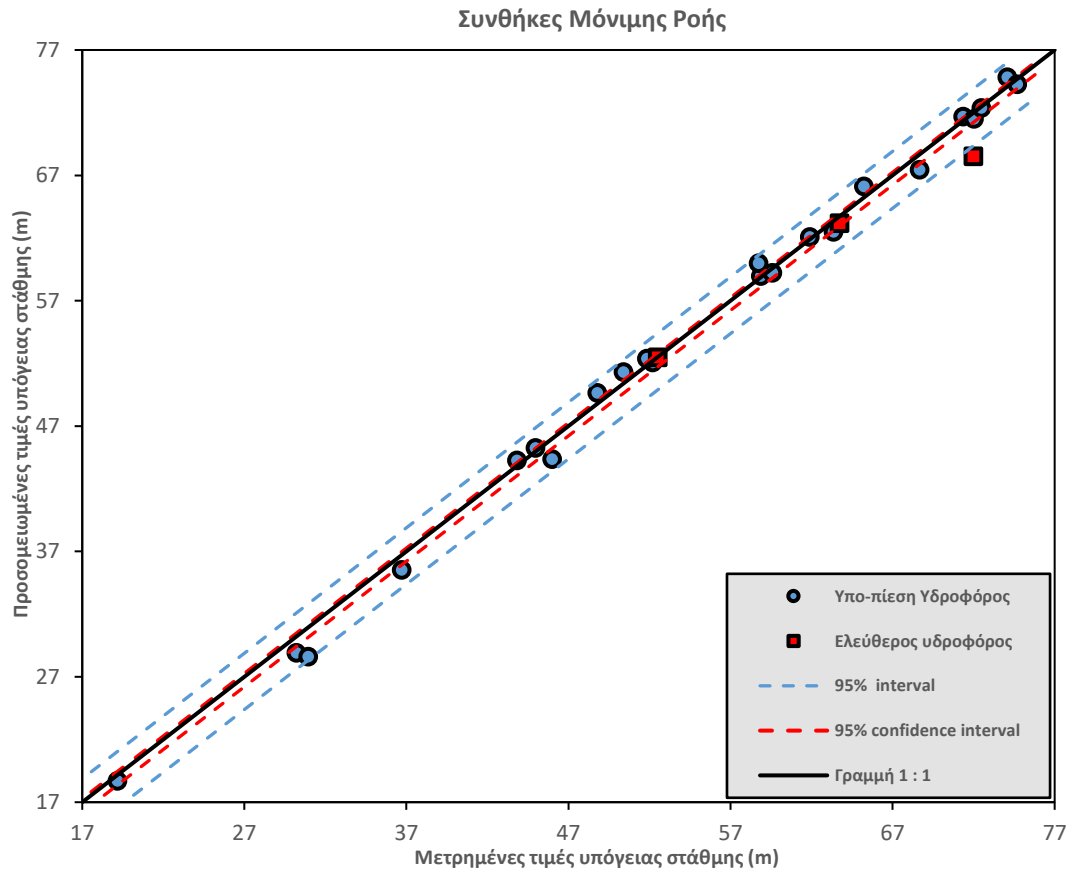
Τα αποτελέσματα της ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής παρουσιάζονται στους Πίνακες 13.2 και 13.3, στο Διάγραμμα 13.1 και στην Εικόνα 13.14, σύμφωνα με τα οποία η ταύτιση των προσομοιωμένων και των μετρημένων τιμών της υπόγειας στάθμης είναι αρκετά ικανοποιητική, καθώς πληρούνται τα κριτήρια αξιολόγησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 13.2. Τιμές των στατιστικών παραμέτρων αξιολόγησης κατά τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.

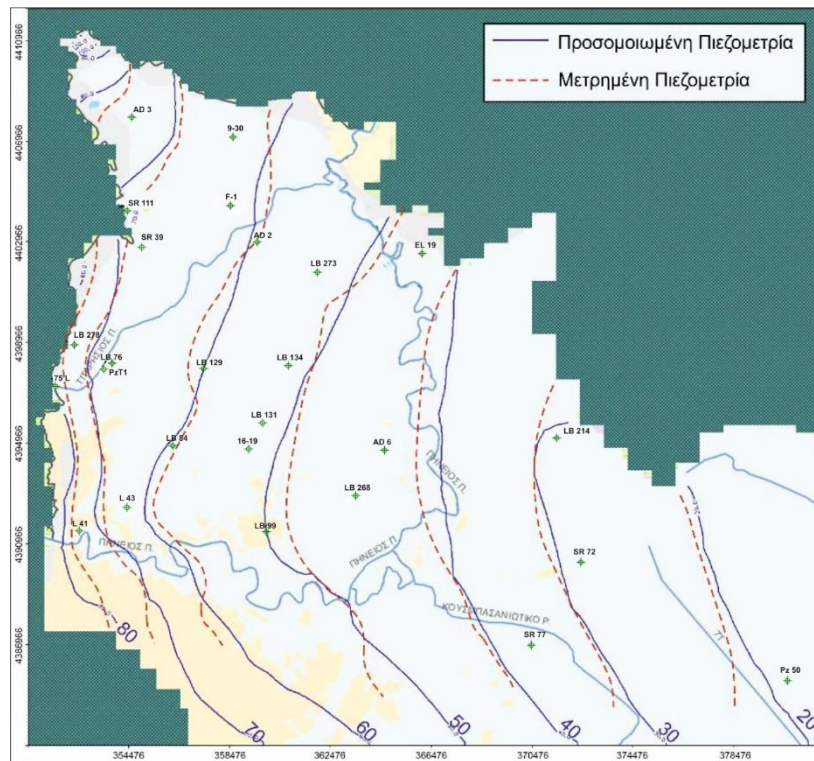
	Ρύθμιση σε μόνιμη ροή	Μονάδες
Αριθμός Μετρήσεων	26	
Συντελεστής Συσχέτισης (R^2)	0.997	
Κλίση γραμμής τάσης (α)	1.010	
Μέσο Σφάλμα (ME)	-0.333	(m)
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE)	0.818	(m)
Τυπικό Σφάλμα Εκτίμησης (SEE)	0.212	(m)
Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE)	1.113	(m)
Κανονικοποιημένο Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (NRMSE)	2.005	(%)

Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης (0.997), για τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μόνιμης ροής είναι πολύ κοντά στην τιμή 1, η οποία αντιπροσωπεύει την απόλυτη ταύτιση. Η κλίση της γραμμής τάσης των προσομοιωμένων με τις μετρημένες τιμές είναι ελαφρώς

μεγαλύτερη της μονάδας ($\alpha=1.010$), γεγονός που υποδεικνύει ότι το μοντέλο υπερεκτιμά ελάχιστα τις μετρημένες τιμές της υπόγειας στάθμης. Οι τιμές του μέσου και του μέσου απόλυτου σφάλματος (-0.333 και 0.818 αντίστοιχα) πλησιάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την τιμή 0, της απόλυτης ταύτισης. Αναφορικά με το μέσο και το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα, οι τιμές τους ήταν 1.113 m και 2.005 % αντίστοιχα, υποδηλώνοντας απόλυτα ικανοποιητική ρύθμιση, αφού το όριο αξιοπιστίας της ρύθμισης για το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 10% (Gallardo et al. 2005, Waterloo Hydrogeologic Inc. 2015). Η πολύ μικρή διασπορά των τιμών γύρω από την γραμμή της απόλυτης ταύτισης (Γραμμή 1:1, Διάγραμμα 13.1), υποδεικνύει πολύ ικανοποιητική ρύθμιση, ενώ από το ίδιο διάγραμμα φαίνεται, ότι το μοντέλο σε γενικές γραμμές, υποεκτιμά τις μικρότερες τιμές στάθμης (<40m), ενώ υπερεκτιμά τις μεγαλύτερες τιμές στάθμης (>40m). Από το σύνολο των τιμών, μία μόνο ξεφεύγει ελαφρώς από το διάστημα εμπιστοσύνης 95%, η οποία αντιστοιχεί στο πιεζόμετρο PzT1 του ελεύθερου υδροφόρου. Η τοποθεσία του συγκεκριμένου πιεζόμετρου, δίπλα ακριβώς στην κοίτη του Τιταρήσιου, ίσως είναι αυτή που επηρεάζει τη δυνατότητα μεγαλύτερης ακρίβειας στις προσομοιωμένες τιμές της υπόγειας στάθμης, δεδομένου ότι κάποιοι τοπικής κλίμακας μηχανισμοί δεν προσομοιώνονται επαρκώς από το μοντέλο. Από την Εικόνα 13.14, στην οποία φαίνεται η σύγκριση της μετρημένης με την προσομοιωμένη πιεζομετρία, προκύπτει καλή συμφωνία υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο αναπαριστά επαρκώς τις πιεζομετρικές καμπύλες και το δίκτυο ροής.



Διάγραμμα 13.1. Σύγκριση προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών υπόγειας στάθμης για τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.



Εικόνα 13.14. Σύγκριση μεταξύ της προσομοιωμένης και της μετρημένης πιεζομετρίας του υπό-πίεση υδροφόρου κατά τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.

Συγκρίνοντας τις υπολογιζόμενες με τις προσομοιωμένες τιμές των παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου (Πίνακας 13.3), προκύπτει ικανοποιητική προσέγγιση μεταξύ τους. Από τη διαφορά των πλευρικών εισροών εισόδου από το καρστικό σύστημα με τις πλευρικές εκροές από την ΝΑ επέκταση στις προσομοιωμένες τιμές, επαληθεύεται εκ νέου η σημαντική τροφοδοσία του υπόγειου υδατικού συστήματος από τα ασβεστολιθικά πετρώματα στα δυτικά όρια της υπολεκάνης. Επίσης, ουσιαστική διαφορά υπάρχει στις εισροές με τις εκροές των ποταμών, σε αντίθεση με την απλούστευση που είχε γίνει κατά τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου, όπου και είχε θεωρηθεί ότι $Q_{\text{εισροών}} = Q_{\text{εκροών}}$. Η διαφορά αυτή υποδηλώνει την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των ποταμών και του υπόγειου υδατικού συστήματος, μια επικοινωνία που όπως ειπώθηκε παρουσιάζει χωρική και εποχική μεταβολή. Τα ποτάμια και κυρίως ο Τιταρήσιος τροφοδοτεί τον υδροφόρο στα ανάντη, ενώ αντίθετα το υδατικό σύστημα εκφορτίζεται και τροφοδοτεί τους ποταμούς στα κατόντη.

Πίνακας 13.3. Σύγκριση παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου κατά τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.

		ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΑ (m ³ /y)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΑ (m ³ /y)
	ΕΙΣΡΟΕΣ (m³/y)		
Γεωτρήσεις εισροής	Q _{ιζημάτων}	1,646,789	27,039,919
	Q _{N-ND}	9,417,200	
	Q _{υποβάθρου}	1,724,625	
	Q _{οσσα}	6,166,888	
	Q _{απ.δικτύων}	1,722,932	
	Q _{επ.αρδεύσεων}	6,361,485	
Ποτάμια	Q _{εισ.ποταμών}	-	11,233,070
GHB	Q _{κάροτ}	121,818,620	127,759,896
Τροφοδοσία βροχ.	Q _{βροχ.λεκάνης}	44,848,135	44,879,300
	ΕΚΡΟΕΣ (m³/y)		
Γεωτρήσεις άντλησης	Q _{αντλ.}	127,229,706	126,175,856
Ποτάμια	Q _{εκ.ποταμών}	-	13,295,677
GHB	Q _{επέκταση}	70,777,800	70,629,328
Τροφοδοσία	-	0	0

13.4.5.2 Ρύθμιση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (Transient state calibration)

Μετά την ολοκλήρωση της ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής ακολουθεί η διαδικασία ρύθμισης και σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Με τη διαδικασία αυτή ελέγχονται και ενισχύονται, ως προς την εγκυρότητά τους, οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν στην προηγούμενη διαδικασία ρύθμισης. Οι βασικές διαφορές της διαδικασίας ρύθμισης αυτής σε σχέση με τη διαδικασία της μόνιμης ροής, αναφέρονται στη συνέχεια:

- ✓ εισέρχονται νέες παράμετροι στη διαδικασία ρύθμισης, όπως είναι η ειδική απόδοση (S_y) (για τον ελεύθερο υδροφόρο, layer 1) και ο συντελεστής ειδικής εναποθηκευτικής ικανότητας (S_s) (για τον υπο-πίεση υδροφόρο, layer 2) (Εικόνες 13.10 και 13.11),
- ✓ διερευνάται η κατανομή των εισροών και των εκροών τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Ως εκ τούτου, οι οριακές συνθήκες, η τροφοδοσία από τη βροχόπτωση, οι προσομοιωμένες μέσω γεωτρήσεων εισροές και εκροές καθώς και οι τιμές προσομοίωσης των ποταμών, μεταβάλλονται με το χρόνο,
- ✓ το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, διαχωρίζεται σε περιόδους φόρτισης (stress period), οι οποίες αποτελούν χρονικές περιόδους με σταθερές πιέσεις (stresses), π.χ. σταθερός ρυθμός άντλησης. Οι περίοδοι φόρτισης υποδιαιρούνται περαιτέρω σε χρονικά

βήματα (time steps), τα οποία έχουν μόνο μαθηματική υπόσταση και όχι κάποιο φυσικό νόημα.

Για τις ανάγκες της παρούσας προσομοίωσης επιλέχθηκε ως περίοδος ρύθμισης το χρονικό διάστημα από 01/01/2000 έως και 31/12/2012, με μηνιαίες περιόδους φόρτισης. Κάθε περίοδος φόρτισης διακριτοποιήθηκε περαιτέρω σε 10 χρονικά βήματα. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, έτσι ώστε να υπολογισθούν κάθε μία από τις χρονικά μεταβαλλόμενες εισροές και εκροές. Κατά τη χειμερινή περίοδο οι εκροές μέσω απολήψεων προέρχεται από την ύδρευση καθώς δεν υπάρχουν αρδεύσεις, ενώ τη θερινή περίοδο οι αρδευτικές ανάγκες υπέρογκα μεγάλες, ώστε οποιαδήποτε άλλη απόληψη είναι πρακτικά αμελητέα. Οι εκροές αυτές προσομοιώθηκαν με το πακέτο “wells” εισάγοντας τις γεωτρήσεις με τις συντεταγμένες τους.

Άμεση τροφοδοσία από τη βροχόπτωση

Με τη βοήθεια του μοντέλου GROWA (Kunkel and Wendland 2002) προέκυψαν 12 ψηφιακοί χάρτες (ένας για κάθε μήνα του έτους) χωρικής κατανομής του μέσου συντελεστή κατείσδυσης. Η περίοδος αναφοράς των μέσων τιμών αυτών ήταν από το 1971 έως και 2000, προκύπτοντας με αυτόν τον τρόπο ένας μεσοσταθμικός συντελεστής κατείσδυσης για κάθε μήνα. Κάθε ένας από τους αντιπροσωπευτικούς αυτούς μηνιαίους χάρτες μέσου συντελεστή κατείσδυσης, πολλαπλασιάστηκε στη συνέχεια με τη μηνιαία βροχόπτωση κάθε μήνα της περιόδου ρύθμισης. Προέκυψαν με τον τρόπο αυτό 156 νέοι ψηφιακοί χάρτες, οι οποίοι πλέον αντιπροσώπευαν την μηνιαία κατείσδυση για κάθε περίοδο φόρτισης του μοντέλου προσομοίωσης. Οι ψηφιακοί αυτοί χάρτες, με μέγεθος κελιών (100m x 100m), εμπεριείχαν μία τιμή κατείσδυσης για κάθε κελί, οπότε στην ιδανική περίπτωση θα έπρεπε να εισαχθεί ο κάθε χάρτης στην πλατφόρμα του λογισμικού MODFLOW για κάθε περίοδο φόρτισης. Ωστόσο, το πακέτο Recharge του MODFLOW, δεν επιτρέπει την εισαγωγή raster δεδομένων και ως εκ τούτου, οι παραγόμενοι αυτοί ψηφιακοί χάρτες δεν μπορούσαν να εισαχθούν με τη μορφή αυτή. Η λύση που δόθηκε στο συγκεκριμένο πρόβλημα ήταν, η τμηματοποίηση της περιοχής του μοντέλου σε ζώνες, όπως είχε γίνει και για στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου (Παράγραφος 7.6, σύμφωνα με τον Panagoroulos 1995). Για τις ζώνες αυτές, με τη βοήθεια του ArcGIS και τη μέθοδο “zonal statistics”, υπολογίσθηκε μια τιμή συντελεστή κατείσδυσης, η οποία προέκυψε από ένα μεγάλο σύνολο τιμών των αντίστοιχων κελιών που εμπεριέχονταν στην κάθε ζώνη. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε μια κατανομή της βροχόπτωσης για κάθε έναν από τους 156 μήνες της περιόδου ρύθμισης. Τελικά, δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχες χρονοσειρές για κάθε ζώνη και εισήχθησαν μέσω του πακέτου Recharge.

Σημειώνεται ότι ο συντελεστής κατείσδυσης, παρά την ορθότητα της εξαγωγής του, μπορεί να επιφέρει αποκλίσεις, για συγκεκριμένες περιόδους λόγω ιδιαίτερων υδρολογικών συνθηκών σε εκείνα τα έτη, όπου ο πραγματικός συντελεστής κατείσδυσης διαφοροποιείται από τον μεσοσταθμικό. Παρά ταύτα, η πολυετής ρύθμισή του στην

ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας (1971-2000) τον καθιστά μια πολύ καλή επιλογή για την προσομοίωση της τροφοδοσίας στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, όπου η έννοια του μοντέλου που συστάθηκε, ήταν να αποδώσει μια μέση κατάσταση.

Γεωτρήσεις άντλησης (εκροές)

Για τον υπολογισμό των χρονικά μεταβαλλόμενων αντλήσεων των γεωτρήσεων, έπρεπε αρχικά να υπολογισθούν, οι αρδευτικές ανάγκες για το σύνολο της περιοχής προσομοίωσης για κάθε ένα από τα 13 έτη ρύθμισης ξεχωριστά. Η διαδικασία για τον υπολογισμό των αρδευτικών αναγκών κάθε έτους, ήταν ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε στην περίπτωση του έτους αναφοράς 2017, όπως αυτή περιγράφηκε στην Παράγραφο 13.4.4.5. Οι συνολικές αρδευτικές ανάγκες του κάθε έτους προέκυψαν από τις επιμέρους αρδευτικές ανάγκες: (i) των τριών Τ.Ο.Ε.Β. (Αγίας Σοφίας, Τυρνάβου, Αμπελώνα), (ii) του τμήματος της κύριας περιοχής έρευνας, που δεν ανήκει σε Τ.Ο.Ε.Β. και (iii) του επιπλέον τμήματος νότια και ανατολικά του Πηνειού, που προστέθηκε για τις ανάγκες της άσκησης προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι, παρόλη την διαχρονική διακύμανση στην κατανομή των καλλιεργειών (Κεφάλαιο 3, Παράγραφος 3.4), στους υπολογισμούς των αρδευτικών αναγκών υιοθετήθηκε η διατήρηση μιας σταθερής κατάστασης στην κατανομή τους, προκειμένου να είναι πιο ασφαλής και ελεγχόμενος ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου. Επιπρόσθετα, η όποια μεταβολή στην κατανομή των καλλιεργειών δεν θεωρήθηκε σημαντικής κλίμακας, στο βαθμό που να επηρεάσει τα αποτελέσματα μιας άσκησης προσομοίωσης όπως η συγκεκριμένη. Επίσης, για κάθε έτος προσομοίωσης υπολογίσθηκε, με βάση τα μηνιαία κατακρημνίσματα κατά την αρδευτική περίοδο και τις Σχέσεις 13.14 και 13.15, η ενεργός βροχόπτωση (P_e), η οποία αφαιρέθηκε από τις υπολογιζόμενες κάθε φορά αρδευτικές ανάγκες.

Με βάση το γεγονός ότι στην περιοχή έρευνας η αρδευτική περίοδος διαρκεί συνήθως από τις πρώτες μέρες του Μαΐου (κάποιες φορές από τις τελευταίες του Απριλίου) έως και τα τέλη Σεπτεμβρίου, οι αρδευτικές ανάγκες κάθε έτους επιμερίστηκαν από το Μάιο έως και τον Σεπτέμβριο. Ο επιμερισμός δεν έγινε αναλογικά σε κάθε έναν από τους μήνες αυτούς, αλλά προέκυψε με βάση τους φυτικούς συντελεστές ανά μήνα και ανά καλλιέργεια (Παπαμιχαήλ & Μπαμπατζιμόπουλος 2015). Η διακύμανση αυτή των φυτικών συντελεστών παρουσιάζεται στον Πίνακα Π2.8 του Παραρτήματος 2. Στη συνέχεια, με βάση το ποσοστό της έκτασης της κάθε καλλιέργειας (ανά επιμέρους τμήμα της περιοχής), υπολογίζονται οι αρδευτικές ανάγκες ανά καλλιέργεια ανά περίοδο και με τη βοήθεια του μηνιαίου φυτικού συντελεστή, προκύπτει η επιμέρους μηνιαία κατανάλωση ανά καλλιέργεια και ανά τμήμα περιοχής. Γνωρίζοντας το συνολικό αριθμό των γεωτρήσεων ανά τμήμα (Τ.Ο.Ε.Β, περιοχή εκτός Τ.Ο.Ε.Β., επέκταση περιοχής), προσδίδεται αναλογικά σε κάθε καλλιέργεια (με βάση την έκταση που καταλαμβάνει) ο αντίστοιχος αριθμός γεωτρήσεων και στη συνέχεια επιμερίζεται ισομερώς πλέον, η κατανάλωση της κάθε καλλιέργειας σε κάθε γεώτρηση της περιοχής.

Αναφορικά με τη χειμερινή περίοδο η μεγάλη πίεση μέσω απολήψεων προέρχεται από την ύδρευση καθώς δεν υπάρχουν αρδεύσεις. Αντίστοιχα, τη θερινή περίοδο οι αρδευτικές ανάγκες είναι τόσο μεγάλες, ώστε οποιαδήποτε άλλη απόληψη πλην των αρδεύσεων είναι πρακτικά αμελητέα. Ο υπολογισμός των υδρευτικών αναγκών, προέκυψε χρησιμοποιώντας ως βάση αναφοράς, τις ανάγκες ύδρευσης που είχαν εξαχθεί για το 2017. Με βάση τα στατιστικά στοιχεία του πληθυσμού από την ΕΛ.ΣΤΑΤ. και τη χρήση της Εξίσωσης 7.13, εκτιμήθηκε ο πληθυσμός του συνόλου της περιοχής προσομοίωσης ανά έτος και στη συνέχεια οι υδρευτικές ανάγκες. Το σύνολο των αναγκών αυτών επιμερίσθηκε στις γεωτρήσεις ύδρευσης, των οποίων τα δεδομένα (συντεταγμένες) ήταν γνωστά από τη Διεύθυνση Υδάτων Θεσσαλίας.

Με βάση τα παραπάνω, δημιουργείται τελικά η χρονοσειρά αντλήσεων για κάθε γεώτρηση για όλη τη χρονική περίοδο της ρύθμισης. Παράδειγμα υπολογισμού της διαδικασίας που αναφέρθηκε παραπάνω, αποτυπώνεται στους Πίνακες Π2.9 έως Π2.11 του Παραρτήματος 2.

Γεωτρήσεις τροφοδοσίας συστήματος (εισροές)

Οι γεωτρήσεις τροφοδοσίας του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο ανάλυσης των οριακών συνθηκών (Παράγραφος 13.4.4.2), για την προσομοίωση των πλευρικών εισροών από το μεταμορφωμένο υπόβαθρο στα βόρεια, από τους μεσο-θεσσαλικούς λόφους στα νότια και από τους ανθρακικούς σχηματισμούς της Όσσας στα ανατολικά-ΝΑ. Η μεθοδολογία δημιουργίας της χρονοσειράς για τις γεωτρήσεις αυτές είχε ως εξής:

- i) διαχωρίστηκαν σε ομάδες, σε σχέση με τον ημερήσιο ρυθμό τροφοδοσίας τους (m^3/day), όπως αυτός είχε παγιωθεί στο προηγούμενο στάδιο ρύθμισης σε συνθήκες μόνιμης ροής (για το έτος 2017), και υπολογίσθηκε η ετήσια τροφοδοσία για κάθε γεώτρηση της κάθε ομάδας,
- ii) ο ετήσιος αυτός όγκος αντιστοιχίστηκε σε κάθε μήνα του αναφερόμενου έτους (2017), ανάλογα με την κατανομή της βροχόπτωσης του κάθε μήνα, και στη συνέχεια διαιρώντας με τις ημέρες του αντίστοιχου μήνα, προέκυψε μια ημερήσια τιμή παροχής ανηγμένη στη βροχόπτωση του μήνα.

Με τον τρόπο αυτό έγινε συσχετισμός του ετήσιου ρυθμού άντλησης μιας γεώτρησης από το στάδιο μόνιμης ροής (συνολική ετήσια ποσότητα), σε έναν ρυθμό με διακυμάνσεις ανά μήνα, ανάλογα με τα χιλιοστά βροχόπτωσης του κάθε μήνα (ίδια ετήσια ποσότητα). Η διαδικασία αυτή έλαβε χώρα αρχικά για το 2017 και στη συνέχεια, με βάση αναφοράς το έτος αυτό, εξήχθησαν και τα αντίστοιχα δεδομένα για τα υπόλοιπα έτη, ανάλογα με την μηνιαία βροχόπτωση του κάθε ένα από αυτά.

Τελικά, για κάθε ομάδα γεωτρήσεων, δημιουργήθηκαν οι χρονοσειρές 2000-2012, με μηνιαίο βήμα τροφοδοσίας. Στους Πίνακες Π2.12 και Π2.13 του Παραρτήματος 2,

παρουσιάζεται παράδειγμα υπολογισμού της ημερήσιας τροφοδοσίας κάθε γεώτρησης ανά ομάδα, για κάθε μήνα του έτους 2017. Για τα υπόλοιπα έτη ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία.

Οριακές συνθήκες General Head Boundary

Τα GHB χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες στο δυτικό και ανατολικό όριο της περιοχής προσομοίωσης. Δεδομένου ότι η αγωγιμότητα κάθε κελιού (παραμένει σταθερή) υπολογίστηκε στην προηγούμενη ρύθμιση μόνιμης ροής, μένει να υπολογισθεί η χρονική μεταβολή του φορτίου για κάθε κελί. Για τη δημιουργία της χρονοσειράς των οριακών αυτών συνθηκών (μεταβλητού φορτίου και ροής), ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

i) τόσο για το δυτικό όσο και για το ανατολικό όριο, επιλέχθηκε μια κοντινή σε αυτά γεώτρηση με ικανοποιητική χρονοσειρά δεδομένων (μηνιαία) για το διάστημα 2000-2012, ως γεώτρηση αναφοράς για το καθένα,

ii) αφού επιλέχθηκε η γεώτρηση αναφοράς, ορίστηκε το κοντινότερο σε αυτή κελί του πλέγματος με οριακή συνθήκη GHB, ως κελί αναφοράς για το όριο αυτό,

iii) υπολογίστηκε η διαφορά της τιμής του φορτίου του κελιού αυτού για τον Σεπτέμβριο του 2017 (αρχικές συνθήκες σε steady state), με την τιμή της στάθμης της γεώτρησης για τον ίδιο μήνα,

iv) με βάση τη διαφορά αυτή μετασχηματίστηκε όλη η χρονοσειρά (μηνιαία) της γεώτρησης και η νέα προκύπτουσα χρονοσειρά αποτέλεσε τη χρονοσειρά του κελιού αναφοράς,

v) από τη νέα αυτή χρονοσειρά του κελιού αναφοράς, υπολογίστηκε η διαφορά της τιμής του φορτίου κάθε μήνα, από την τιμή του φορτίου του Σεπτεμβρίου του 2017. Η διαφορά ανά μήνα που προκύπτει, προστέθηκε στις τιμές του Σεπτεμβρίου του 2017 όλων των κελιών, που αποτελούν το GHB, για να προκύψει η αντίστοιχη τιμή του συγκεκριμένου μήνα.

Με τη διαδικασία αυτή προέκυψαν οι χρονοσειρές με μηνιαία βήματα για κάθε κελί των οριακών συνθηκών GHB, στο δυτικό και ανατολικό όριο της περιοχής.

Οριακή συνθήκη ποταμών

Αναφορικά με τα δύο ποτάμια, διατηρώντας την αγωγιμότητα κάθε κελιού των αποθέσεων της κοίτης σταθερή, σε σχέση με τη ρύθμιση μόνιμης ροής και κάνοντας τη θεώρηση, ότι το βάθος της βάσης των αποθέσεων κοίτης δεν μεταβάλλεται για τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης, η μεταβλητή που πρέπει να υπολογισθεί σε σχέση με το χρόνο, είναι το ύψος της στάθμης για κάθε κελί.

Και στην περίπτωση αυτή, τα κελιά που αποτελούν τις κοίτες των δυο ποταμών ομαδοποιούνται με βάση την τιμή τους ύψους στάθμης, που είχαν κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε μόνιμη ροή. Στη συνέχεια, συσχετίζεται η τιμή του ύψους στάθμης κάθε ομάδας με τη μηνιαία βροχόπτωση του 2017 (έτος ρύθμισης μόνιμης ροής) και ανάγεται πλέον η τιμή του ύψους στάθμης της ομάδας αυτής σε όλους τους μήνες, για το χρονικό διάστημα 2000-2012, με βάση πάντα τη μηνιαία κατανομή των βροχοπτώσεων.

Με βάση τα παραπάνω, δημιουργήθηκε η χρονοσειρά ύψους στάθμης για κάθε ομάδα κελιών και στη συνέχεια, σε κάθε μεμονωμένο κελί αντιστοιχίστηκε η χρονοσειρά της ομάδας στην οποία ανήκει.

Στην περίπτωση αυτή της οριακής συνθήκης ποταμών έγιναν οι εξής θεωρήσεις:

α) στις περιπτώσεις μηδενικής μηνιαίας βροχόπτωσης το ύψος στάθμης έπαιρνε ταυτόχρονα της τιμή 0.01 m για τον Τιταρήσιο, ως ελάχιστο απαιτούμενο ύψος, και 0.10 m για τον Πηνειό,

β) στην περίπτωση πολύ έντονων βροχοπτώσεων και ως εκ τούτου πολύ μεγάλου ύψους μηνιαίας τιμής βροχόπτωσης, ορίστηκε ανώτατο ύψος στάθμης ώστε να αποφευχθεί η απόδοση μη λογικών τιμών. Έτσι, ορίστηκε μέγιστο ύψος στάθμης τα 3 m για τον Πηνειό και 0.60 m για τον Τιταρήσιο με βάση της ανώτατες τιμές που έχουν καταγραφεί τα τελευταία χρόνια (Ι.Ε.Υ.Π. 2015 και 2020),

γ) λόγω της μεγάλης διηθητικότητας της κοίτης του Τιταρήσιου και της έντονης εξάτμισης το καλοκαίρι, για τους καλοκαιρινούς μήνες με τιμή βροχόπτωσης <15mm, το ύψος στάθμης του Τιταρήσιου έπαιρνε αυτόματα την ελάχιστη τιμή 0.01 m.

Αποτελέσματα ρύθμισης μη μόνιμης ροής

Τα αποτελέσματα της ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.4, στο Διάγραμμα 13.2 και στις Εικόνες 13.15 και 13.16 που ακολουθούν.

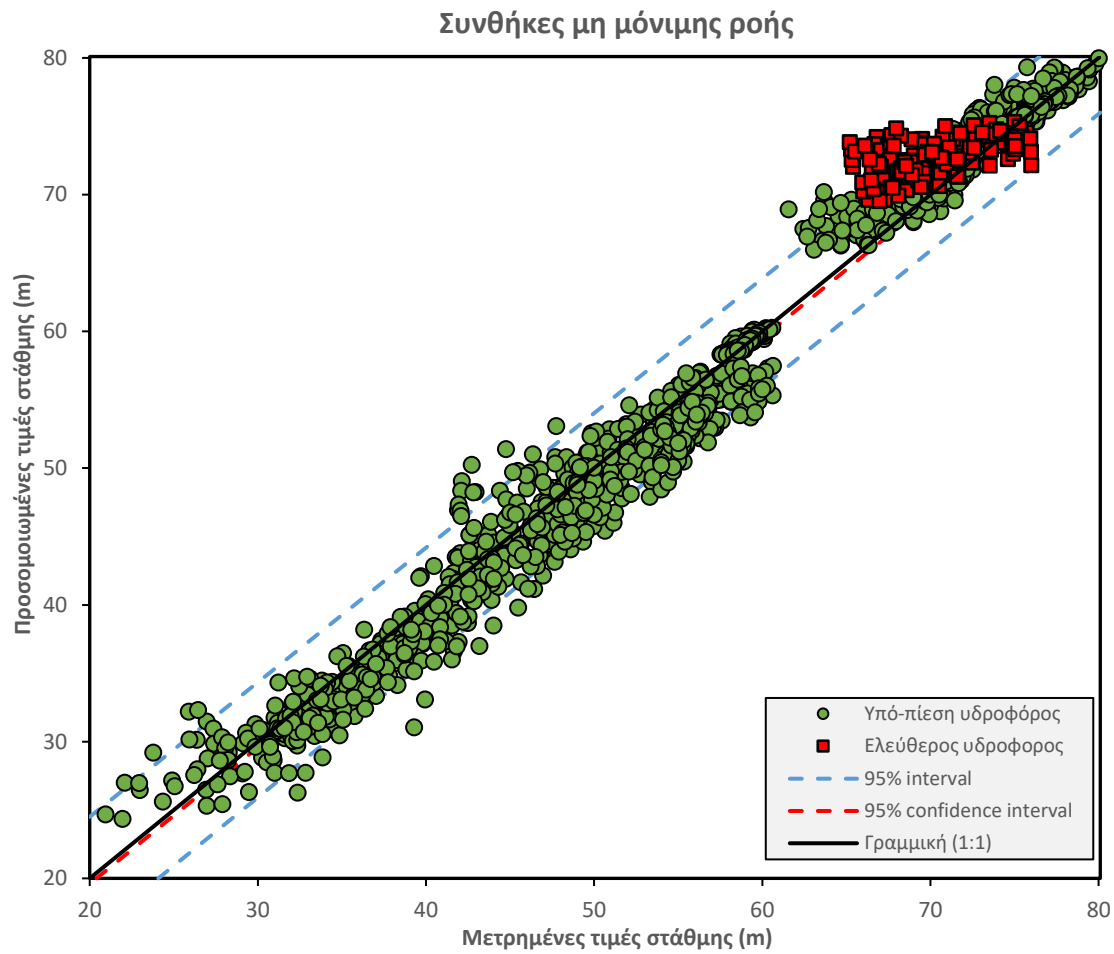
Η ανάλυση των στατιστικών παραμέτρων ρύθμισης, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.4, προέκυψε από ένα σύνολο 1872 μετρήσεων (156 stress period x 12 γεωτρήσεις παρατήρησης) μεταξύ προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών στάθμης. Ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) για τη ρύθμιση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής ήταν 0.991, τιμή πολύ κοντά στην τιμή απόλυτης ταύτισης ($R^2=1$), γεγονός που υποδεικνύει ικανοποιητική ρύθμιση (Boonstra & De Ridder 1981, Masoumi et al. 2021). Η κλίση της γραμμής τάσης των προσομοιωμένων με τις μετρημένες τιμές είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της μονάδας ($\alpha=1.004$), γεγονός που υποδεικνύει ότι το μοντέλο υπερεκτιμά ελάχιστα τις μετρημένες τιμές της υπόγειας στάθμης. Οι τιμές του μέσου και του μέσου απόλυτου σφάλματος (0.120 και 1.535 αντίστοιχα) πλησιάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την τιμή 0, της απόλυτης ταύτισης. Αναφορικά με το μέσο και το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα, οι τιμές τους ήταν 2.119 m και 3.533 % αντίστοιχα, υποδηλώνοντας απόλυτα ικανοποιητική

ρύθμιση, αφού το όριο αξιοπιστίας της ρύθμισης για το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 10% (Gallardo et al. 2005, Waterloo Hydrogeologic Inc. 2015). Η πολύ μικρή διασπορά των τιμών γύρω από την γραμμή της απόλυτης ταύτισης (Γραμμή 1:1, Διάγραμμα 13.2), υποδεικνύει πολύ ικανοποιητική ρύθμιση, ενώ από το ίδιο διάγραμμα φαίνεται, ότι το μοντέλο σε γενικές γραμμές, υποεκτιμά τις μικρότερες τιμές στάθμης (<60m) ενώ υπερεκτιμά τις μεγαλύτερες τιμές στάθμης (>60m).

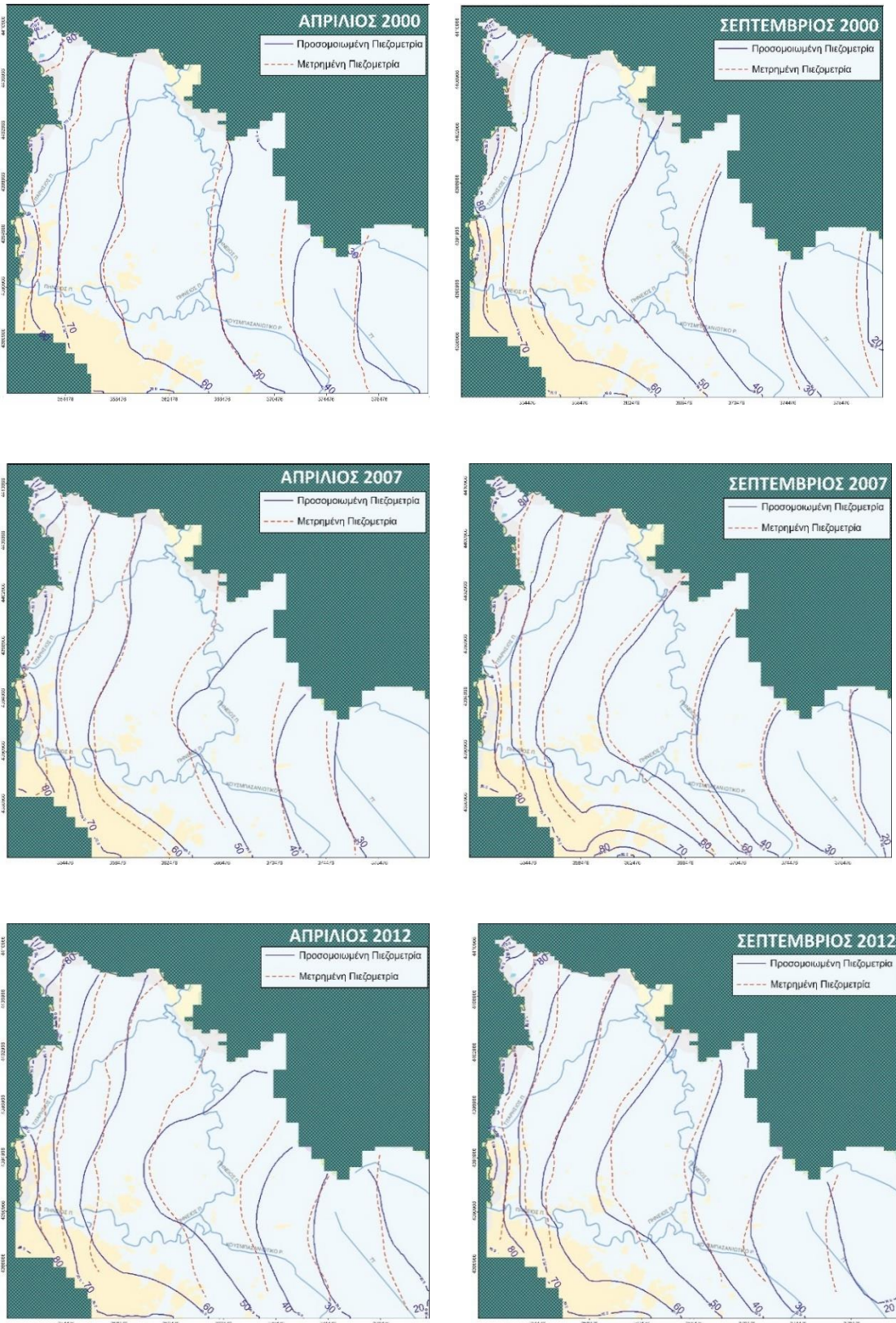
Στην Εικόνα 13.15 παρουσιάζεται η σύγκριση των πιεζομετρικών χαρτών της μετρημένης με την προσομοιωμένη στάθμη, για τις υγρές και ξηρές περιόδους, στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Οι πιεζομετρικές καμπύλες παρουσιάζουν ικανοποιητική ταύτιση, λαμβάνοντας υπόψη και το μεγάλο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, σε μια περιοχή με εναλλαγές περιόδων εντατικών αντλήσεων και περιόδων ηρεμίας. Η γενική μορφή των συγκρινόμενων πιεζομετρικών καμπυλών, βάσει της Εικόνας 13.15, υποδηλώνει ότι το μοντέλο αναπαριστά επαρκώς την κατανομή του φορτίου και τα δίκτυα ροής.

Πίνακας 13.4. Τιμές των στατιστικών παραμέτρων αξιολόγησης κατά τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.

	Ρύθμιση σε μόνιμη ροή	Μονάδες
Αριθμός Μετρήσεων	1872	
Συντελεστής Συσχέτισης (R ²)	0.991	
Κλίση γραμμής τάσης (α)	1.004	
Μέσο Σφάλμα (ME)	0.120	(m)
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE)	1.535	(m)
Τυπικό Σφάλμα Εκτίμησης (SEE)	0.045	(m)
Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE)	2.119	(m)
Κανονικοποιημένο Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (NRMSE)	3.533	(%)



Διάγραμμα 13.2. Σύγκριση προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών υπόγειας στάθμης για τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.



Εικόνα 13.15. Σύγκριση μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρημένων τιμών πιεζομετρίας του υπό- πίεση υδροφόρου κατά τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.

Στα Διαγράμματα 13.3 και 13.4 παρουσιάζονται τέσσερα (4) αντιπροσωπευτικά υδρογραφήματα γεωτρήσεων του υπό-πίεση υδροφόρου (Εικόνα 13.14), όπου οι συνεχόμενες καταγεγραμμένες τιμές παρακολούθησης στάθμης, μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Στα Διαγράμματα Π2.1 έως Π2.8 του Παραρτήματος 2, παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα των υπόλοιπων γεωτρήσεων και πιεζόμετρων παρατήρησης. Από τη μελέτη του συνόλου των υδρογραφημάτων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

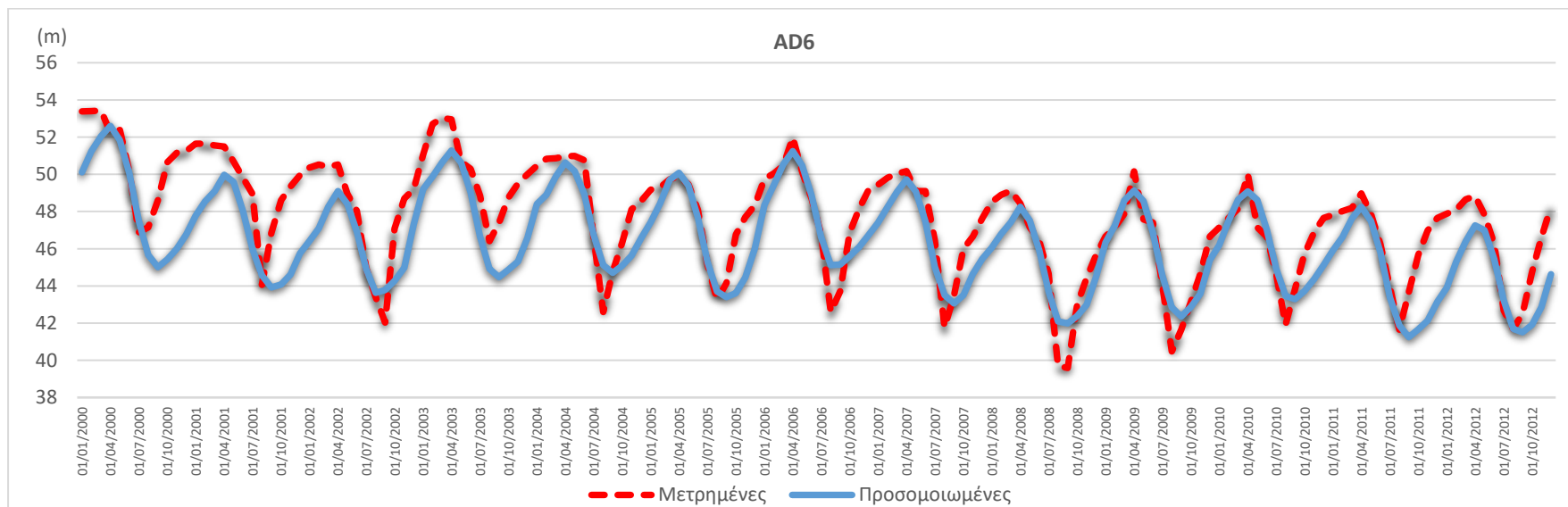
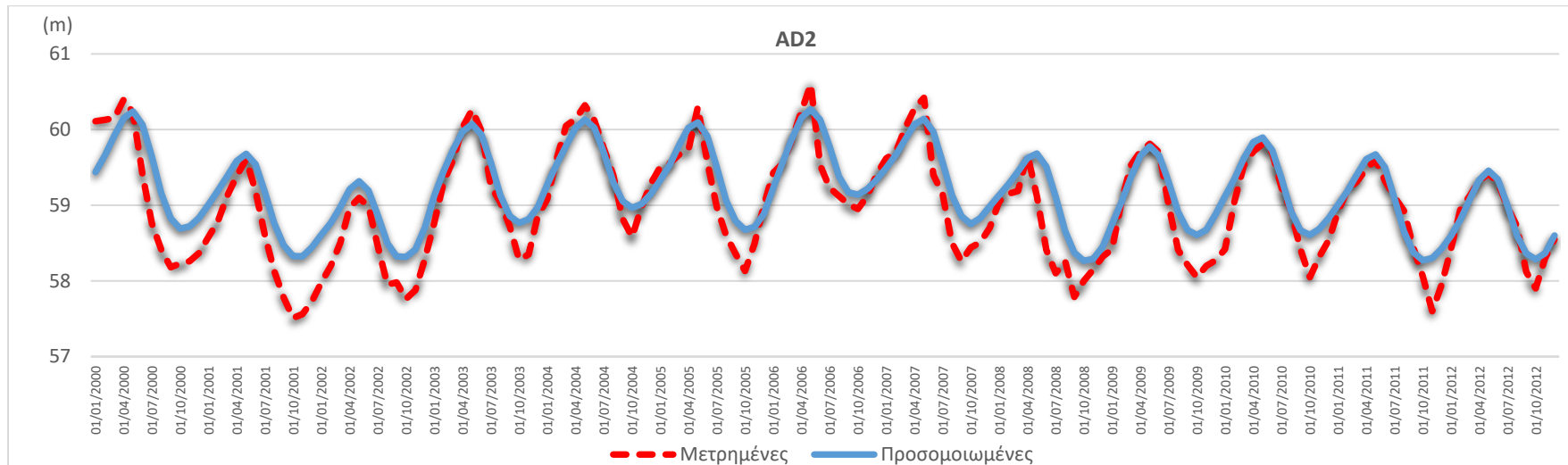
✓ Κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, τα παραγόμενα φορτία από το μοντέλο, ταιριάζουν ικανοποιητικά με τα δεδομένα πεδίου και είναι σε θέση να αναπαράγουν την παρατηρούμενη τάση, υποδηλώνοντας έτσι την ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώνει με ακρίβεια την εξέλιξη του συστήματος. Υπάρχουν μικρές αποκλίσεις, ωστόσο θεωρούνται ασήμαντες λόγω της τυχαίας εμφάνισής τους αλλά και της πιθανής εξωτερικής, σε σχέση με το μοντέλο και το σύστημα ροής των υπόγειων υδάτων, προέλευσής τους (π.χ. αστοχίες πρωτογενών μετρήσεων, διαφορετικές πηγές δεδομένων, ελλιπής χωρική κατανομή πρωτογενών δεδομένων).

✓ Τη σημαντικότερη απόκλιση, μεταξύ προσομοιωμένης και καταγεγραμμένης χρονοσειράς, από τις θέσεις παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης, παρουσιάζει το πιεζόμετρο PzT1 (Διάγραμμα Π2.8, Παράρτημα 2). Όπως ειπώθηκε και στο στάδιο ρύθμισης με συνθήκες μόνιμης ροής, το πιεζόμετρο αυτό αφορά τον ελεύθερο υδροφόρο. Το ιδιαίτερο καθεστώς που διέπει την επιφανειακή ελεύθερη υδροφορία με τους συνεχόμενους μεταβλητούς ρυθμούς τροφοδοσίας της, οι εναλλαγές περιόδων κορεσμού και περιόδων εξάντλησής της και η άμεση συσχέτιση του συγκεκριμένου πιεζόμετρου από την κατάσταση του Τιταρήσιου, είναι τα πιθανά αίτια που επηρεάζουν τη δυνατότητα μεγαλύτερης ακρίβειας στις προσομοιωμένες τιμές της υπόγειας στάθμης, δεδομένου ότι κάποιοι τοπικής κλίμακας μηχανισμοί δεν προσομοιώνονται επαρκώς από το μοντέλο. Σε αυτά συνυπολογίζεται και το γεγονός ότι η χρονοσειρά του συγκεκριμένου πιεζόμετρου παρουσίαζε αρκετές ελλείψεις, όμως λόγω της μη ύπαρξης άλλων πιεζόμετρων με ικανοποιητικότερα δεδομένα στάθμης, αναφορικά με την ελεύθερη υδροφορία, ήταν αυτό που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.

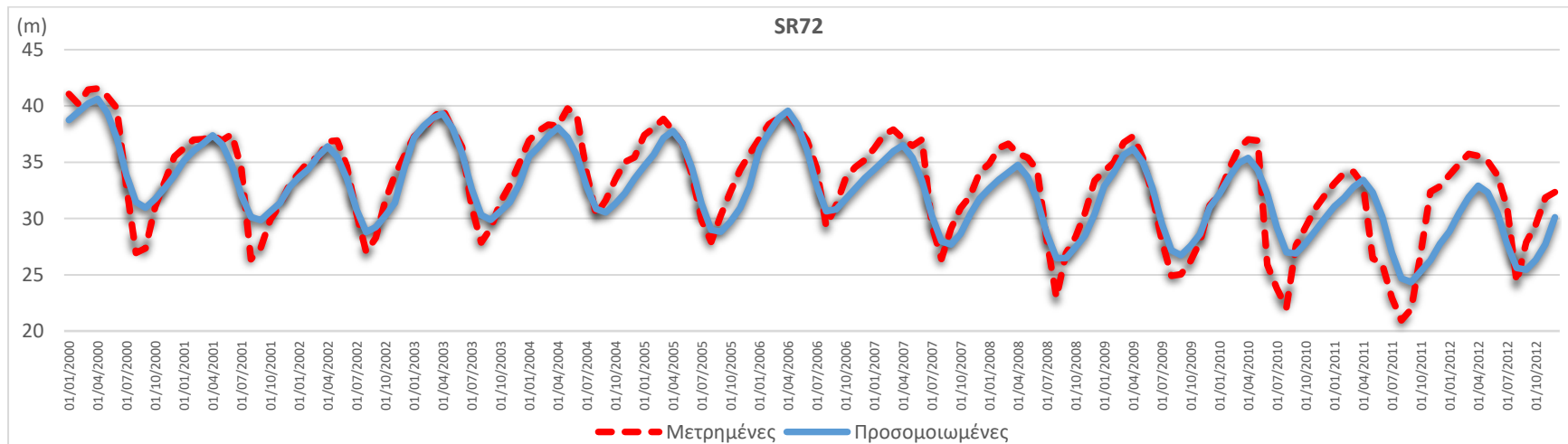
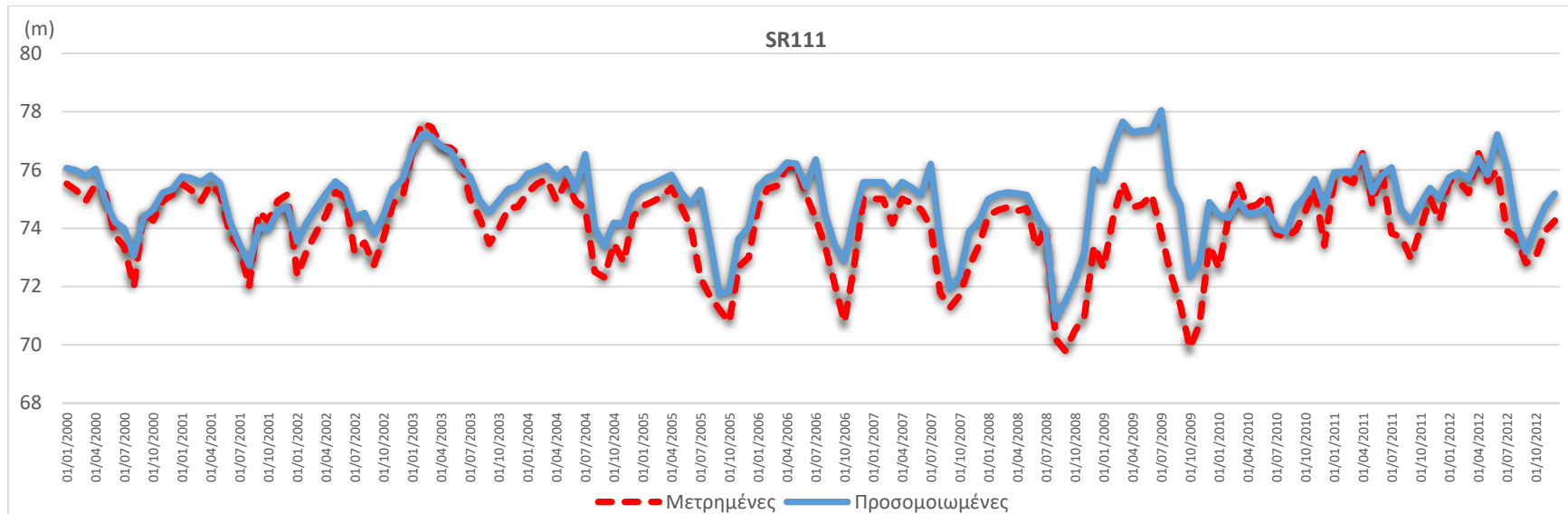
✓ Ορισμένες από τις γεωτρήσεις παρακολούθησης αντλούνταν έντονα, κατά τη διάρκεια των περιόδων άρδευσης, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν σημαντικές διαχρονικές ταλαντώσεις των μετρημένων φορτίων, όπως π.χ. απεικονίζεται στα υδρογραφήματα των γεωτρήσεων LB99 και SR39 (Διαγράμματα Π2.5 και Π2.6). Αυτές οι διακυμάνσεις τοπικού χαρακτήρα ως αποτέλεσμα των αντλήσεων ωστόσο, είναι δύσκολο να προσομοιωθούν σε ένα μοντέλο ροής υπόγειων υδάτων περιφερειακής κλίμακας.

✓ Σαν γενική εικόνα, η οποία αποτυπώνεται στα περισσότερα των υδρογραφημάτων, η σύγκριση των χρονοσειρών (μετρημένων-προσομοιωμένων) αποδίδει καλή ταύτιση των τάσεων αλλά και του εύρους κύμανσης της στάθμης, λαμβάνοντας υπόψη και τη μεγάλη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά και τους εξωγενείς παράγοντες επιρροής. Εξάλλου, η

έννοια του μοντέλου αυτού, που συστάθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, ήταν να αποδώσει μια μέση κατάσταση και με αυτή τη λογική χρησιμοποιήθηκε. Για τις προκύπτουσες ατέλειές του, έγινε προσπάθεια εξομάλυνσή τους με αντίστοιχες διορθωτικές κινήσεις. Ως παράδειγμα, μπορεί να αναφερθεί η μέθοδος εισαγωγής της τροφοδοσίας από την απευθείας κατείσδυση λόγω βροχόπτωσης. Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου GROWA, το οποίο προσομοίωσε περίοδο τριακονταετίας, προέκυψε ένας μεσοσταθμικός συντελεστής κατείσδυσης για κάθε μήνα. Ο συντελεστής αυτός, παρά την ορθότητα της εξαγωγής του, όπως ειπώθηκε, μπορεί να εμπεριέχει και αποκλίσεις στις περιπτώσεις όπου ο πραγματικός συντελεστής κατείσδυσης διαφοροποιείται από τον μεσοσταθμικό. Στις αποκλίσεις αυτές πιθανότατα να οφείλονται και ορισμένες από τις έντονες διαφοροποιήσεις, που παρατηρούνται μεταξύ των μετρημένων και των προσομοιωμένων τιμών υπόγειας στάθμης, καθώς ο παράγοντας Recharge είναι καθοριστικός για τέτοιου είδους διαφοροποιήσεις.



Διάγραμμα 13.3. Χαρακτηριστικά υδρογραφήματα γεωτρήσεων, τα οποία προέκυψαν κατά το στάδιο ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.



Διάγραμμα 13.4. Χαρακτηριστικά υδρογραφήματα γεωτρήσεων, τα οποία προέκυψαν κατά το στάδιο ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.

Στον Πίνακα 13.5 παρουσιάζονται οι παράγοντες του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής έρευνας για τη χρονική περίοδο 2000-2012 και για συνθήκες μη μόνιμης ροής, ενώ στο Διάγραμμα 13.5 αποδίδονται γραφικά οι παράγοντες αυτοί. Σχετικά με τον αποθηκευμένο όγκο νερού διευκρινίζεται ότι, στις εισροές αναφέρεται η μείωση του αποθηκευτικού όγκου νερού, καθώς το πρόσημο των απολήψιμων ποσοτήτων νερού από αυτό που είναι αποθηκευμένο στο υδατικό σύστημα είναι θετικό στις εξισώσεις του αριθμητικού μοντέλου και για το λόγο αυτό υπολογίζονται ως εισροές (McDonald & Harbaugh 1988, Πισινάρας 2008). Το αντίθετο ισχύει με τις εισερχόμενες ποσότητες αποθηκευμένου νερού, οι οποίες έχουν αρνητικό πρόσημο στις εξισώσεις και ως εκ τούτου λογίζονται ως εκροές. Με βάση το γεγονός αυτό, ο αποθηκευμένος όγκος νερού του υδατικού συστήματος μειώνεται κατά 3.26% κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου προσομοίωσης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, οι πλευρικές εισροές (άθροισμα γεωτρήσεων και GHB, εισροών) αποτελούν κυρίαρχο παράγοντα τροφοδοσίας του συστήματος, με το μεγαλύτερο ποσοστό της ποσότητας αυτής να προέρχεται από το καρστικό σύστημα του δυτικού περιθωρίου (GHB εισροών). Σημαντικότερες είναι και οι πλευρικές εκροές από το σύστημα (GHB εκροών), οι οποίες οφείλονται στις υδραυλικές κλίσεις που δημιουργούνται προς το ΝΑ τμήμα της περιοχής προσομοίωσης, αναγκάζοντας έτσι μεγάλες ποσότητες νερού να εξέρχονται από την περιοχή. Λαμβάνοντας υπόψη και τις τεράστιες ποσότητες αντλήσεων (γεωτρήσεις εκροών), οι κλίσεις αυτές αυξάνονται κατά την περίοδο των αρδεύσεων και ως εκ τούτου και οι πλευρικές εκροές παρουσιάζονται μεγαλύτερες κατά τις περιόδους αυτές.

Πίνακας 13.5. Υδατικό ισοζύγιο του υδατικού συστήματος της περιοχής έρευνας για την περίοδο 2000-2012.

	ΕΙΣΡΟΕΣ	ΕΚΡΟΕΣ
Αποθηκευμένος όγκος νερού	1,302,546,008	1,260,025,816
Γεωτρήσεις	253,254,582	1,681,007,131
Ποτάμια	133,468,849	86,886,784
GHB	1,881,628,254	1,047,954,008
Τροφοδοσία	504,700,746	0
ΣΥΝΟΛΟ	4,075,598,417	4,075,873,415



Διάγραμμα 13.5. Γραφική απεικόνιση του υδατικού ισοζυγίου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (2000-2012).

13.4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Με τον όρο ευαισθησία ενός μοντέλου νοείται, η προκύπτουσα μεταβολή της τιμής μιας ή περισσοτέρων μεταβλητών, που υπολογίζονται από το μοντέλο εξαιτίας της μεταβολής σε μία ή περισσότερες παραμέτρους, που εισάγονται στο μοντέλο. Στην προκειμένη περίπτωση, πώς μεταβάλλεται το υδραυλικό φορτίο, αφού αυτό είναι που υποδεικνύει τη συμπεριφορά του μοντέλου, σε πιθανές μεταβολές των τιμών των υδραυλικών παραμέτρων ή των οριακών συνθηκών, αφού αυτές είναι οι βασικές παράμετροι εισαγωγής στο μοντέλο. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι μία ποσοτική εκτίμηση της αβεβαιότητας του εύρους των μεταβολών των δεδομένων εισόδου στο βαθμό ρύθμισης του μοντέλου (ASTM D5611-94, Shu, 2007) και πραγματοποιείται μετά τη ρύθμιση του μοντέλου.

Κατά τη διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας, αρχικά επιλέγονται οι παράμετροι, οι οποίες θα μεταβληθούν. Στη συνέχεια, οι συγκεκριμένες παράμετροι μεταβάλλονται σε καθορισμένα όρια και το μαθηματικό μοντέλο εκτελείται. Στο τέλος της διαδικασίας, καταγράφονται οι τιμές των μεταβλητών για κάθε όριο μεταβολής της παραμέτρου και στη συνέχεια απεικονίζονται γραφικά.

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (K), η ειδική απόδοση (S_y) και ο συντελεστής ειδικής εναποθηκευτικής ικανότητας (S_s), ενώ καταγράφηκε η μεταβολή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS), του κανονικοποιημένου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMS) και του συντελεστή συσχέτισης (R^2). Οι ρυθμισμένες τιμές των παραμέτρων μεταβλήθηκαν σε ποσοστιαία κλίμακα από -50% έως και 100% και τα αποτελέσματα της ανάλυσης

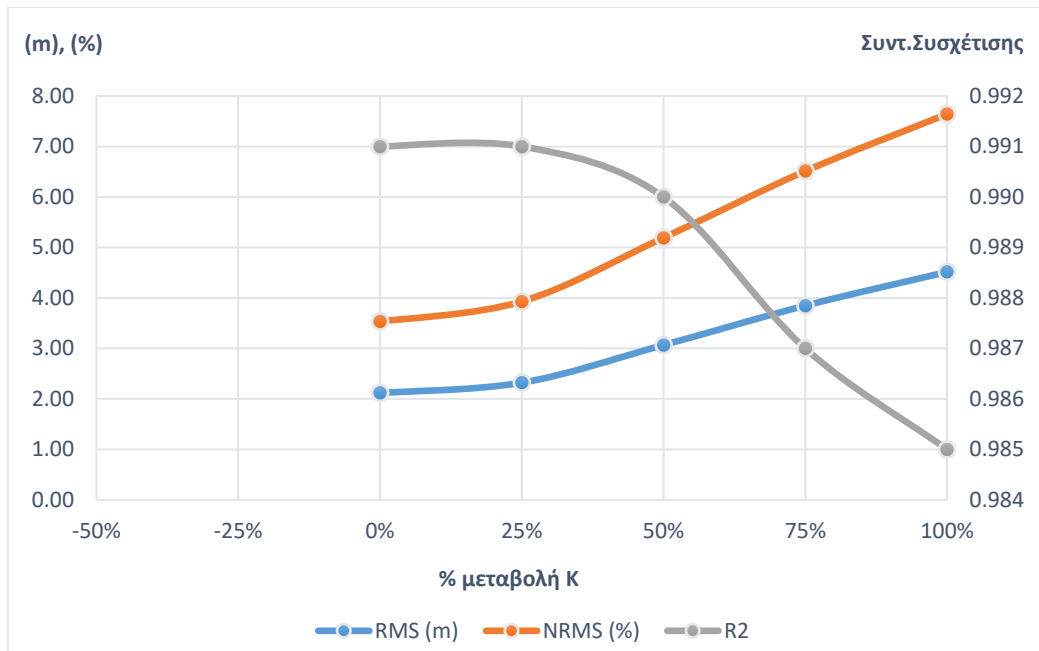
ευαισθησίας απεικονίζονται στο Διάγραμμα 13.6 για τη μεταβολή του K και στο Διάγραμμα 13.7 για τη μεταβολή των S_y - S_s . Σημειώνεται ότι οι μεταβολές των K , S_s και S_y που πραγματοποιήθηκαν, εφαρμόστηκαν στο σύνολο των τιμών, σύμφωνα με τη χωρική κατανομή των παραμέτρων αυτών, όπως αυτή παρουσιάστηκε στις Εικόνες 13.8 έως 13.11.

Με βάση το Διάγραμμα 13.6 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

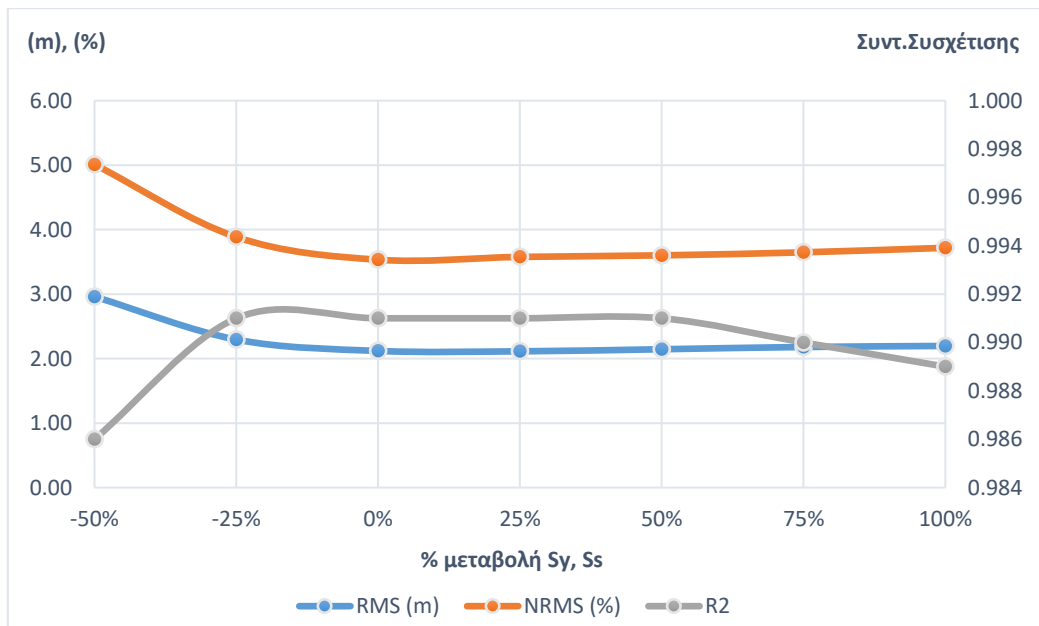
- (i) μεταβάλλοντας τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας έως -50%, το μαθηματικό μοντέλο δεν ολοκληρώνει τη διαδικασία εκτέλεσης του,
- (ii) μεταβάλλοντας τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας έως 25%, αυξάνεται το RMS και το NRMS, ενώ μεγαλύτερες αυξήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας (έως 100%) σηματοδοτούν πιο έντονη αύξηση των RMS και NRMS αντίστοιχα,
- (iii) μεταβάλλοντας τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας έως 25%, ο συντελεστής συσχέτισης δεν μεταβάλλεται, ενώ μεγαλύτερες αυξήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας (έως 100%) έχουν ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση του συντελεστή συσχέτισης.

Από το Διάγραμμα 13.7, μπορούν αντίστοιχα να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- (i) μεταβάλλοντας τις τιμές των S_y και S_s έως -50%, αυξάνεται το RMS και το NRMS,
- (ii) μεταβάλλοντας τις τιμές των S_y και S_s έως 100%, το RMS και το NRMS παρουσιάζουν μια ελάχιστη αύξηση,
- (iii) ο συντελεστής συσχέτισης είναι πρακτικά σταθερός για το εύρος κύμανσης των S_y και S_s από -25% έως 50%, μειώνεται απότομα από -25% έως -50% ενώ η πτώση είναι ηπιότερη για το εύρος τιμών από 50%-100%.



Διάγραμμα 13.6. Γραφική απεικόνιση των μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS), του κανονικοποιημένου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMS) και του συντελεστή συσχέτισης (R^2) σε σχέση με τη μεταβολή του Κ.



Διάγραμμα 13.7. Γραφική απεικόνιση των μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS), του κανονικοποιημένου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMS) και του συντελεστή συσχέτισης (R^2) σε σχέση με τη μεταβολή των S_s και S_γ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι, το συγκεκριμένο μοντέλο με τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν και τον τρόπο σύνθεσής του, είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς η μεταβολή της, είτε αυξάνει το σφάλμα μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών (αύξηση του Κ)

είτε καθιστά αδύνατη την επίλυσή του (μείωση του K). Αναφορικά με τα S_y και S_s , το μοντέλο παρουσιάζεται λιγότερο ευαίσθητο, ειδικά εντός του εύρους κύμανσης -25% έως 50%, των αρχικών ρυθμισμένων τιμών τους.

13.4.7 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η ρύθμιση του μοντέλου με βάση ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων, δεν εξασφαλίζει απαραίτητα και τη μοναδικότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου (ASTM D5447-93, Πισινάρας 2008). Για το λόγο αυτό και προκειμένου να περιοριστεί ακόμα περισσότερο η πιθανότητα ύπαρξης μη μοναδικότητας των αποτελεσμάτων, τα παραγόμενα από τη ρύθμιση αποτελέσματα συγκρίνονται με ένα άλλο σύνολο δεδομένων πεδίου. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται επαλήθευση (verification) του μοντέλου και η σημασία της έγκειται στο ότι προσδίδει υψηλότερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου.

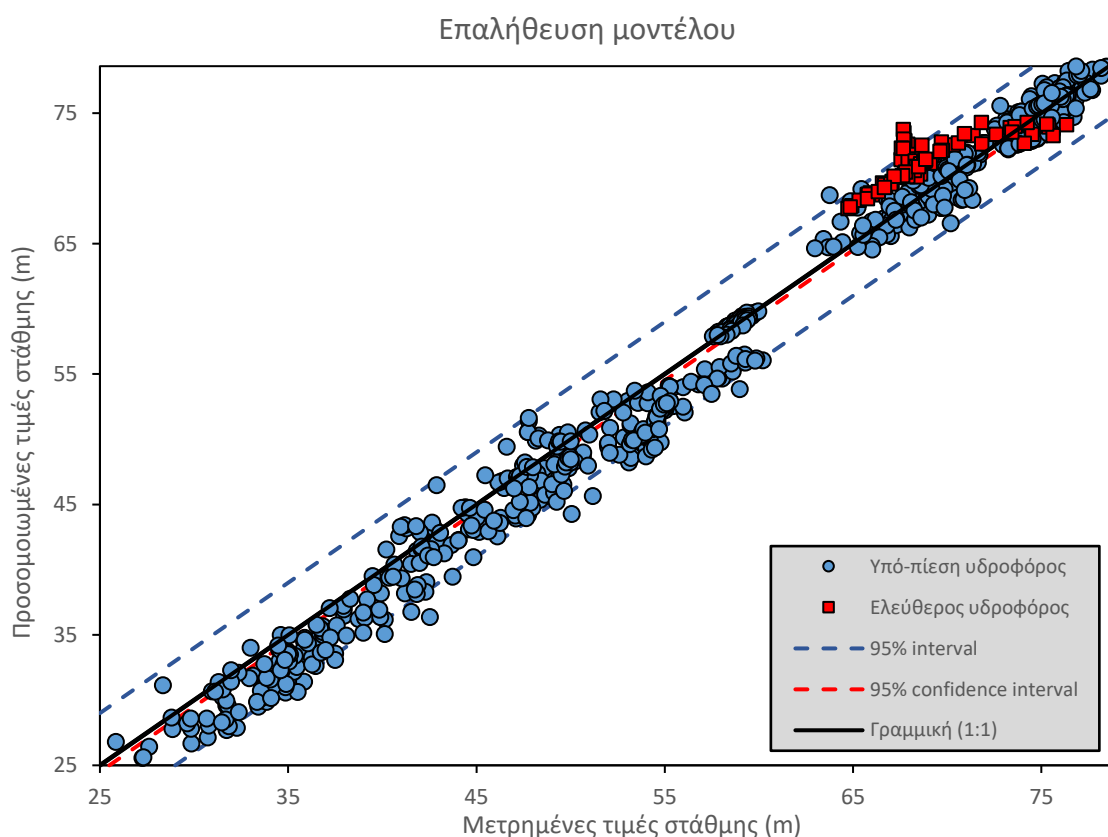
Στη παρούσα έρευνα η επαλήθευση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα 2013-2018, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και οι πρωτογενείς μετρήσεις της υπόγειας στάθμης, που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διατριβής (2016-2018). Έτσι διατηρώντας τις ίδιες οριακές συνθήκες και τις ίδιες τιμές υδραυλικών παραμέτρων, το μοντέλο εκτελέσθηκε εκ νέου για το χρονικό διάστημα από 01/01/2013 έως και 31/12/2018, με μηνιαίες περιόδους φόρτισης. Κάθε περίοδος φόρτισης διακριτοποιήθηκε και σε αυτή την περίπτωση, σε 10 χρονικά βήματα. Κατά την επαλήθευση χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες στατιστικές και γραφικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν και κατά τη ρύθμιση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας επαλήθευσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.6, στο Διάγραμμα 13.8 και την Εικόνα 13.16.

Η ανάλυση των στατιστικών παραμέτρων επαλήθευσης (Πίνακας 13.5), προέκυψε από ένα σύνολο 864 μετρήσεων (72 stress period x 12 γεωτρήσεις παρατήρησης) μεταξύ προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών στάθμης. Ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) για τη περίοδο επαλήθευσης ήταν 0.993, τιμή πολύ κοντά στην τιμή απόλυτης ταύτισης ($R^2=1$), γεγονός που υποδεικνύει ικανοποιητική διαδικασία επαλήθευσης (Boonstra & De Ridder 1981, Masoumi et al. 2021). Η κλίση της γραμμής τάσης των προσομοιωμένων με τις μετρημένες τιμές είναι ελαφρώς μικρότερη της μονάδας ($\alpha=0.994$), γεγονός που υποδεικνύει ότι το μοντέλο υποεκτιμά ελάχιστα τις μετρημένες τιμές της υπόγειας στάθμης. Οι τιμές του μέσου και του μέσου απόλυτου σφάλματος (-0.575 και 1.541 αντίστοιχα) πλησιάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την τιμή 0, της απόλυτης ταύτισης. Αναφορικά με το μέσο και το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα, οι τιμές τους ήταν 2.010 m και 3.379 % αντίστοιχα, υποδηλώνοντας απόλυτα ικανοποιητική ρύθμιση, αφού το όριο αξιοπιστίας της ρύθμισης για το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 10% (Gallardo et

al. 2005, Waterloo Hydrogeologic Inc. 2015). Η πολύ μικρή διασπορά των τιμών γύρω από την γραμμή της απόλυτης ταύτισης (Γραμμή 1:1, Διάγραμμα 13.8), υποδεικνύει πολύ ικανοποιητική ρύθμιση ενώ από το ίδιο διάγραμμα φαίνεται, ότι το μοντέλο σε γενικές γραμμές, υποεκτιμά τις μικρότερες τιμές στάθμης (<60m), ενώ στις μεγαλύτερες τιμές στάθμης (>60m) επικρατούν ελαφρώς οι υπερεκτιμήσεις.

Πίνακας 13.6. Τιμές των στατιστικών παραμέτρων αξιολόγησης κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου.

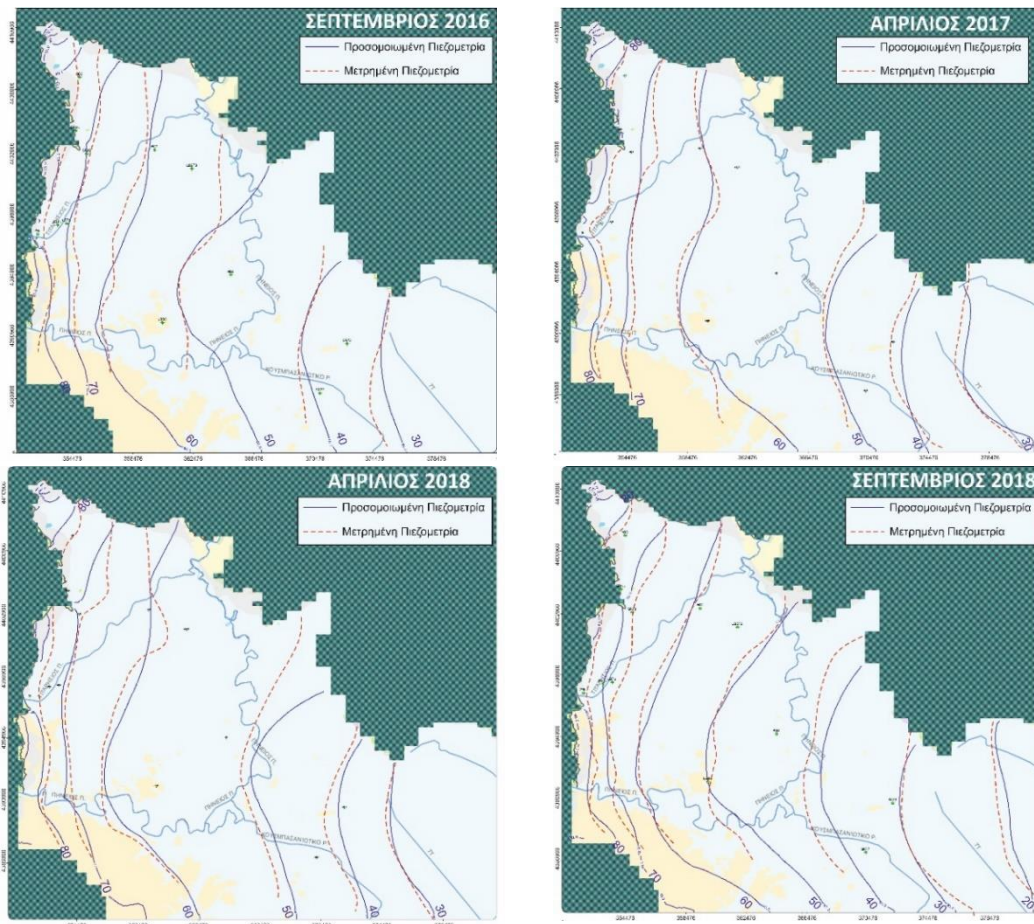
	Επαλήθευση μοντέλου	Μονάδες
Αριθμός Μετρήσεων	864	
Συντελεστής Συσχέτισης (R^2)	0.993	
Κλίση γραμμής τάσης (α)	0.994	
Μέσο Σφάλμα (ME)	-0.575	(m)
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE)	1.541	(m)
Τυπικό Σφάλμα Εκτίμησης (SEE)	0.045	(m)
Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE)	2.010	(m)
Κανονικοποιημένο Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (NRMSE)	3.379	(%)



Διάγραμμα 13.8. Σύγκριση προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών υπόγειας στάθμης κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου.

Στην Εικόνα 13.16 παρουσιάζεται η σύγκριση των πιεζομετρικών χαρτών της μετρημένης με την προσομοιωμένη στάθμη, για τις υγρές και ξηρές περιόδους, όπου υπήρχαν πρωτογενείς μετρήσεις της υπόγειας στάθμης (2016-2018). Οι πιεζομετρικές καμπύλες παρουσιάζουν ικανοποιητική ταύτιση, λαμβάνοντας υπόψη και το μεγάλο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, σε μια περιοχή με εναλλαγές περιόδων εντατικών αντλήσεων και περιόδων ηρεμίας. Σημειώνεται επίσης ότι, τα πρωτογενή δεδομένα, αφορούν μόνο την κύρια περιοχή έρευνας και όχι το σύνολο της εκτεταμένης περιοχής του μοντέλου. Η γενική μορφή των συγκρινόμενων πιεζομετρικών καμπυλών, βάσει της Εικόνας 13.16, υποδηλώνει ότι το μοντέλο αναπαριστά επαρκώς την κατανομή του φορτίου και τις γραμμές ροής.

Συνοψίζοντας θα μπορούσε να ειπωθεί ότι, η εκτέλεση του μοντέλου στο πλαίσιο της διατριβής αυτής, δεν είχε ως αυτοσκοπό την επακριβή προσομοίωση της υπόγειας στάθμης αλλά την αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδίων για τη χάραξη μιας στρατηγικής, αναφορικά με τη μελλοντική διαχείριση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής έρευνας, καθώς και τον έλεγχο της δυνατότητας να ανταπεξέλθει το συγκεκριμένο υδατικό σύστημα σε διάφορα σενάρια κλιματικής αλλαγής. Τα πολύ καλά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία ρύθμισης, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας και την επαλήθευση του μοντέλου, το καθιστούν ικανό και αξιόπιστο, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για τους συγκεκριμένους σκοπούς.



Εικόνα 13.16. Σύγκριση μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρημένων τιμών πιεζομετρίας του υπό-πίεση υδροφόρου κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου.

13.4.8 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ

Ένας από τους στόχους της ανάπτυξης και εφαρμογής του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης, ήταν και η διερεύνηση της συμπεριφοράς του υδατικού συστήματος υπό το καθεστώς διάφορων μελλοντικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής. Όπως ειπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τόσο η διαδικασία ρύθμισης όσο και η επαλήθευση του μοντέλου, υπέδειξαν ότι προσομοιώνει ικανοποιητικά τους μηχανισμούς λειτουργίας του υδατικού συστήματος, υπό το καθεστώς έντονων τροφοδοσιών αλλά και πιέσεων. Ως εκ τούτου, το συγκεκριμένο μοντέλο με τις τιμές παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, ενδείκνυται για την ασφαλή αξιολόγηση των επιπτώσεων εναλλακτικών διαχειριστικών σεναρίων.

Για την ανάπτυξη των μελλοντικών σεναρίων αντλήθηκαν δεδομένα από δημοσιευμένη έρευνα (Arampatzis et al. 2018) σχετικά με τον προσδιορισμό πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα κατακρημνίσματα και τη θερμοκρασία, για τη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας εξήχθησαν για τέσσερεις μελλοντικές χρονικές περιόδους (2021-2040, 2041-

2060, 2061-2080, 2081-2100), χρησιμοποιώντας δεδομένα από τέσσερα Τοπικά Κλιματικά Μοντέλα (Regional Climate Models-RCM) για κάθε μία περίοδο. Στη παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από την πρώτη χρονική περίοδο της αναφερόμενης έρευνας (2021-2040), καθώς είναι η άμεση χρονική συνέχεια της περιόδου προσομοίωσης και επίσης, η χρονική διάρκειά της σχεδόν ταυτίζεται με τη συνολική διάρκεια της ρύθμισης και επαλήθευσης του μοντέλου. Η περίπτωση επέκτασης των σεναρίων διαχείρισης και μετά το 2040 δεν εξετάζεται, καθώς ήδη ο βαθμός επισφάλειας των διαχειριστικών σεναρίων είναι μεγάλος και οποιαδήποτε χρονική επέκτασή τους θα επέφερε επιπλέον βαθμό επισφάλειας.

Από τη χρονική περίοδο 2021-2040, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από τα δύο ακραία RCM, το HIRHAM5 (Christensen et al. 2006) (συντομογραφία HA), ως το δυσμενέστερο σενάριο κλιματικής αλλαγής για την περίοδο αυτή και το RCA (Kjellstrom et al. 2005) (συντομογραφία RH), ως το ευνοϊκότερο σενάριο κλιματικής αλλαγής για την ίδια περίοδο. Σύμφωνα με το δυσμενέστερο σενάριο (HA), κατά τη διάρκεια της πρώτης εικοσαετίας 2021-2040, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα μειώνονται κατά 24.34%, σε σύγκριση με τα μέσα ετήσια κατακρημνίσματα της περιόδου αναφοράς, της έρευνας, 1981-2000. Αντίστοιχα, σύμφωνα με το ευνοϊκότερο σενάριο (RH), τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αυξάνονται κατά 12.02% την πρώτη εικοσαετία, σε σύγκριση με τα μέσα ετήσια κατακρημνίσματα της περιόδου αναφοράς 1981-2000.

Δυσμενέστερο υποθετικό σενάριο (Worst Case Scenario – WCS)

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής υιοθετήθηκε η μείωση των κατακρημνισμάτων κατά 24.34% (σύμφωνα με το μοντέλο HA), ως το WCS για την άσκηση προσομοίωσης. Τόσο στη περίπτωση αυτή όσο και στην επόμενη (ευνοϊκότερο σενάριο), έγιναν κάποιες παραδοχές έτσι ώστε να απλουστευθούν οι διαδικασίες πρόγνωσης, καθώς σε κάθε άλλη περίπτωση θα υπεισέρχονταν στις εξισώσεις επίλυσης των προσομοιώσεων, ιδιαίτερα επισφαλείς υπολογισμοί, αυξάνοντας σημαντικά και το χρόνο που θα απαιτούνταν. Κάτι τέτοιο ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας διατριβής και ως εκ τούτου, αναφέρονται στη συνέχεια, οι παραδοχές που έλαβαν χώρα:

- ως αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες με την περίπτωση της ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (Παράγραφος 13.4.4.5.),
- οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων διατηρήθηκαν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία ρύθμισης (μόνιμη και μη μόνιμη ροή) (Παράγραφος 13.4.4.3.),
- το ποσοστό μεταβολής των κατακρημνισμάτων εφαρμόστηκε σε κάθε μηνιαία τιμή της κάθε ζώνης τροφοδοσίας, έτσι ώστε στο τέλος η συνολική τροφοδοσία από

τη βροχόπτωση να έχει μεταβληθεί κατά τα αντίστοιχα ποσοστά, σύμφωνα με τα δύο σενάρια,

- η τροφοδοσία του συστήματος από το καρστικό σύστημα, η οποία προσομοιώνεται με τα GHB, θεωρήθηκε ανεπηρέαστη από την μεταβολή των κατακρημνισμάτων. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην πράξη, καθώς το συγκεκριμένο καρστικό σύστημα τροφοδοτείται, τόσο από τις βροχοπτώσεις όσο και από πλευρικές εισροές από τις λεκάνες Πέρα Κάμπου και Τσαριτσάνης στα δυτικά και βορειοδυτικά αντίστοιχα. Η μεταβολή των βροχοπτώσεων επιφέρει μεταβολή των αντλήσεων (λόγω των αρδευτικών αναγκών) στις συγκεκριμένες λεκάνες και ως εκ τούτου, μεταβάλλεται ο διαθέσιμος όγκος νερού, με τον οποίο τροφοδοτείται το καρστ. Το τελικό αποτέλεσμα είναι να μεταβληθεί και ο ρυθμός με τον οποίο το καρστικό σύστημα τροφοδοτεί την λεκάνη. Πρόκειται λοιπόν για μια αλυσίδα μεταβολών, οι οποίες είναι εξαιρετικά δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν και η οποιαδήποτε προσέγγιση θα ήταν αμφισβητήσιμη. Ο μη επηρεασμός των GHB από τη μεταβολή της βροχόπτωσης αποτελεί, την ευνοϊκή περίπτωση του δυσμενέστερου σεναρίου, καθώς η κρατούσα κατάσταση θα είναι αυτή που εκτιμήθηκε ή/και χειρότερη, ενώ αντιθέτως αποτελεί, τη δυσμενή περίπτωση του ευνοϊκότερου σεναρίου (Best Case Scenario – BCS) καθώς η κρατούσα κατάσταση θα είναι αυτή που εκτιμήθηκε ή/και καλύτερη,

- οι αντλήσεις των γεωτρήσεων στην προσομοιωμένη περιοχή μεταβάλλονται, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των δύο σεναρίων, μόνο κατά το ποσοστό συνεισφοράς της βροχόπτωσης για κάθε ένα από τα δύο σενάρια και σύμφωνα πάντα με τα αντίστοιχα ποσοστά μεταβολής. Και σε αυτή τη περίπτωση οι εκτιμήσεις που θα προκύψουν θα είναι οι ευνοϊκότερες για το WCS και οι δυσμενέστερες για το BCS, καθώς και στην ανατολική πλευρά του καρστικού συστήματος υπάρχει πλήθος γεωτρήσεων, οι οποίες με τη σειρά τους «μεταβάλλουν την συμπεριφορά τους» σε κάθε πιθανή μεταβολή των κατακρημνισμάτων. Και εδώ, με τον τρόπο αυτό, επηρεάζονται τα διαθέσιμα αποθέματα εκρών από το καρστικό σύστημα προς την αλλουβιακή υπολεκάνη, έμμεσα από τη μεταβολή των αρδευτικών αναγκών και άμεσα από τη μεταβολή της απευθείας τροφοδοσίας από τη βροχόπτωση,

- η χρονοσειρά των κελιών που προσομοιώνουν τις κοίτες των ποταμών δεν επηρεάζεται από τη βροχόπτωση, καθώς δεν υπάρχει μη επισφαλής τεκμηρίωση της μεταβολής της. Η παραδοχή αυτή δεν επιφέρει σημαντικό σφάλμα στους υπολογισμούς, καθώς όπως αποδείχθηκε, τα ποτάμια δεν αποτελούν κυρίαρχο παράγοντα του υδατικού ισοζυγίου.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, η εφαρμογή του μοντέλου στην περίπτωση του WCS, επέφερε μια πτώση της μέσης στάθμης κατά -1.586 m. Η μεγαλύτερη πτώση παρουσιάζεται στη γεώτρηση SR77 (-4.017 m), στο NA τμήμα της περιοχής προσομοίωσης και η μικρότερη στη γεώτρηση SR111 (-0.024 m), η οποία βρίσκεται στην επαφή των ασβεστολιθικών σχηματισμών με τις αλλουβιακές

αποθέσεις στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης. Με την ίδια λογική, όπως φαίνεται και από τις τιμές του Πίνακα 13.7, η πτώση στάθμης είναι μεγαλύτερη κινούμενοι από τα δυτικά περιθώρια προς την ανατολική επέκταση της υπολεκάνης. Επαληθεύεται με αυτό τον τρόπο, ο εντονότερος επηρεασμός της πτώσης στάθμης, όσο αυξάνεται η απόσταση από την κύρια πηγή τροφοδοσίας, υπό το καθεστώς του δυσμενέστερου σεναρίου κλιματικής αλλαγής (Christensen et al. 2006, Arampatzis et al. 2018).

Πίνακας 13.7. Μεταβολή μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις παρατήρησης κατά την εφαρμογή του δυσμενέστερου σεναρίου (WCS) κλιματικής αλλαγής κατά την περίοδο 2021-2040 (σύμφωνα με Arampatzis et al. 2018).

Γεωτρήσεις παρατήρησης	Μέση στάθμη (m) (μη μόνιμη ροή)	Μέση Στάθμη (m) (WCS)	Διαφορά μέσης στάθμης (m)
75L	76.577	76.416	-0.161
AD2	59.092	57.921	-1.171
AD3	75.573	75.219	-0.354
AD6	46.060	42.999	-3.061
LB273	53.662	51.892	-1.770
LB76	69.987	69.112	-0.875
LB99	50.499	47.456	-3.044
PZT1	72.259	71.580	-0.678
SR111	74.806	74.782	-0.024
SR39	69.098	68.471	-0.628
SR72	32.122	28.870	-3.252
SR77	37.418	33.401	-4.016

Λαμβάνοντας υπόψη, τη συνολική πτώση της μέσης στάθμης (-1.586) κατά την περίοδο 2021-2040, τη συνολική έκταση της περιοχής προσομοίωσης (580.5 km²) και θεωρώντας ένα μέσο ενεργό πορώδες 0.15 (Sogreah 1974, Panagoroulios 1995), προκύπτει μια μέση μείωση όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων νερού της τάξης των 140*10⁶ m³.

Επιπλέον, από τις τιμές του υδατικού ισοζυγίου για τη ρύθμιση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 13.5, προκύπτει ότι η τροφοδοσία από την βροχόπτωση αποτελεί περίπου το 20% της συνολικής τροφοδοσίας (GHB, βροχόπτωση, γεωτρήσεις εισροής). Εξάγεται το συμπέρασμα ότι, σε ένα υποθετικό WCS μείωσης κατά 24.34% (HA, Christensen et al. 2006, Arampatzis et al. 2018), μόνο στο 20% της συνολικής τροφοδοσίας της περιοχής προσομοίωσης, προκύπτει μια απώλεια της τάξης των 140*10⁶ m³. Αν, υποθετικά πάντα αναφερόμενος (σύμφωνα και με τις παραδοχές που έχουν γίνει για το karst και τις αντλήσεις), μειωθεί η συνολική τροφοδοσία κατά 20%, τότε η επίδραση της αναφερόμενης περίπτωσης κλιματικής αλλαγής, θα είναι κατά πολύ εντονότερη, τόσο σε μορφή πτώσης στάθμης, όσο και σε μορφή μείωσης όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων. Η ακριβής

εκτίμηση των μεταβολών αυτών, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί εξαιρετικά πολύπλοκη προσέγγιση στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, καθώς θα απαιτούσε τη σύνθεση, βαθμονόμηση και επίλυση ενός ουσιαστικά νέου μοντέλου προσομοίωσης.

Ευνοϊκότερο υποθετικό σενάριο (Best Case Scenario – BCS)

Η αύξηση των κατακρημνισμάτων κατά 12.02% (σύμφωνα με το μοντέλο RH), ως το BCS, υιοθετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας άσκησης προσομοίωσης. Και στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι ίδιες παραδοχές που αναφέρθηκαν και στην προηγούμενη περίπτωση του WCS.

Έχοντας υπόψη αυτές τις παραδοχές, η εφαρμογή του μοντέλου στην περίπτωση του BCS, επέφερε μια άνοδο της μέσης στάθμης κατά +0.327 m. Η μεγαλύτερη άνοδος παρουσιάζεται στη γεώτρηση AD6 (+0.699 m), στο κεντρικό τμήμα της περιοχής προσομοίωσης, στην περιοχή του Πηνειού ποταμού και η μικρότερη στη γεώτρηση SR111 (+0.007 m), η οποία βρίσκεται στην επαφή των ασβεστολιθικών σχηματισμών με τις αλλουβιακές αποθέσεις στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης. Από τις τιμές του Πίνακα 13.8, η άνοδος στάθμης προκύπτει ότι είναι μεγαλύτερη στα κεντρικά και ανατολικά τμήματα της περιοχής προσομοίωσης, ενώ κοντά στα δυτικά κράσπεδα η άνοδος που παρατηρείται είναι μικρότερη. Υπό το καθεστώς λοιπόν του ευνοϊκότερου σεναρίου κλιματικής αλλαγής (Kjellstrom et al. 2005, Arampatzis et al. 2018), οι περιοχές που ανταποκρίνονται «άμεσα» στην αλλαγή αυτή, είναι εκείνες που παρουσίαζαν μεγαλύτερα προβλήματα πτώσης στάθμης, τόσο υπό φυσιολογικές συνθήκες, όσο και υπό το πρίσμα του WCS. Αντιθέτως, τα τμήματα εκείνα που βρίσκονται κοντά στην κύρια πηγή τροφοδοσίας (καρστ), φαίνεται να μην μεταβάλλουν κατά πολύ την κατάστασή τους, ούτε στην περίπτωση αυτή του BCS, αλλά ούτε και σε δυσμενείς συνθήκες (WCS), όπως ακριβώς αποδόθηκε στην προηγούμενη περίπτωση.

Πίνακας 13.8. Μεταβολή μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις παρατήρησης κατά την εφαρμογή του ευνοϊκότερου σεναρίου (BCS) κλιματικής αλλαγής κατά την περίοδο 2021-2040 (σύμφωνα με Arampatzis et al. 2018).

Γεωτρήσεις παρατήρησης	Μέση στάθμη (m) (μη μόνιμη ροή)	Μέση Στάθμη (m) (BCS)	Διαφορά μέσης στάθμης (m)
75L	76.577	76.627	0.050
AD2	59.092	59.416	0.324
AD3	75.573	75.622	0.049
AD6	46.060	46.759	0.699
LB273	53.662	54.146	0.484
LB76	69.987	70.243	0.256
LB99	50.499	51.111	0.612
PZT1	72.259	72.461	0.202
SR111	74.806	74.812	0.007
SR39	69.098	69.283	0.185
SR72	32.122	32.736	0.614
SR77	37.418	37.866	0.448

Λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική άνοδο της μέσης στάθμης (+0.327) κατά την περίοδο 2021-2040, τη συνολική έκταση της περιοχής προσομοίωσης (580.5 km²) και θεωρώντας ένα μέσο ενεργό πορώδες 0.15 (Sogreah 1974, Panagoroulos 1995), προκύπτει μια μέση αύξηση όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων νερού της τάξης των 28*10⁶ m³.

Όπως και προηγουμένως, λαμβάνοντας υπόψη ότι, στο υποθετικό BCS αύξησης κατά 12.02% (RH, Kjellstrom et al. 2005, Arampatzis et al. 2018), μόνο στο 20% της συνολικής τροφοδοσίας της περιοχής προσομοίωσης, προέκυψε μια αύξηση όγκου της τάξης των 28*10⁶ m³, τότε μια ενδεχόμενη αύξηση στην συνολική τροφοδοσία, κατά το ίδιο πάντα ποσοστό, θα οδηγούσε σε πολύ μεγαλύτερη αύξηση του όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων. Η αύξηση αυτή των αποθεμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, ωστόσο εξαιρετικά δύσκολο να προσεγγιστεί, για τους λόγους που ήδη έχουν αναφερθεί.

13.4.9 ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το ενδεχόμενο αντιμετώπισης της κατάστασης που διαμορφώθηκε υπό το καθεστώς του υποθετικού δυσμενέστερου σεναρίου (WCS), όπως αυτή αποδόθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Σύμφωνα και με παλαιότερες έρευνες που έλαβαν χώρα στην περιοχή (Παγώνης κ.α. 2008, Κουκίδου 2010), ως το πλέον αποτελεσματικό και ταυτόχρονα συμβατό με το περιβάλλον, μέτρο αποκατάστασης για την περιοχή έρευνας, θεωρείται η περίπτωση του τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφόρου. Με τον όρο «εμπλουτισμό» των

υπόγειων υδροφόρων ορίζονται όλες εκείνες οι διαδικασίες, φυσικές ή τεχνητές, οι οποίες αυξάνουν τα εκμεταλλεύσιμα υπόγεια υδάτινα αποθέματα μιας περιοχής. Η αύξηση της ποσότητας του υπόγειου νερού με την εισαγωγή στα υδροφόρα στρώματα πρόσθετων ποσοτήτων νερού μέσω ανθρώπινων τεχνικών παρεμβάσεων, καλείται τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων στρωμάτων. Το πρόσθετο αυτό νερό μπορεί να προέρχεται από επιφανειακές πηγές ή από παρακείμενα υδροφόρα στρώματα (Αντωνάρουπος κ.α. 2010). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε αντίστοιχες περιπτώσεις αποκατάστασης παγκοσμίως (Panagoroulos et al. 2004, Singh et al. 2013, Senanayake et al. 2016, Sandoval et al. 2019). Αποβλέπει στη διαχείριση του μέχρι τώρα ανεκμετάλλευτου πλούσιου υδατικού δυναμικού της χειμερινής περιόδου από τις εκφορτίσεις των πηγών Μάτι Τυρνάβου. Οι χειμερινές αυτές εκφορτίσεις θα διοχετεύονται μέσω γεωτρήσεων στο υπόγειο υδατικό σύστημα εξασφαλίζοντας σταδιακή αναπλήρωση του ελλείματος των υπόγειων ρυθμιστικών αποθεμάτων και την προοδευτική αποκατάσταση της ισορροπίας του. Παράλληλα με την ποσοτική αποκατάσταση, η μέθοδος του τεχνητού εμπλουτισμού συμβάλει και στη βελτίωση της ποιότητας των υδατικών πόρων αφού εισέρχονται σε αυτούς νέες ποσότητες νερού εξαιρετικής ποιότητας (Gale et al. 2002, Παγώνης κ.α. 2008).

Η μέθοδος του τεχνητού εμπλουτισμού δεν αποσκοπεί στην σταδιακή αποκατάσταση των διαθέσιμων ρυθμιστικών αποθεμάτων εις βάρος της εύρυθμης λειτουργίας των πηγών. Όπως ειπώθηκε, οι όγκοι νερού που θα χρησιμοποιηθούν αποτελούν ανεκμετάλλευτο υδατικό δυναμικό της χειμερινής περιόδου και η ποσότητά τους θα πρέπει να έρχεται σε συμφωνία με την δεδομένα εκφόρτισης των πηγών, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τις βασικές λειτουργίες τους (π.χ. περιβαλλοντικές παροχές). Θα πρέπει να εξασφαλίζεται επίσης ότι οι χρησιμοποιούμενες ποσότητες για τον εμπλουτισμό δεν θα δημιουργούν προβλήματα, ακόμα και σε περιπτώσεις ξηρών υδρολογικά ετών, καθώς είναι άμεση η συσχέτιση των εκφορτίσεών τους με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Τούτο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την περιοχή έρευνας, όπου οι συγκεκριμένες πηγές τροφοδοτούν το οικοσύστημα της τεχνητής λίμνης Αργυροπούλιου.

Με βάση το Διάγραμμα 7.6 του 7^{ου} Κεφαλαίου, όπου παρουσιάζονται οι ετήσιες εκφορτίσεις των πηγών Μάτι Τυρνάβου, προκύπτει ότι η μέση ετήσια εκφόρτιση των πηγών αυτών για το χρονικό διάστημα 1972-2018, είναι της τάξης των $47.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή αυτή καθώς και την προηγούμενη έρευνα (Κουκίδου 2010) τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή, προσομοιώνεται στη συνέχεια ως σενάριο αποκατάστασης η περίπτωση εισπίεσης νερού από 20 γεωτρήσεις με ρυθμό παροχής τα $60 \text{ m}^3/\text{h}$ για τη χειμερινή περίοδο (Νοέμβριος-Μάρτιος, 151 μέρες). Τη χειμερινή περίοδο οι εκφορτίσεις των πηγών είναι σε περίσσεια, το σύστημά τους αρχίζει πλέον να ανακάμπτει και σταδιακά αυτές φθάνουν στο μέγιστο της παροχής τους, στις αρχές της άνοιξης. Ο εμπλουτισμός λαμβάνει χώρα την περίοδο αυτή,

αξιοποιώντας τα υδατικά αποθέματα των πηγών και σταματάει, όταν θεωρητικά η τροφοδοσία φθάσει στη μέγιστη τιμή της. Με τη διαδικασία αυτή, είναι δυνατή η μετέπειτα πλήρωση της τεχνητής λίμνης Αργυροπούλιου και εν συνεχεία, υπάρχει περίσσεια νερού για να καλυφθεί η οικολογική παροχή. Με βάση τους υπολογισμούς, ο συνολικός ετήσιος όγκος νερού που θα χρησιμοποιούν και θα αποδίδουν οι γεωτρήσεις αυτές στον υδροφόρο, προερχόμενος από τις πηγές Μάτι Τυρνάβου, αποτελεί περίπου το 10% των μέσων εκφορτίσεων τους. Το ποσοστό αυτό κρίνεται απόλυτα εφικτό ικανοποιώντας τη συνθήκη κατά την οποία, ακόμα και σε ένα πολύ ξερό υδρολογικό έτος να μη δημιουργείται οικολογικό πρόβλημα στην ευρύτερη περιοχή.

Οι γεωτρήσεις αυτές, σύμφωνα με την Κουκίδου (2010), προτείνεται να κατασκευασθούν στο ανάντη τμήμα της υπολεκάνης ανατολικά των πηγών Μάτι για τους εξής λόγους:

- η προτεινόμενη ζώνη είναι κοντά στις πηγές Μάτι Τυρνάβου οπότε δεν απαιτείται η κατασκευή μεγάλων δικτύων μεταφοράς και ως εκ τούτου το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος εμπλουτισμού, περιορίζεται,
- η προτεινόμενη ζώνη, όντας μέσα στη βασική ζώνη τροφοδοσίας, έχει το πλεονέκτημα ότι το νερό εμπλουτισμού θα μπορεί να κινηθεί και να εμπλουτίσει όλη την κατάντη ζώνη, η οποία και παρουσιάζει τα μεγαλύτερα προβλήματα,
- τα χονδρόκοκκα ιζήματα των επιφανειακών σχηματισμών της προτεινόμενης περιοχής, υποδηλώνουν μεγάλες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και αποθηκευτικότητας, ευνοώντας έτσι την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού,
- στην προτεινόμενη ζώνη αναπτύσσονται συνθήκες ελεύθερης υδροφορίας, με την ακόρεστη ζώνη να επιδέχεται φόρτιση χωρίς να ανακύπτουν σημαντικά προβλήματα απορρόφησης του νερού. Παράλληλα παρέχεται, ως ασφαλιστική δικλείδα, η ύπαρξη των ποταμοχειμάρων αποθέσεων για την παροχέτευση του νερού σε περίπτωση αστοχίας του έργου.

Για το σκοπό της προσομοίωσης στα δεδομένα του WCS, μεταβάλλεται μόνο το αρχείο των γεωτρήσεων τροφοδοσίας, όπου προστίθενται οι 20 γεωτρήσεις εισπίεσης με ρυθμό $60 \text{ m}^3/\text{h}$, στην προτεινόμενη θέση και μόνο για το χρονικό διάστημα από το Νοέμβριο έως και Μάρτιο κάθε έτους για 19 συναπτά έτη.

Η προσομοίωση εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού έδειξε σαν αποτέλεσμα ότι αυτός θα επέφερε άνοδο της μέσης στάθμης κατά $+0.280 \text{ m}$, σε σχέση με τη μέση στάθμη του WCS. Η μεγαλύτερη άνοδος παρουσιάζεται στη γεώτρηση LB273 ($+0.870 \text{ m}$), η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην θέση των γεωτρήσεων εμπλουτισμού και η μικρότερη στη γεώτρηση SR111 ($+0.010 \text{ m}$), η οποία βρίσκεται στην επαφή των ασβεστολιθικών σχηματισμών με τις αλλουβιακές αποθέσεις στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης και η οποία είναι πρακτικά ανεπηρέαστη. Από τις τιμές του Πίνακα 13.9 και τη χωρική κατανομή των γεωτρήσεων παρατήρησης, προκύπτει το

συμπέρασμα ότι, η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού θα είχε άμεσα αποτελέσματα πρώτα στις γεωτρήσεις που γειτνιάζουν στην περιοχή των γεωτρήσεων εμπλουτισμού και αμέσως μετά στις κατάντη γεωτρήσεις του κεντρικού και ανατολικού τμήματος της περιοχής προσομοίωσης, που παρουσίαζαν τις μεγαλύτερες πτώσεις στάθμης. Πρακτικά ανεπιπρόσπαστες θα παρέμεναν οι γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στο καρστικό σύστημα, γεγονός απολύτως λογικό δεδομένης της μεγάλης δυναμικής του καρστικού συστήματος σε επίπεδο τροφοδοσίας και της άμεσης εξάρτησης των γεωτρήσεων αυτών από αυτό.

Πίνακας 13.9. Μεταβολή μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις παρατήρησης μετά την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, υπό το καθεστώς του δυσμενέστερου σεναρίου (WCS) κλιματικής αλλαγής (σύμφωνα με Arampatzis et al. 2018).

Γεωτρήσεις παρατήρησης	Μέση Στάθμη (m) (WCS)	Μέση Στάθμη (m) (μετά τον ΤΕ)	Διαφορά μέσης στάθμης (m)
75L	76.416	76.442	0.026
AD2	57.921	58.564	0.643
AD3	75.219	75.353	0.134
AD6	42.999	43.413	0.414
LB273	51.892	52.763	0.870
LB76	69.112	69.272	0.160
LB99	47.456	47.791	0.335
PZT1	71.580	71.700	0.120
SR111	74.782	74.792	0.010
SR39	68.471	68.665	0.194
SR72	28.870	29.098	0.227
SR77	33.401	33.632	0.231

Λαμβάνοντας υπόψη, την συνολική άνοδο της μέσης στάθμης (+0.280) κατά την περίοδο εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού, προκύπτει μια αναπλήρωση όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων της τάξης των $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, σε σχέση με την περίπτωση του WCS. Ως ποσοστό η τιμή αυτή αποτελεί περίπου το 18% του συνολικού όγκου νερού ρυθμιστικών αποθεμάτων, που είχε μειωθεί υπό το καθεστώς του WCS.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του τεχνητού εμπλουτισμού, με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν, κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά αν αναλογισθεί κανείς ότι, χρησιμοποιώντας μόνο το 10% των μέσων ετήσιων εκφορτίσεων των πηγών Μάτι Τυρνάβου, σε βάθος εικοσαετίας, αναπληρώνεται περίπου το 1/5 της απώλειας του όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων, στην περίπτωση επικράτησης του δυσμενέστερου σεναρίου κλιματικής αλλαγής (Arampatzis et al. 2018).

Η ανάπτυξη ενός τέτοιου έργου στην περιοχή έρευνας θα συνέβαλε σημαντικά στην αντιμετώπιση προβλημάτων υδατικής επάρκειας (ποσοτικά) και προστασίας του υδατικού συστήματος (ποιοτικά), που αντιμετωπίζει η περιοχή. Ταυτόχρονα, με τον τρόπο αυτό θα εξασφαλιζόταν η αδιάλειπτη τροφοδοσία της νοτιοανατολικής

επέκτασης του υδατικού συστήματος της ανατολικής Θεσσαλίας, όπου και εντοπίζονται τα σημαντικότερα προβλήματα επάρκειας νερού, σύμφωνα και με όσα προέκυψαν από την ανάλυση των μηχανισμών λειτουργίας και εξέλιξης της υπόγειας υδροφορίας (Κεφάλαιο 7, Παράγραφος 7.4.).

Ο τεχνητός εμπλουτισμός θεωρείται ως ένα μεσαίου επιπέδου κατασκευαστικό έργο, το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί στο στενό πλαίσιο της περιοχής έρευνας, καθώς δεν απαιτούνται πολύπλοκες, χρονοβόρες και μεγάλου κόστους κατασκευές. Η συγκεκριμένη ζώνη που προτείνεται για την κατασκευή, αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμη για την τοπική οικονομία ζώνη, καθώς από την περιοχή αυτή τροφοδοτούνται όλες οι απαιτούμενες ποσότητες νερού για τις αρδευτικές ανάγκες τόσο της στενής περιοχής έρευνας, όσο και της ευρύτερης περιοχής προς την νοτιοανατολική επέκταση της ανατολικής θεσσαλικής πεδιάδας. Παράλληλα, η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος αποκατάστασης στην περιοχή έρευνας, έρχεται σε συμφωνία με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ, η οποία απαιτεί (i) ολοκληρωμένη διαχείριση, (ii) προστασία του υδατικού οικοσυστήματος και (iii) ανάπτυξη της τοπικής κοινωνίας.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι, το έλλειμα στα ρυθμιστικά αποθέματα, το οποίο υπάρχει αλλά μπορεί να οξυνθεί ακόμα περισσότερο υπό το πρίσμα ενός δυσμενούς σεναρίου κλιματικής αλλαγής, μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων, κατά την υγρή περίοδο, και χωρίς να επηρεάζονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες.

13.4.10 ΑΛΛΑ ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στην παρούσα έρευνα, ως το πλέον εφικτό μέτρο αποκατάστασης, υιοθετήθηκε η πρόταση του τεχνητού εμπλουτισμού, ως πρακτική και σχετικά εύκολα εφαρμόσιμη λύση, η οποία μπορεί να υποστηριχθεί τόσο από τις γεωλογικές-υδρογεωλογικές συνθήκες, όσο και από το κοινωνικοοικονομικό καθεστώς της περιοχής. Ωστόσο, στη παράγραφο αυτή αναφέρονται, βιβλιογραφικά και μόνο και κάποιιοι άλλοι τρόποι αντιμετώπισης της κατάστασης ελλείματος αποθεμάτων. Έτσι, σύμφωνα με τις επικρατούσες συνθήκες στην περιοχή έρευνας, σε συνδυασμό με το Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών ΥΔ 08 (Ε.Γ.Υ. 2014) αλλά και την 1^η Αναθεώρησή του (Ε.Γ.Υ. 2017), αναφέροντα τα ακόλουθα:

- παρόλο που ως επί το πλείστον, τα συλλογικά δίκτυα μεταφοράς στην περιοχή έχουν μετατραπεί σε υπό-πίεση και η στάγδην άρδευση αποτελεί την κυρίαρχη μέθοδο άρδευσης, θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί η εν λόγω κατάσταση, με τα υπόγεια δίκτυα και τη μέθοδο άρδευσης με σταγόνα, να έχουν ολοκληρωτική εφαρμογή σε όλη την υπολεκάνη. Με την παραπάνω διαδικασία δεν θα ζημιώνεται ο παραγωγός και δεν θα οδηγείται σε αλλαγή χρήσης γης λόγω έλλειψης υδατικών πόρων.

- Θεωρείται ότι θα είναι σημαντική, (α) η εξοικονόμηση υδατικών πόρων και (β) η βελτίωση της διαχείρισης των υδατικών πόρων, αν ενσωματωθούν οι ιδιωτικές γεωτρήσεις και τα δίκτυα στα υπάρχοντα συλλογικά.
- Η εγκατάσταση υδρομετρητών σε όλες τις γεωτρήσεις και η σωστή συντήρηση των δικτύων μεταφοράς, θα είχε ως αποτέλεσμα την παρακολούθηση της κατανάλωσης και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας.
- Η αναδιάρθρωση των καλλιεργειών, μεταβαίνοντας σε λιγότερο υδροβόρες καλλιέργειες και ταυτόχρονα υψηλής προσόδου, θα επέφερε μείωση του απολαμβανόμενου όγκου νερού.
- Έχοντας γνώση από την επικρατούσα κατάσταση στην περιοχή και λαμβάνοντας υπόψη την συχνά αλόγιστη χρήση του αρδευτικού νερού (λιμνάζοντα χωράφια, πότισμα υπό ακατάλληλες καιρικές συνθήκες), θα μπορούσε να περιοριστεί ένα ποσοστό αρδευτικού όγκου νερού, εξορθολογίζοντας τη χρήση μη θίγοντας την εκάστοτε καλλιέργεια. Σύμφωνα με τον Brouwer (1989), το πόσο αρδευτικό νερό πρέπει να αποδοθεί στην καλλιέργεια, η συχνότητα αλλά και η χρονική φάση που πρέπει να δοθεί αυτό το νερό, αποτελούν το λεγόμενο «προγραμματισμό άρδευσης», με βάση τον οποίο αποτρέπεται η λειψυδρία των καλλιεργειών με την παροχή τόσο νερού, όσο καταναλώνουν, χωρίς να παρέχονται πλεονάσματα.
- Σε συνδυασμό με τον ορθό προγραμματισμό άρδευσης, η πρακτική της ελλειμματικής άρδευσης θα μπορούσε να αποτελέσει μια λύση αποκατάστασης. Κατά τον Heng (2002), ο περιορισμός της πεπερασμένης συνολικής ποσότητας νερού που πρέπει να διανεμηθεί σε πολλές χρήσεις, έχει αναγκάσει την άρδευση σε αναζήτηση υψηλών αποδοτικότητας. Η ελλειμματική άρδευση αποτελεί μια λύση προς αυτή την κατεύθυνση, δηλαδή η έκθεση των καλλιεργειών σε ορισμένα επίπεδα έλλειψης νερού, κατά τμήματα της καλλιεργητικής περιόδου ή και σε όλη τη διάρκεια αυτής, χωρίς σημαντική μείωση της παραγωγής. Με κύριο στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης του νερού, χωρίς σοβαρή μείωση της παραγωγής, δημιουργεί όφελος στον καλλιεργητή και το περιβάλλον. Από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί προκύπτει πως σε αρκετές καλλιέργειες, όπως το βαμβάκι και τα ροδάκινα, η προγραμματισμένη ελλειμματική άρδευση δύναται να μην διαφοροποιήσει την ποσότητα παραγωγής, μειώνοντας παράλληλα τη χρήση νερού, και άρα αυξάνοντας την αποδοτικότητα (Γουργουλέτης 2020).
- Το σύστημα τιμολόγησης έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και απαιτεί μια ευρύτερη κοινωνικοοικονομική προσέγγιση απ' ό,τι η διαδικασία κοστολόγησης. Βάσει των αρχών της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, η κοστολόγηση του αρδευτικού νερού πρέπει να γίνεται πλέον σε ένα επίπεδο με οριζόντια χρέωση, ώστε να ανακτώνται τα σταθερά έξοδα και με μεταβλητή χρέωση να ανακτώνται τα μεταβλητά κόστη. Στο μεταβλητό τμήμα της κοστολόγησης προσμετράται και η ογκομετρική κατανάλωση όπου αυτό είναι δυνατό. Από διάφορες έρευνες που έχουν γίνει (Galio et al. 2017, Exposito & Verbel 2017), τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι συγκεχυμένα,

αναφορικά με τη μείωση της χρήσης του αρδευτικού νερού, ως συνέπεια της τιμολόγησής του. Σύμφωνα με τον Dono (2010), η επιλογή των ογκομετρικών χρεώσεων, βάσει της καλλιεργούμενης έκτασης, μπορεί να περιορίσει τη μη ελέγξιμη ιδιωτική απόληψη υπόγειων υδάτων. Η αύξηση της τιμής του αρδευτικού νερού μπορεί να έχει επίδραση στη μείωση της χρήσης του, με την προϋπόθεση οι Τ.Ο.Ε.Β. να έχουν κάνει σωστό υπολογισμό των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών. Τέλος, η χρέωση με βάση την επιφάνεια των καλλιεργειών, σε ένα σταθερό και ένα μεταβλητό μέρος, παρέχει στους Τ.Ο.Ε.Β. μεγαλύτερη σταθερή χρηματική ροή, ενώ η εξασφάλιση του μεταβλητού κόστους είναι πιο εύκολη με τη ρύθμιση του μεταβλητού μέρους (Γουργουλέτης 2020).

- Η επαναχρησιμοποίηση νερού από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Ε.Ε.Λ.), θα μπορούσε να αποτελέσει μία λύση εξοικονόμησης αρδευτικού νερού, για την περιοχή έρευνας. Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν και στο Κεφάλαιο 12, η πόλη της Λάρισας ως οικισμός Β' προτεραιότητας εξυπηρετείται από δύο Ε.Ε.Λ., ενώ και ο Τύρναβος ως οικισμός Γ' προτεραιότητας αποχετεύει σε Ε.Ε.Λ. (Κεφάλαιο 12, Εικόνα 12.1). Στα πλαίσια των οδηγιών της Ε.Ε. για την επαναχρησιμοποίηση του νερού (European Commission 2016), ορίζεται ως τέτοια «η χρήση του νερού το οποίο προέρχεται από λύματα και το οποίο, κατόπιν επεξεργασίας, επιτυγχάνει ποιότητα κατάλληλη (λαμβάνοντας υπόψη υγειονομικούς και περιβαλλοντικούς κινδύνους και την εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία) για την σκοπούμενη χρήση του». Σύμφωνα με έρευνες (Jaramillo & Restrepo 2017; Zhang & Shen 2019), η επαναχρησιμοποίηση του νερού των Ε.Ε.Λ., συντελεί στην εξοικονόμηση υδατικών πόρων αλλά και των λιπασμάτων στην περίπτωση άρδευσης με αυτό. Παρά το γεγονός ότι, η επαναχρησιμοποίηση δεν επηρεάζει την κατανάλωση, μειώνει τις απολήψεις νέου νερού (Dworak et al. 2007), και με τον τρόπο αυτό τα υδατικά αποθέματα υπόκεινται σε μικρότερες πιέσεις (Jaramillo & Restrepo 2017). Σημειώνεται ότι, η αξιοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων εφαρμόζεται και εξετάζεται από τη δεκαετία του '70 σε ανεπτυγμένες χώρες του κόσμου όπως οι ΗΠΑ, Αυστραλία, Ολλανδία, Ισραήλ Σαουδική Αραβία κ.α. (Heaton 1981). Το 1991 η Ε.Ο.Κ. κάνει την πρώτη νύξη για την επαναχρησιμοποίηση όποτε αυτή κρίνεται σκόπιμη, υπό τον όρο της ελαχιστοποίησης των αρνητικών επιδράσεων στο περιβάλλον (Ευρωπαϊκό Συμβούλιο 1991) (Γουργουλέτης 2020). Στην Ελλάδα ιδιαίτερα ικανοποιητικά ήταν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων τόσο στην εξοικονόμηση αρδευτικού νερού (Panoras et al. 2000, Ilias et al. 2014), όσο και στην προφύλαξη από ρύπανση των ευαίσθητων αποδεκτών των λυμάτων αυτών, εξαιτίας της μείωσης των εκροών προς αυτούς (Panoras et al. 2001, Panoras & Ilias 2003).

- Η επιβολή διοικητικών κυρώσεων με τη μορφή προστίμου ή κλιμακωτά αυξημένης χρέωσης σε περίπτωση παράνομης ή υπερβολικής-κακής χρήσης νερού αντίστοιχα. Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνεται και η κακή χρήση λιπαντικών αγωγών και φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται και η επιβολή κυρώσεων για τις παράνομες απολήψεις για άρδευση από τη λίμνη του

Αργυροπουλίου ή και γεωτρήσεις που ουσιαστικά υδρομαστεύουν το σύστημα των πηγών Μάτι Τυρνάβου, δημιουργώντας σημαντικό πρόβλημα, τόσο στη βιοποικιλότητα της περιοχής όσο και σε μελλοντικά σχέδια τεχνητού εμπλουτισμού, τροφοδοτούμενου από τις πηγές.

- Η κατασκευή λιμνοδεξαμενών έχει αποδεδειγμένα αποδώσει σε αρκετές χώρες του εξωτερικού αλλά και στην Ελλάδα. Εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια στην κατάντη ζώνη της ανατολικής Θεσσαλικής πεδιάδας, ανακουφίζοντας με τον τρόπο αυτό τους παραγωγούς. Η πλήρωση των δεξαμενών γίνεται τη χειμερινή περίοδο με τμήμα των επιφανειακών απορροών του τοπικού υδρολογικού δικτύου.

Τέλος, πέραν των παραπάνω προτεινόμενων μέτρων, η σύσταση ενός καλά τεκμηριωμένου δικτύου παρακολούθησης της ποσότητας και της χημικής ποιότητας των υδατικών πόρων μιας λεκάνης, θεωρείται επιβεβλημένη προκειμένου να επιτευχθεί σαφής εικόνα της εξέλιξης και κατάστασης της υπόγειας υδροφορίας και να αξιολογηθεί η επιτυχής (ή μη) έκβαση των παρεμβάσεων και μέτρων προστασίας και αποκατάστασης του υδατικού δυναμικού της περιοχής. Η λειτουργία ενός τέτοιου δικτύου παρακολούθησης αποτελεί επιταγή της ευρωπαϊκής και εθνικής νομοθεσίας και είναι σε εφαρμογή τα τελευταία χρόνια από την Γενική Διεύθυνση Υδάτων μέσω των φορέων υλοποίησης (2013-2015, 2018-2023). Πέραν των ουσιαστικών παρεμβάσεων και αναμορφώσεων που επιδέχεται το συγκεκριμένο δίκτυο (ώστε να βελτιστοποιηθεί), πρέπει να έχει συστηματική εφαρμογή, έτσι ώστε να συνεχιστεί απρόσκοπτα η λειτουργία του.

14 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο Κεφάλαιο αυτό λαμβάνει χώρα μια σύντομη ανασκόπηση και σύνθεση των κύριων ευρημάτων της παρούσας έρευνας. Αναφέρονται συνοπτικά οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν για την παραγωγή των αποτελεσμάτων καθώς και η μεταξύ τους σύνδεση, έτσι ώστε να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα. Παράλληλα επισημαίνονται αντικειμενικές δυσκολίες που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της διατριβής, παρατίθενται κάποιες κριτικές απόψεις και συμπεράσματα που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη περιοχή και τέλος προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, αξιοποιώντας τα παρόντα αποτελέσματα.

Βασικό σκοπό της παρούσας έρευνας αποτέλεσε η συμβολή στην γενικότερη προσπάθεια προαγωγής του περιβάλλοντος, με την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ποιοτική και ποσοτική παρακολούθηση των υπόγειων υδατικών πόρων της υπολεκάνης Τυρνάβου καθώς και την αξιολόγησή τους, στο πλαίσιο της αειφορικής διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων. Κύριο τομέα χρησιμοποίησης των υπόγειων υδατικών πόρων στη συγκεκριμένη περιοχή, αποτελεί η γεωργία. Η διαχείριση του αρδευτικού νερού πραγματοποιείται από τρεις Τ.Ο.Ε.Β. (Αγίας Σοφίας, Τυρνάβου, Αμπελώνα), οι οποίοι καταλαμβάνουν το σύνολο σχεδόν της αρδευόμενης έκτασης. Ιδιωτικές γεωτρήσεις καλύπτουν το ανατολικό παραποτάμιο τμήμα του Πηνειού ποταμού καθώς και το βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας. Πρόκειται για μια περιοχή με χαμηλό μορφολογικό ανάγλυφο καθώς από την σύνθεση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM), με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS,) προέκυψε ότι στο 68% της επιφάνειάς της, οι κλίσεις είναι μικρότερες από 6%. Το υδρογραφικό της δίκτυο αποτελείται από τμήματα των υδρογραφικών δικτύων των ποταμών Πηνειού και Τιταρήσιου, καθώς δεν αποτελεί αυτοτελή υδρολογική λεκάνη αλλά οριοθετούμενη λεκάνη με καθαρά υδρογεωλογικά κριτήρια. Το 80% της συνολικής έκτασης της υπολεκάνης Τυρνάβου αποτελείται από μόνιμες καλλιέργειες και αροτραίες εκτάσεις, βάσει του δικτύου Corine Land Cover (2020), με τα σιτηρά να αποτελούν την κυρίαρχη καλλιέργεια.

Από τα ευρήματα γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων παλαιότερης έρευνας, καθώς και από τη μελέτη λιθολογικών τομών γεωτρήσεων που συλλέχθηκαν, προέκυψε μια λιθολογική μετάβαση από χονδρόκοκκες, χαμηλής περιεκτικότητας σε άργιλο αποθέσεις (πλευρικά κορήματα) στα δυτικά, προς λεπτόκοκκες αποθέσεις, με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ιλύ και άργιλο (λιμναίο περιβάλλον) προς το κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης. Επίσης, χρησιμοποιώντας τα παραπάνω ευρήματα καθώς και νεότερες έρευνες οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες καλύπτουν το σύνολο της υπολεκάνης, διακρίθηκαν σε τρεις ενότητες: ανώτερο στρώμα λεπτόκοκκων αλλουβιακών αποθέσεων, ενδιάμεση ακολουθία ιλύος-αργίλου και χαμηλότερο στρώμα χονδρόκοκκων αλλουβιακών αποθέσεων. Τα δύο στρώματα των

αλλουβιακών αποθέσεων συνδέονται προς τα δυτικά περιθώρια, καθώς το παρεμβαλλόμενο στρώμα ιλύος-αργίλου φθίνει σε πάχος και τελικά εξαλείφεται.

Οι κλιματικές συνθήκες στην υπολεκάνη Τυρνάβου έχουν τα χαρακτηριστικά του Μεσογειακού κλίματος με δροσερούς και υγρούς χειμώνες καθώς και ζεστά και ξηρά καλοκαίρια. Από τα συλλεχθέντα για την περιοχή μετεωρολογικά δεδομένα δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα βροχοβαθμίδας και θερμοβαθμίδας, όπου σύμφωνα με το τελευταίο προέκυψε μια πτώση $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου. Δημιουργήθηκαν επίσης διαγράμματα σχετικής υγρασίας και εξάτμισης, ενώ υπολογίστηκε τόσο η δυνητική εξατμισοδιαπνοή, όσο και η πραγματική.

Από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων μέτρησης της επιφανειακής απορροής προέκυψε για τον Πηνειό ποταμό ότι, η υδραυλική επικοινωνία του με τον ανώτερο υδροφόρο παρουσιάζει διαφοροποιήσεις τόσο χρονικές όσο και χωρικές, χωρίς ωστόσο να μπορεί να χαρακτηριστεί έντονη, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Για το ανάντη τμήμα απορροής του ποταμού στην περιοχή μελέτης, μεταξύ Αμυγδαλέας-Λάρισας, από την έναρξη των διαθέσιμων μετρήσεων το 1960 έως και το 1984, επικρατούν κυρίως συνθήκες εμπλουτισμού του Πηνειού από το ΥΥΣ, ενώ από το 1984 έως και τις πιο πρόσφατες μετρήσεις (2019) η σχέση υδραυλικής επικοινωνίας φαίνεται να αναστρέφεται. Στις περιπτώσεις όπου ο Πηνειός παρουσιάζει μικρότερη παροχή στα ανάντη τμήματα κατά τους χειμερινούς μήνες, οφείλεται στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και τις ευνοϊκές συνθήκες διήθησης, κάτι που επιβεβαιώνεται από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η παροχή παρουσιάζεται μεγαλύτερη στα ανάντη κατά τη χειμερινή περίοδο (απουσία αντλήσεων και εξάτμισης), εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο Πηνειός τροφοδοτεί το υδατικό σύστημα και μέρος του όγκου του νερού στα ανάντη μετακινείται προς την ακόρεστη ζώνη και στη συνέχεια προς τον υδροφόρο. Για το τμήμα μεταξύ Λάρισας-Γυρτώνης, βασιζόμενοι αποκλειστικά σε μικρό όγκο παλαιότερων δεδομένων (1972-1980), προέκυψε ότι ο Πηνειός τροφοδοτεί με νερό την ακόρεστη ζώνη κάτι που ήρθε σε αντίθεση με τα αντίστοιχα πιεζομετρικά δεδομένα. Για το τμήμα λοιπόν αυτό, εκτιμάται ότι δεν μπορούν να εξαχθούν ουσιαστικά συμπεράσματα, σχετικά με την αλληλεπίδραση ποταμού-υδροφόρου, λόγω του μικρού όγκου δεδομένων αλλά και γιατί υπεισέρχονται επιπλέον παράμετροι (σημαντικές απολήψεις, φράγματα), που τροποποιούν τις υπολογιζόμενες απώλειες μετάδοσης.

Για τον ποταμό Τιταρήσιο λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, δεν υπάρχουν ουσιαστικά δεδομένα μετρήσεων παροχής, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να υπολογισθούν απώλειες μεταφοράς. Η υδραυλική επικοινωνία, ωστόσο, του Τιταρήσιου με τον υδροφόρο θεωρείται δεδομένη, λόγω των υψηλών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και της διαπερατότητας των σχηματισμών της κοίτης του, ιδιαίτερα στην περιοχή ανάπτυξης του κώνου κορημάτων του. Επιπλέον, στο συγκεκριμένο τμήμα η κοίτη του Τιταρήσιου βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια

του υδροφόρου, γεγονός που δικαιολογεί την διήθηση από τον ποταμό προς την ακόρεστη και τελικά την κορεσμένη ζώνη.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην περιοχή έρευνας κατανέμονται και στις τρεις υδρολιθολογικές κατηγορίες. Έτσι, τόσο οι καρστικοί ανθρακικοί σχηματισμοί στα δυτικά περιθώρια, όσο και οι αδρομερείς αποθέσεις του Τεταρτογενούς, κυρίως στον κώνο απόθεσης του ποταμού Τιταρήσιου στο ΒΔ τμήμα της υπολεκάνης, ανήκουν στους υδροπερατούς σχηματισμούς. Οι υδροπερατές αυτές Τεταρτογενείς αποθέσεις συνεχίζονται και προς τα κατάντη κάτω από τα λεπτόκοκκα επιφανειακά υλικά του κεντρικού τμήματος της υπολεκάνης. Εκεί η εναλλαγή τους και με άλλα λεπτόκοκκα στρώματα (ιλύος-αργίλου) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της υδροπερατότητάς τους έτσι ώστε να μπορούν θεωρηθούν ως ημιπερατοί. Στην ίδια κατηγορία ανήκουν και οι λοφώδεις Πλειοκαινικές αποθέσεις, που συναντώνται επιφανειακά στο νότιο τμήμα της περιοχής, αλλά και ως υπόβαθρο των Τεταρτογενών αποθέσεων, εξαιτίας των συχνών εναλλαγών υδροπερατών-αδιαπέρατων στρωμάτων που τις αποτελούν. Αδιαπέρατους σχηματισμούς αποτελούν οι λεπτομερείς αποθέσεις ιλύος και αργίλου που εμφανίζονται κατά τόπους και χαρακτηρίζονται από ανομοιογενή ανάπτυξή τους, τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κάθετο διεύθυνση, καθώς και το υγιές τμήμα (μη διερρηγμένο, μη διαβρωμένο) των γενέσιων και σχιστόλιθων, που συναντώνται στα βόρεια κράσπεδα του πεδινού τμήματος.

Οι Τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις της υπολεκάνης Τυρνάβου φιλοξενούν μια ελεύθερη υδροφορία, κοντά στον κώνο κορημάτων του Τιταρήσιου στα ΒΔ. Λόγω της μετέπειτα βύθισης των αποθέσεων αυτών, κάτω από πλέον λεπτομερή στρώματα ιλύος και αργίλου, στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης, η ελεύθερη αυτή υδροφορία μεταπίπτει σε ένα σύστημα δύο υδροφοριών, μιας ανώτερης φρεάτιας και μιας βαθύτερης υπό-πίεση (ή μερικώς υπό-πίεση), οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους από τα λεπτομερέστερα στρώματα της ιλύος και της αργίλου. Το πάχος της φρεάτιας υδροφορίας δεν ξεπερνά τα 70m και χαρακτηρίζεται ως χαμηλής δυναμικής, ωστόσο είναι υψηλής σημασίας λόγω της προστασίας που προσφέρει, στην υποκείμενη υπό-πίεση υδροφορία, από ρύπανση. Το πάχος του υπό-πίεση υδροφόρου υπερβαίνει τα 400m στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής και τροφοδοτεί τη μεγάλη πλειοψηφία των παραγωγικών γεωτρήσεων της περιοχής.

Εντός των ανθρακικών σχηματισμών, στα δυτικά της υπολεκάνης, αναπτύσσεται μια δυναμική υδροφορία, η οποία λόγω του σημαντικού πάχους, της έντονης τεκτονικής καταπόνησης και του μεγάλου βαθμού καρστικοποίησης, είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διαίτα του αλλουβιακού υδροφόρου συστήματος. Αναφορικά με το καρστικό αυτό σύστημα που φιλοξενεί τη δυναμική υδροφορία, υπάρχουν διάφορες εκδοχές σχετικά με την ενιαία ή μη συμπεριφορά του. Βάσει των ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή προτάθηκε ότι το καρστικό σύστημα χωρίζεται σε δύο υπολεκάνες. Οι επιφανειακές εκτάσεις του καρστ διαχωρίζονται κατά μήκος των

φαραγγιών του Πηνειού και του Τιταρήσιου, ωστόσο συνδέονται υδραυλικά μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι το ευρύτερο καρστικό σύστημα Δαμασίου-Τυρνάβου-Κουτσόχερο. Νεότερες μελέτες έκαναν αναφορά για εποχιακά διαφοροποιούμενη υδραυλική συμπεριφορά του καρστικού αυτού συστήματος ή και για την ύπαρξη ενός υπόγειου υδροκρίτη, ο οποίος διαχωρίζει το καρστικό σύστημα σε δύο υποσυστήματα. Στην παρούσα έρευνα, έχοντας υπόψη όλες τις παραπάνω πληροφορίες, η κύρια καρστική δομή του Τυρνάβου, λήφθηκε ως μεμονωμένη υδρογεωλογική ενότητα, η οποία αλληλεπιδρά μόνο με τους όμορους αλλουβιακούς υδροφόρους. Η παραδοχή αυτή έγινε στο πλαίσιο της απλούστευσης των υπολογισμών που έγιναν για το υδατικό ισοζύγιο αλλά και της ερμηνείας των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην ούτως ή άλλως πολύπλοκη δομή του υπόγειου υδατικού συστήματος.

Οι βασικές υδραυλικές παράμετροι του υπό-πίεση υδροφόρου υπολογίστηκαν από την ανάλυση των δεδομένων δοκιμαστικών αντλήσεων, οι οποίες έλαβαν χώρα μετά την κατασκευή των γεωτρήσεων και αντλήθηκαν, στο πλαίσιο προηγούμενης έρευνας. Δεδομένου ότι οι τιμές της μεταβιβαστικότητας εξαρτώνται από το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου, δεν χρησιμοποιήθηκαν στην πορεία της διατριβής, ωστόσο οι υπολογιζόμενες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, μη εξαρτώμενες από το κορεσμένο πάχος καθώς και η χωρική τους κατανομή ελήφθησαν υπόψη. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας δεν παρουσίασαν κάποια ξεχωριστή τάση, γεγονός το οποίο υποδηλώνει την έντονη ετερογένεια του συγκεκριμένου υδατικού συστήματος. Η χωρική κατανομή των τιμών της αποθηκευτικότητας δεν παρουσιάζει επίσης κάποια τάση ομαδοποίησης παρουσιάζοντας και κάποιες ακραίες τιμές. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της αποθηκευτικότητας, καθώς επίσης και η χωρική τους κατανομή χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση του μαθηματικού μοντέλου υπόγειας ροής. Όσον αφορά το καρστικό σύστημα, λόγω των ελλιπών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές τιμές για την περιοχή τόσο για την αποθηκευτικότητα ($S = 0.18$), όσο και για την υδραυλική αγωγιμότητα ($k = 0.03 \text{ m/sec}$). Οι βιβλιογραφικές αυτές τιμές προτιμήθηκαν, καθώς τα υφιστάμενα δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων ήταν περιορισμένα σε αριθμό και ακρίβεια.

Ιδιαίτερη βαρύτητα στην παρούσα διατριβή δόθηκε, στη διαδικασία σύνθεσης και τεκμηρίωσης του δικτύου παρακολούθησης της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων της περιοχής έρευνας. Μέσα από την εφαρμογή ενός πρότυπου αλγορίθμου 14 κριτηρίων, προέκυψε ένα αξιόπιστο και πλήρες δίκτυο παρακολούθησης αποτελούμενο στην ισχυρή πλειοψηφία του (81.25%) από κοινές θέσεις μέτρησης της υπόγειας στάθμης και της χημικής ποιότητας νερού. Το μειονέκτημα στην περίπτωση αυτή, που δεν οφείλεται ωστόσο στον τρόπο σύνθεσης του δικτύου, ήταν ότι μόλις μία θέση παρακολούθησης της φρεάτιας υδροφορίας βρέθηκε για την υπολεκάνη Τυρνάβου. Τα ελάχιστα διαθέσιμα πιεζόμετρα της υδροφορίας αυτής, είτε είχαν καταστραφεί, είτε είχαν αποφραχθεί με την πάροδο

του χρόνου και αναγκαστικά τα αποτελέσματα αναφορικά με την φρεάτια υδροφορία βασίστηκαν στα παλαιότερα δεδομένα καθώς και στο μοναδικό πιεζόμετρο που βρέθηκε. Ιδανικά, ένα δίκτυο παρακολούθησης της φρεάτιας υδροφορίας με περισσότερες θέσεις θα είχε ως αποτέλεσμα, μια πιο εμπειριστατωμένη απόδοση της λειτουργίας και της εξέλιξης της αλλά και της αλληλεπίδρασης της υδροφορίας αυτής με την υπό-πίεση υδροφορία. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί, ότι η βασική σημασία της φρεάτιας υδροφορίας, λόγω της μικρής της δυναμικής, είναι η προστασία που παρέχει, στην υποκείμενη υπό-πίεση υδροφορία από ρύπανση, παίζοντας ουσιαστικά το ρόλο του προστατευτικού καλύμματος. Κατά τη διάρκεια της διατριβής οργανώθηκαν και έλαβαν χώρα πέντε (5) περίοδοι σταθμημετρήσεων, με συνολικά 188 μετρήσεις κατά την περίοδο 2016-2018. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε αποτύπωση των απόλυτων υψομέτρων όλων των σημείων παρακολούθησης, με τη χρήση διαφορικού GPS υψηλής ακρίβειας, γεγονός που οδήγησε σε αποσφαλμάτωση των αρχικών πιεζομετρικών χαρτών, με αποκλίσεις από τις αρχικές μετρήσεις μέχρι και 10m. Από την σύνθετη επεξεργασία (υδρογραφήματα, πιεζομετρικοί χάρτες, χωρική ανάλυση με χρήση Γ.Σ.Π.) των πρωτογενών δεδομένων υπόγειας στάθμης σε συνδυασμό με τις παλαιότερες χρονοσειρές, επιβεβαιώθηκαν αλλά και προέκυψαν συμπεράσματα που συνοψίζονται παρακάτω:

- Πριν την έναρξη της εντατικής εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων στην ευρύτερη περιοχή (μέσα δεκαετίας '80), υπήρχε υδραυλική ισορροπία μεταξύ των δύο υδροφοριών (φρεάτιας/υπό-πίεση), η οποία άρχισε να διαταράσσεται αμέσως μετά.
- Καταγράφηκε πτώση στάθμης 16m, με ετήσια διακύμανση άνω των 10m, του υπό-πίεση υδροφόρου μέσα σε 21 χρόνια, πριν και μετά τη δεκαετία του '80, χαρακτηριστική της υπερεκμετάλλευσης που υπέστη ο συγκεκριμένος υδροφόρος. Η αντίστοιχη πτώση του ελεύθερου υδροφόρου ήταν 8m και η ετήσια διακύμανση μικρότερη των 4m.
- Η υδροδυναμική κατάσταση του υδατικού συστήματος, στα δυτικά περιθώρια της υπολεκάνης, ακολουθεί την εξής εξελικτική πορεία πριν και μετά τα μέσα της δεκαετίας του '80: μικρές αυξομειώσεις και μικρή ετήσια κύμανση της υπόγειας στάθμης → συνεχιζόμενη πτωτική πορεία και μεγάλες ετήσιες διακυμάνσεις → σταθεροποίηση.
- Το εύρος κύμανσης της υπόγειας στάθμης είναι πολύ μεγαλύτερο στα κεντρικά τμήματα της υπολεκάνης έναντι των δυτικών περιθωρίων κυρίως στη δεκαετία του '80 και σε μικρότερο βαθμό έως και τις αρχές του 2000. Από το 2000 έως σήμερα ο ρυθμός πτώσης στάθμης πρακτικά μηδενίζεται και το σύστημα σταδιακά ανακάμπτει. Η αντίστοιχη εξελικτική πορεία πριν και μετά το '80 είναι: έντονη πτωτική τάση και μεγάλες ετήσιες κυμάνσεις → ύφεση πτωτικής τάσης, μέγιστες κυμάνσεις → επανάκαμψη της υπόγειας στάθμης.

- Το βορειοδυτικό τμήμα της υπολεκάνης εμφανίζεται πιο σταθερό στις μεταβολές της υπόγειας στάθμης, χαρακτηριστικό της διαφορετικής συμπεριφοράς της πηγής τροφοδοσίας (καρστικό σύστημα) έναντι των νοτιότερων τμημάτων. Η μη ενιαία αυτή συμπεριφορά του καρστικού συστήματος είχε γίνει αντικείμενο μελέτης και από παλαιότερες έρευνες στην περιοχή.
- Στο νοτιοδυτικό τμήμα της υπολεκάνης η ανάδυση των νεογενών μαργών, μεταξύ του καρστ και των αλλουβιακών ιζημάτων, αποτυπώνεται με την εντονότερη υδραυλική κλίση στο τμήμα αυτό, καθώς και τη διαφορετική υδροχημική ταυτότητα των υδάτων, όπως αποδείχθηκε στη συνέχεια.
- Σχετικά με τους μηχανισμούς λειτουργίας και εξέλιξης της υπολεκάνης: κατά τις περιόδους (α) 1973-1993, οι περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο από την έντονη πτώση στάθμης είναι η περιοχή της εισόδου του ποταμού Τιταρήσιου στην περιοχή έρευνας καθώς και το τμήμα της υπολεκάνης από τα ΝΔ προς το κεντρικό τμήμα αυτής, (β) 1993-2017, τα έντονα φαινόμενα πτώσης στάθμης, μετατοπίστηκαν προς το Α-ΝΑ τμήμα της υπολεκάνης, (γ) 1973-2017, όλο το κεντρικό και νότιο τμήμα της υπολεκάνης παρουσιάζει έντονα φαινόμενα πτώσης στάθμης ενώ προς τα βόρεια η κατάσταση εξισορροπείται σταδιακά με αποτέλεσμα να εμφανίζεται αύξηση του ύψους στάθμης, γεγονός που πιστοποιεί τη μεγαλύτερη δυναμική του βόρειου τμήματος του καρστικού όγκου.

Τα παραπάνω επιβεβαιώθηκαν και από την επεξεργασία των δεδομένων εκφόρτισης των πηγών Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας, όπου προέκυψε μια συστηματική αυξητική τάση των τιμών των συντελεστών στείρευσης από το 1973 έως και σήμερα. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζει τη συστηματική εκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού, η οποία ξεκίνησε το 1974 και εντατικοποιήθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '80. Η εντατικοποίηση αυτή των αντλήσεων και σε γειτονικές λεκάνες άμεσα συνδεδεμένες με το καρστ (λεκάνες Τσαριτσάνης, Πέρα Κάμπου), οδήγησαν σε μια προοδευτικά μειωμένη επανατροφοδότηση του καρστικού συστήματος, η οποία αποδόθηκε με τη συνεχόμενη αύξηση των συντελεστών στείρευσης των πηγών, που το εκφορτίζουν.

Κατά την εφαρμογή του υδατικού ισοζυγίου για δύο έτη αναφοράς, προέκυψε, (α) μια πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των εισροών και των εκροών του συστήματος για το έτος που θεωρήθηκε ότι το σύστημα βρισκόταν σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας (1985) και (β) ένα έλλειμα εισροών, σε σχέση με τις εκροές, της τάξης του 10% για το έτος αναφοράς 2017, όπου υπήρχαν πλήρη πρωτογενή δεδομένα.

Σχετικά με την παρακολούθηση της ποιότητάς των, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις (4) συνολικά δειγματοληψίες (2 ξηρές και 2 υγρές περιόδοι) από τον Σεπτέμβριο του 2016 έως τον Μάιο του 2018. Ιδιαίτερη βαρύτητα σε αυτή τη περίπτωση, δόθηκε στο αυστηρό πρωτόκολλο, βάσει του οποίου έλαβαν χώρα όλες οι σχετικές με τη δειγματοληψία διαδικασίες.

Από τη χωρική κατανομή των μετρήσεων πεδίου ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασαν οι θερμοκρασίες των υπόγειων υδάτων και οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου. Και στις δύο περιπτώσεις η γενική τάση της χωρικής τους κατανομής υποδεικνύει την κίνηση των υπόγειων υδάτων από τα δυτικά (πηγή τροφοδοσίας) προς το κέντρο και μετά προς τα ανατολικά της υπολεκάνης. Ωστόσο, υπήρξαν και περίοδοι όπου προς τα βόρεια και ανατολικά εμφανίστηκαν τιμές παρόμοιες με αυτές των δυτικών περιθωρίων, ως πρώτες ενδείξεις για πιθανές, χαμηλότερης δυναμικής τροφοδοσίες. Από την επεξεργασία των εργαστηριακών αναλύσεων προέκυψαν συνοπτικά τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Το μεγαλύτερο τμήμα της υπολεκάνης αποτελείται από σκληρά και γλυκά νερά.
- Η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων των κύριων χημικών στοιχείων είναι αποτέλεσμα ανάμειξης υδάτων διαφορετικών προελεύσεων: από τα δυτικά (κυρίαρχη πηγή τροφοδοσίας), από τα βόρεια κράσπεδα (κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο), από τα νοτιοανατολικά (μεσο-θεσσαλικοί λόφοι) και από τα ανατολικά (Όσσα).
- Η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων των βασικών κατιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) και των όξινων ανθρακικών (HCO_3^-), επηρεάζονται σαφώς από τη διάλυση των ανθρακικών σχηματισμών (στα δυτικά) και τα φαινόμενα ιοντοανταλλαγής (προς τα ανατολικά).
- Οι αυξημένες συγκεντρώσεις των βασικών ανιόντων (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-), συνδέονται κυρίως με τη χρήση αντίστοιχων φυτοπροστατευτικών και χημικών λιπασμάτων.
- Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις τιμές της Οδηγίας 98/93/ΕΚ και του ΦΕΚ 3282Β/19-9-2017 για την Ελλάδα, αναφορικά με το πόσιμο νερό. Εξάιρεση αποτελούν ορισμένες τιμές του μαγγανίου (Mn), οι οποίες αποδόθηκαν στην εφαρμογή φωσφορικών λιπασμάτων όσο και σε λύματα από μεταλλουργίες, χρώματα και γενικότερα αστικά λύματα.
- Οι διάφοροι ιοντικοί λόγοι που χρησιμοποιήθηκαν επιβεβαίωσαν, στις περισσότερες των περιπτώσεων τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των εργαστηριακών αναλύσεων. Επιπλέον, δόθηκαν περισσότερα δεδομένα για την πιθανή προέλευση των στοιχείων, ωστόσο η χρήση των λόγων αυτών από μόνη της μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να αποδώσει επισφαλή αποτελέσματα, οδηγώντας σε λάθος συμπεράσματα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν επιβοηθητικά, στην παρούσα έρευνα και συνδυαστικά με τα υπόλοιπα αποτελέσματα, που εξάχθηκαν από την ανάλυση των υδροχημικών δεδομένων.
- Οι δείκτες κορεσμού κύριων ανθρακικών ορυκτών είναι στο σύνολό τους θετικοί, υποδεικνύοντας, υπερκορεσμένα διαλύματα σε Ca και Mg, τάση του νερού για απόθεση αυτών των ορυκτών και σημαντικό χρόνο παραμονής των ανθρακικών ορυκτών στον υδροφόρο. Αντίθετα οι δείκτες κορεσμού του σιδηρίτη, του αλίτη και της γύψου είναι στο σύνολό τους αρνητικοί, υποδεικνύοντας έτσι ακόρεστα

διαλύματα στα ορυκτά αυτά και τάση για περαιτέρω διάλυση, επομένως απουσία των ορυκτών αυτών στο υδατικό περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής.

Αναφορικά με την ποιοτική αξιολόγηση των υπόγειων υδάτων της υπολεκάνης, αυτή εξετάστηκε τόσο από την περιβαλλοντική της διάσταση, όσο και από την σκοπιά της καταλληλότητάς τους για συγκεκριμένες χρήσεις. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε,

α) ο πρότυπος, για την ευρύτερη περιοχή αλλά και για τη χώρα, δείκτης PoS, ο οποίος απέδωσε το αποτύπωμα της περιβαλλοντικής ποιότητας για κάθε δείγμα νερού. Τα αποτελέσματά του, όσον αφορά το περιβαλλοντικό σκέλος της ποιοτικής κατάταξης, έδειξαν ότι η συντριπτική πλειοψηφία των δειγμάτων έχει ελάχιστο έως μηδαμινό επίπεδο ποιοτικής υποβάθμισης.

β) ο ευρέως διαδεδομένος δείκτης SAR και το διάγραμμα Wilcox, για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του νερού για άρδευση. Και σε αυτή τη περίπτωση, η συντριπτική πλειοψηφία των δειγμάτων νερού κατατάχθηκε στην κατηγορία με μικρό κίνδυνο αλκαλίωσης και μέσο κίνδυνο αλατότητας. Ως εκ τούτου κατάλληλα για άρδευση αλλά υπό ορισμένους περιορισμούς. Τα ελάχιστα (4) δείγματα που παρουσίασαν υψηλό κίνδυνο αλατότητας, καταλαμβάνουν μέρος των δυτικών κρασπέδων και το νοτιοανατολικό τμήμα της υπολεκάνης, τα οποία είναι αυτά που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα αναφορικά με τη συνολική ποιοτική τους ταξινόμηση.

γ) πραγματοποιήθηκε έλεγχος αναφορικά με την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 98/83/EK και την τροποποίηση της από την Οδηγία (ΕΕ) 2015/1787 (6.10.2015)]. Οι υπερβάσεις που προέκυψαν σε ορισμένα δείγματα, αφορούσαν κυρίως τα NO_3 και δευτερευόντως τα NH_4 και το Mn, όσον αφορά τις παραμέτρους που προσδιορίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε υδροχημική ταξινόμηση των υπόγειων υδάτων χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα Piper, Durov και εκτεταμένο Durov. Ο τελευταίος τύπος (expanded Durov) προτιμήθηκε για την περαιτέρω χωρική διαφοροποίηση της υπολεκάνης Τυρνάβου σε ζώνες, βάσει των υδροχημικών τύπων που προέκυψαν και αποδόθηκαν στις περιοχές αυτές οι επικρατούσες υδροχημικές διαδικασίες. Η προκύπτουσα ταξινόμηση αυτή ήρθε σε απόλυτη συμφωνία με τα προηγούμενα συμπεράσματα, τα οποία είχαν προκύψει από επεξεργασία τόσο των μετρήσεων πεδίου όσο και των εργαστηριακών αναλύσεων, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν ουσιαστικές διαφοροποιήσεις μεταξύ ξηρών και υγρών περιόδων.

Η ιδιαίτερη σημασία που έχουν τα υπόγεια ύδατα γενικότερα, αλλά και για τη συγκεκριμένη περιοχή ειδικότερα, ήταν το βασικό αντικείμενο έρευνας στην παρούσα διατριβή. Ωστόσο, τα επιφανειακά ύδατα αποτελούν και αυτά ένα ιδιαίτερο και ευαίσθητο θέμα, πόσο μάλλον όταν υπάρχει και αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών και των υπογείων. Για το λόγο αυτό, παράλληλα με το κύριο δίκτυο

παρακολούθησης των υπογείων υδάτων, λαμβάνονταν δείγματα, σε κάθε περίοδο δειγματοληψίας και από συγκεκριμένες θέσεις των ποταμών Πηνειού και Τιταρήσιου. Από την επεξεργασία των φυσικοχημικών παραμέτρων δεν παρατηρήθηκαν τιμές πέραν των φυσιολογικών ορίων και γενικότερα αυτές ήταν σε συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποτάμια της Ελλάδας. Ουσιαστικές μεταβολές, στις κυμάνσεις των παραμέτρων αυτών, δεν παρατηρήθηκαν ούτε και με τη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των τμημάτων αυτών των ποταμών με το σύνολο της υδρολογικής τους λεκάνης, βάσει παλαιότερης έρευνας. Αναφορικά με τα κύρια ιόντα και τα βαρέα μέταλλα, κατασκευάστηκαν χάρτες χωροχρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεών τους καθώς και σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες τιμές των υπογείων υδάτων, από τα οποία τα σημαντικότερα ευρήματα ήταν τα εξής:

- οι συγκεντρώσεις καλίου παρουσιάζονταν αυξημένες κατά τις ξηρές περιόδους, ενδεικτικό της χρήσης καλιούχων λιπασμάτων και της άμεσης αποτύπωσής τους, στα επιφανειακά ύδατα.
- Οι συγκεντρώσεις νατρίου των επιφανειακών υδάτων ήταν μικρότερες σε σχέση με αυτές των υπογείων σε αντίθεση με τις συγκεντρώσεις καλίου όπου οι επιφανειακές συγκεντρώσεις ήταν μεγαλύτερες.
- Οι συγκεντρώσεις ασβεστίου του Πηνειού κατά τις υγρές περιόδους, αυξάνονταν σημαντικά ξεπερνώντας τις αντίστοιχες των υπογείων, γεγονός που συνδέθηκε με την τροφοδοσία των επιφανειακών υδάτων από τις βροχοπτώσεις των περιόδων αυτών.
- Τα θεϊκά ιόντα παρουσίαζαν, μία αυξητική τάση από τα ανάντη προς τα κατόντη. Παρουσίαζαν επίσης και χρονική μεταβολή καθώς οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αφορούσαν την ξηρή περίοδο, μετά το τέλος της αρδευτικής περιόδου.
- Οι μέγιστες συγκεντρώσεις νιτρικών και για τα δύο ποτάμια, παρατηρήθηκαν τον Σεπτέμβριο, ωστόσο οι συγκεντρώσεις αυτές ήταν πολύ μικρότερες σε σχέση με αντίστοιχες των υπογείων υδάτων και απέχουν πολύ από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ποσιμότητας των 50 mg/L.
- Βάσει του διαγράμματος Wilcox για τα επιφανειακά ύδατα προέκυψε ότι, αντιπροσωπεύουν νερά χαμηλού κινδύνου αλκαλίωσης και μέσου κινδύνου αλατότητας καθιστώντας τα έτσι κατάλληλα για άρδευση κατ' αντιστοιχία με τα υπόγεια ύδατα.

Η στατιστική ανάλυση των υδροχημικών δεδομένων περιλάμβανε δύο στάδια εφαρμογής. Στο πρώτο στάδιο έγινε αναφορά στα βασικά περιγραφικά στατιστικά της κάθε υδροχημικής παραμέτρου, καθώς και ανάλυση συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων αυτών. Διερευνήθηκε αν το σύνολο των δεδομένων για κάθε παράμετρο, αποτελείται από ένα μεμονωμένο ή σύνθετο πληθυσμό καθώς και αν υπάρχουν ακραίες τιμές, με τη χρήση διαγραμμάτων πιθανοτήτων και αθροιστικής συχνότητας. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο στάδιο αυτό, επιβεβαίωσε σε

γενικές γραμμές τα προηγούμενα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την επεξεργασία των υδροχημικών δεδομένων των προηγούμενων Κεφαλαίων καθώς και τη χωρική κατανομή των αντίστοιχων παραμέτρων. Οι ισχυρές συσχετίσεις που προέκυψαν από την ανάλυση ήταν (α) της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το ανθρακικό ασβέστιο, τα όξινα ανθρακικά και το σύνολο των διαλυμένων στερεών, (β) του χλωρίου με τα νιτρικά ιόντα, (γ) του μαγνησίου με το ανθρακικό ασβέστιο, τα θειικά ιόντα και τα συνολικά διαλυμένα στερεά, (δ) του ασβεστίου με το ανθρακικό ασβέστιο, τα όξινα ανθρακικά και το σύνολο των διαλυμένων στερεών, ενώ δεν βρέθηκαν ισχυρές αρνητικές συσχετίσεις.

Το δεύτερο στάδιο της στατιστικής ανάλυσης αφορούσε στην εφαρμογή πιο σύνθετων μεθόδων επεξεργασίας. Από τη μέθοδο ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών, τόσο για τα δείγματα της υγρής όσο και δείγματα της ξηρής περιόδου, προέκυψαν 4 παραπλήσιες κύριες συνιστώσες: (ΚΣ1) η οποία σχετίζεται με διεργασίες τροφοδοσίας, ανθρωπογενούς ρύπανσης και αλατότητας, (ΚΣ2) η οποία σχετίζεται με παρόμοιες διεργασίες αλλά με διαφορετικές παραμέτρους έκφανσης, (ΚΣ3) η οποία συσχετίζεται με οξειδοαναγωγικές συνθήκες και (ΚΣ4) η οποία έχει ως κύρια παράμετρο έκφανσης τον χαλκό και συσχετίστηκε με τη χρήση αντίστοιχων υπερφωσφορικών λιπασμάτων.

Από την εφαρμογή της Ιεραρχικής Ανάλυσης Συστάδων, προέκυψε δενδροδιάγραμμα αποτελούμενο από δύο κύριες ομάδες, στις οποίες χαρακτηριστική ήταν η μεγάλη διαφορά στον αριθμό των δειγμάτων που τις αποτελούσαν. Η πρώτη ομάδα αποτελούνταν από το 81.2% των δειγμάτων και διαχωρίστηκε σε δύο επιμέρους υπό-ομάδες, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό των δειγμάτων (18.8%) αντιστοιχίστηκε στην δεύτερη ομάδα. Από τη χωρική κατανομή προέκυψε ότι η πρώτη υπό-ομάδα εκτείνεται κυρίως στο δυτικό-νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής, ενώ η δεύτερη υπό-ομάδα καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση, κυρίως στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης καθώς και στο ανατολικό τμήμα αυτής. Η δεύτερη από τις δύο κύριες ομάδες, καταλαμβάνει τμήματα του νοτιοδυτικού και νοτιοανατολικού μέρους της περιοχής έρευνας καθώς και ένα τμήμα της περιοχής όπου εκτείνεται ο κώνος κορημάτων του ποταμού Τιταρήσιου. Η χωρική κατανομή των υπό-ομάδων ήρθε σε συμφωνία με την γενική υδροχημική ταξινόμηση, διαχωρίζοντας την περιοχή φρέσκων νερών τροφοδοσίας στα δυτικά από την ανατολική περιοχή όπου επικρατούν διεργασίες ανάμιξης ή/και ιοντοανταλλαγής. Από την άλλη πλευρά, η χωρική κατανομή της δεύτερης ομάδας υπέδειξε τα τμήματα εκείνα της υπολεκάνης όπου παρουσιάστηκαν τα μεγαλύτερα προβλήματα νιτρορύπανσης.

Η εφαρμογή της μεθόδου Βηματικής Ανάλυσης Διακριτών βαθμίδων ήρθε σε συνέχεια της προηγούμενης μεθόδου, ώστε να αναδειχθούν οι παράμετροι εκείνες, που διαφοροποιούσαν τις ομάδες και υπό-ομάδες της Ιεραρχικής Ανάλυσης Συστάδων. Προέκυψε έτσι ότι, μεταξύ των δύο υπό-ομάδων υπάρχει διαφορετική διακύμανση ως προς το ασβέστιο, το κάλιο και τα θειικά ιόντα καθώς και ότι

υπάρχουν και κάποια δείγματα τα οποία δεν μπορούν να διαχωρισθούν. Από την άλλη πλευρά, η εξίσωση διάκρισης κατά τον διαχωρισμό των δύο κύριων ομάδων λειτουργεί απόλυτα και τα μεταξύ τους δείγματα διαχωρίζονται σαφώς. Οι βασικές υδροχημικές παράμετροι διαχωρισμού στην περίπτωση αυτοί ήταν το μαγνήσιο, το κάλιο και τα νιτρικά ιόντα. Τέλος, οι μεταβλητές διάκρισης που προέκυψαν μεταξύ των δύο υπό-ομάδων και της δεύτερης κύριας ομάδας, ήταν κατά βάση ένας συνδυασμός των μεταβλητών διάκρισης των δύο προηγούμενων εφαρμογών.

Ένα σημαντικό τμήμα της παρούσας διατριβής αποτέλεσε και η ισοτοπική υδρολογία. Κατά τη διάρκεια του 2018, πραγματοποιήθηκαν δύο περίοδοι δειγματοληψίας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency), προς ανάλυση των ισοτόπων $\delta^{18}\text{O}$ και το $\delta^2\text{H}$. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν στη Γερμανία στο πανεπιστήμιο του Lubeck, δημιουργήθηκε η Τοπική Ισοτοπική Γραμμή των Υπογείων Υδάτων για την υπολεκάνη Τυρνάβου. Η γραμμή αυτή ήταν παράλληλη και με μικρή μετατόπιση σε σχέση με τη γενικότερη Μετεωρική Γραμμή της Θεσσαλίας, ως αποτέλεσμα των κοντινών μέσων τιμών του οξυγόνου και του δευτερίου της περιοχής με τις αντίστοιχες τιμές για τη Θεσσαλία. Από την κλίση της ισοτοπικής γραμμής προέκυψε ότι, η επίδραση των διεργασιών της εξάτμισης είναι έντονη όσον αφορά στην προέλευση των υπόγειων υδάτων και μάλιστα οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε ένα υγρό περιβάλλον. Από την αντίστοιχη επεξεργασία των αναλύσεων για τα επιφανειακά ύδατα, προέκυψε επίδραση της εξάτμισης στους επιφανειακούς αποδέκτες. Η σύγκριση των δύο ισοτοπικών γραμμών μεταξύ τους (υπόγειων-επιφανειακών), υπέδειξε ότι δεν υπάρχει υδραυλική αλληλεπίδραση μεταξύ υπόγειων και επιφανειακών υδάτων ή αν υπάρχει δεν είναι σημαντική. Τα αποτελέσματα αυτά δεν ήρθαν σε αντίθεση με όσα είχαν ειπωθεί έως τώρα, σχετικά με την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων, όπου είχε αποδειχθεί ότι υπάρχει αυτή η αλληλεπίδραση ωστόσο φαίνεται να μην είναι τόσο έντονη. Επισημαίνεται ο περιορισμένος αριθμός ανάλυσης δειγμάτων επιφανειακών νερών για την εξαγωγή της αντίστοιχης ισοτοπικής γραμμής που ωστόσο δεν αποδυναμώνει τα ευρήματα της ανάλυσης που διενεργήθηκε. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις σημαντικές ενδείξεις που προέκυψαν στη συνέχεια, οι οποίες αν επιβεβαιωθούν ανατρέπουν τα δεδομένα σχετικά με τους μηχανισμούς τροφοδοσίας της υπολεκάνης, καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω έρευνα στην ευρύτερη περιοχή, με τη βοήθεια των ισοτοπικών αναλύσεων σε ένα πυκνότερο δίκτυο υπογείων και επιφανειακών υδάτων αλλά και δειγμάτων κατακρημνισμάτων, τόσο από τους δυτικούς λόφους όσο και από τον ορεινό όγκο της Όσσας στα ανατολικά.

Η χωρική κατανομή των υπόγειων ισοτοπικών δειγμάτων έδειξε λοιπόν, μια αύξηση των αρνητικών τιμών του $\delta^{18}\text{O}$ από τα δυτικά προς τα ανατολικά, γεγονός που ήρθε σε αντίθεση με τα βιβλιογραφικά δεδομένα σχετικά με την επίδραση της

ηπειρωτικότητας στην ισοτοπική σύσταση των κατακρημνισμάτων, θεωρώντας πάντα ως αποκλειστική πηγή τον καρστικό όγκο Δαμασίου-Τυρνάβου στα δυτικά. Με βάση αυτή τη χωρική κατανομή υπήρχαν πλέον ενδείξεις και για μια δευτερεύουσα τροφοδοσία από τα ανατολικά, η οποία με βάση και τις υψηλές τιμές $\delta^{18}\text{O}$ (κοντά στο -10‰) προέρχεται από τον ορεινό όγκο της Όσσας. Η περαιτέρω έρευνα σχετικά με τους σχηματισμούς που απαρτίζουν το δυτικό τμήμα της αντικλινικής δομής της Όσσας αλλά και της τεκτονικής της δομής, ενίσχυσαν τη θεωρία αυτή της δευτερεύουσας τροφοδοσίας από ανατολικά, διαμέσου μεγάλων ρηξιγενών δομών. Από τη σύγκριση των υδροχημικών δεδομένων των ανθρακικών σχηματισμών της Όσσας (από τα οποία θεωρήθηκε ότι προέρχεται το νερό τροφοδοσίας), με αυτά του ανατολικού τμήματος της περιοχής έρευνας, δεν προέκυψαν σαφή συμπεράσματα. Ωστόσο, σημειώνεται ότι τα συγκρίσιμα αυτά υδροχημικά δεδομένα αφορούσαν διαφορετικές χρονικές περιόδους αλλά ήταν τα μόνα διαθέσιμα. Αυτό είναι ένα ακόμα στοιχείο που χρήζει βελτίωσης, αναφορικά με όσα ειπώθηκαν και προηγουμένως σχετικά με την περαιτέρω έρευνα της θεωρίας της εξ ανατολών δευτερεύουσας τροφοδοσίας της υπολεκάνης Τυρνάβου.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι πρόκειται για σημαντικές ενδείξεις αλλά όχι, ακόμα, αποδείξεις. Κι αυτό γιατί, η παραπάνω θεωρία δεν μπορεί να αποδειχθεί με τις μέχρι τώρα μετρήσεις και τα μέχρι τώρα δεδομένα, εξηγεί όμως σε σημαντικό βαθμό το φαινόμενο και ως εκ τούτου χρήζει αναφοράς και περαιτέρω έρευνας. Υπάρχουν και ερωτήματα που δεν απαντήθηκαν με κύριο το γιατί, εφόσον ισχύει η θεωρία αυτή, η ισοτοπική αυτή υπογραφή της καρστικής υδροφορίας κάποιου υψομέτρου δεν εμφανίζεται και στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης, όπου και εκεί υπάρχει σαφής διαχωρισμός των υδροφοριών. Η θεωρία αυτή πλέον, μπορεί να επιβεβαιωθεί ή και να καταρριφθεί, μόνο, όπως ειπώθηκε, με την διεξοδική περαιτέρω έρευνα, η οποία πλέον ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας διατριβής. Παρόλα αυτά θεωρείται ότι δόθηκε το ερέθισμα και η βάση για να γίνει στο μέλλον κάτι τέτοιο, προάγοντας έτσι τις γνώσεις σχετικά με τους μηχανισμούς λειτουργίας και εξέλιξης, με απώτερο σκοπό την επίτευξη ενός πιο στοχευμένου και ολοκληρωμένου μοντέλου διαχείρισης της ευρύτερης περιοχής.

Από την ανάλυση πιέσεων προέκυψε ότι από τις σημειακές πηγές ρύπανσης, όπως αυτές ορίζονται στο ΣΔΛΑΠ, ο ποταμός Πηνειός δέχεται υψηλή ένταση πίεσης από τις βιομηχανικές μονάδες, στο μεγαλύτερο τμήμα του εντός της κύριας περιοχής έρευνας, όπως αντίστοιχα συμβαίνει και για τον ποταμό Τιταρήσιο. Αναφορικά με τις υπόλοιπες σημειακές πηγές, η ένταση πιέσεων προέκυψε, κατά κύριο λόγο, χαμηλή και για τους δύο ποταμούς. Αναφορικά με τις διάχυτες πηγές ρύπανσης, χαρακτηριστική είναι η επίδραση των αζωτούχων ενώσεων και δη των νιτρικών ιόντων, στην περιοχή καθώς περίπου το 82% των υπόγειων δειγμάτων παρουσίασε συγκεντρώσεις νιτρικών πάνω από 10 mg/L, τιμή η οποία είναι ένα ενδεικτικό κατώφλι για τη ρύπανση από νιτρικά άλατα σε φυσικά συστήματα. Τα τμήματα της

υπολεκάνης με τα μεγαλύτερα προβλήματα νιτρικών ήταν το δυτικό, σε έναν άξονα βορρά-νότου και το νότιο-νοτιοανατολικό. Η εκτίμηση που έγινε, σχετικά με την εμφάνιση των υψηλών αυτών συγκεντρώσεων νιτρικών στα συγκεκριμένα τμήματα της υπολεκάνης, ήταν ότι οφείλεται σε έναν ή περισσότερους από τους εξής παράγοντες: (i) έντονη αγροτική εκμετάλλευση δυναμικών καλλιεργειών, (ii) ανάπτυξη συνθηκών ελεύθερης υδροφορίας, (iii) μικρό βάθος υπόγειας στάθμης, (iv) περιορισμένος ρυθμός τροφοδοσίας και (v) οξειδωτικές συνθήκες.

Από την εκτίμηση των επιπτώσεων των διαφόρων πιέσεων στα επιφανειακά ύδατα, προέκυψε ότι τα τμήματα των ποταμών, Πηνειού και Τιταρήσιου εντός της υπολεκάνης, ανήκουν στην κατηγορία πιθανού κινδύνου, ενώ η τεχνητή λίμνη Αργυροπουλίου, κατατάσσεται στην κατηγορία σε κίνδυνο, όσον αφορά τη μη επίτευξη των στόχων της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Αναφορικά με τα υπόγεια υδατικά συστήματα της υπολεκάνης, σύμφωνα με τον διαχωρισμό τους από το ΣΔΛΑΠ του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, προέκυψε ότι αυτά κατατάσσονται στην «ΚΑΛΗ» χημική κατάσταση, με τοπικές επιβαρύνσεις νιτρικών λόγω αγροτικών δραστηριοτήτων και τοπικές υπερβάσεις των ιχνοστοιχείων σιδήρου και μαγγανίου.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο DPSIR (**D**iving forces-**P**ressures-**S**tate-**I**mpact-**R**esponse), ως μια συγκεντρωτική περιγραφή των πιέσεων, των αποτελεσμάτων τους καθώς και των τρόπων αντιμετώπισής τους για την περιοχή έρευνας. Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων έγινε συστηματική χρήση των μοναδικών αξιόπιστων υφιστάμενων δεδομένων: η διακύμανση της υπόγειας στάθμης και η διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων. Τα δεδομένα αυτά, αν και δεν κάλυπταν την πλήρη έκταση μιας μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ωστόσο είναι χαρακτηριστικά και αντιπροσωπευτικά για την περιοχή έρευνας, στην οποία η γεωργική παραγωγή με τη χρήση υπόγειων υδατικών πόρων, αποτελεί την κυρίαρχη δραστηριότητα. Για το λόγο αυτό εκτιμήθηκε ότι από τη θεώρησή τους εξήχθησαν αξιόπιστα συμπεράσματα.

Ως επιστέγασμα όλων των προηγούμενων αναφορών και δεδομένων, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής για την υπολεκάνη Τυρνάβου. Μετά τη σύνταξη του εννοιολογικού μοντέλου για την υπολεκάνη Τυρνάβου, βασιζόμενο στη γεωλογική και υδρογεωλογική δομή της περιοχής, αλλά και στην ανάλυση πιεζομετρικών, υδροχημικών δεδομένων αλλά και στην ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου, επιλέχθηκε ο κώδικας MODLOW, ως ο πλέον κατάλληλος και ευρέως διαδεδομένος για την επίλυση προβλημάτων σχετικών με τη ροή των υπόγειων υδάτων στην κορεσμένη ζώνη πορώδους μέσου. Ως περιοχή εφαρμογής ορίστηκε η υπολεκάνη Τυρνάβου, προεκτεινόμενη προς τα ανατολικά καλύπτοντας διπλάσια περίπου έκταση από την αρχική της υπολεκάνης. Η προέκταση αυτή κρίθηκε σκόπιμη έτσι ώστε να συμπεριληφθεί στην προσομοίωση και η πιθανή τροφοδοσία από την Όσσα στα ανατολικά αλλά και για να αποφευχθούν πιθανές επιδράσεις, σε μεγάλα τμήματα της κύριας περιοχής έρευνας λόγω της μικρής

απόστασης των περιοχών αυτών, από τις καθοριζόμενες οριακές συνθήκες. Κατά την κατακόρυφη διάσταση, το σύστημα προσομοιώθηκε από δύο στρώματα (φρεάτια, υπό πίεση υδροφορία), διαχωριζόμενα μεταξύ τους από ημιπερατό μέσο χαμηλών υδραυλικών ιδιοτήτων. Τόσο στο δυτικό όσο και στο ανατολικό όριο της περιοχής προσομοίωσης επιλέχθηκε η οριακή συνθήκη μεταβλητού φορτίου (GHB). Για τις πλευρικές εισροές από τα βόρεια, νότια και νοτιοανατολικά περιθώρια της περιοχής, χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες σταθερής ροής, οι οποίες προσομοιώθηκαν με τη χρήση του πακέτου των γεωτρήσεων (Wells), ενώ για τους ποταμούς Πηνειό και Τιταρήσιο χρησιμοποιήθηκε το πακέτο River (RIV).

Για την ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής επιλέχθηκε το έτος 2017, με τα περισσότερα πρωτογενή δεδομένα και προσαρμόστηκε το υδατικό ισοζύγιο που είχε υπολογισθεί για την ευρύτερη έκταση της περιοχής προσομοίωσης. Για τον υπολογισμό των εκροών του συστήματος εκτιμήθηκαν οι αρδευτικές ανάγκες, με τη βοήθεια της εξατμισοδιαπνοής για κάθε καλλιέργεια. Κατά τη διαδικασία αυτή έλαβαν χώρα ορισμένες προσεγγίσεις, έτσι ώστε να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί και να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, χωρίς ωστόσο να αλλοιωθεί η όλη διαδικασία της ρύθμισης. Τα αποτελέσματα της ρύθμισης σε συνθήκες μόνιμης ροής, αξιολογήθηκαν με (i) στατιστικά στοιχεία, (ii) διαγράμματα διασποράς, (iii) σύγκριση της προσομοιωμένης με την μετρημένη πιεζομετρία και (iv) την αξιοπιστία του υδατικού ισοζυγίου. Σύμφωνα με όλους τους παράγοντες αξιολόγησης προέκυψε ικανοποιητική ρύθμιση σε συνθήκες μόνιμης ροής, υποδεικνύοντας έτσι ότι το μοντέλο αναπαριστά επαρκώς τις πραγματικές συνθήκες.

Αναφορικά με τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής επιλέχθηκε ως περίοδος ρύθμισης το χρονικό διάστημα από το 2000 έως και το 2012. Και στη περίπτωση αυτή, η εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών βασίστηκε στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής για κάθε ένα έτος προσομοίωσης. Σημειώνεται ωστόσο ότι οι καλλιέργειες ολόκληρης της περιοχής θεωρήθηκαν αμετάβλητες από έτος σε έτος και η διαφοροποίηση των ετήσιων αρδευτικών αναγκών βασίστηκε στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αλλά και στο ποσοστό συνεισφοράς της βροχόπτωσης στην τροφοδοσία των καλλιεργειών. Η προσέγγιση αυτή θεωρήθηκε ότι δεν επιδρά ουσιαστικά στο τελικό αποτέλεσμα της άσκησης προσομοίωσης και ότι σε κάθε άλλη περίπτωση θα απαιτούνταν δυσανάλογα υπερβολικός χρόνος, τόσο για τη συγκέντρωση των απαιτούμενων δεδομένων για όλα τα έτη, όσο και για τον ακριβή υπολογισμό των αρδευτικών αναγκών με διαφοροποιημένες καλλιέργειες ανά έτος. Τα αποτελέσματα της ρύθμισης στην περίπτωση της μη μόνιμης ροής ήταν εξίσου ικανοποιητικά με τα αντίστοιχα της ρύθμισης σε μόνιμη ροή, σύμφωνα πάντα με τα ίδια κριτήρια αξιολόγησης. Από τις στατιστικές παραμέτρους προέκυψε πολύ ικανοποιητική ρύθμιση του μοντέλου με μια μικρή υποεκτίμηση στις μικρότερες τιμές στάθμης (<60m) και μια επίσης μικρή υπερεκτίμηση στις μεγαλύτερες τιμές στάθμης (>60m). Οι πιεζομετρικές καμπύλες (μετρημένες-προσομοιωμένες)

παρουσίασαν ικανοποιητική ταύτιση, λαμβάνοντας υπόψη και το μεγάλο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, σε μια περιοχή με εναλλαγές περιόδων εντατικών αντλήσεων και περιόδων ηρεμίας, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο αναπαριστά επαρκώς την κατανομή του φορτίου και το δίκτυο ροής. Η σύγκριση των υδρογραφημάτων των γεωτρήσεων παρατήρησης (χρονοσειρές μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών στάθμης), απέδωσε καλή ταύτιση των τάσεων αλλά και του εύρους κύμανσης της στάθμης, λαμβάνοντας υπόψη και τη μεγάλη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά και τους εξωγενείς παράγοντες επιρροής. Έτσι θα μπορούσε να ειπωθεί ότι, τα παραγόμενα φορτία από το μοντέλο ταιριάζουν ικανοποιητικά με τα δεδομένα πεδίου και είναι σε θέση να αναπαράγουν την παρατηρούμενη τάση, υποδηλώνοντας την ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώνει με ακρίβεια την εξέλιξη του συστήματος.

Από την ανάλυση ευαισθησίας που έλαβε χώρα, μεταβάλλοντας τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητάς (K), της ειδικής απόδοσης (S_y) και του συντελεστή ειδικής εναποθηκευτικής ικανότητας (S_s), προέκυψε ότι, το συγκεκριμένο μοντέλο (α) είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς οποιαδήποτε μεταβολή της, είτε αυξάνει το σφάλμα μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών (αύξηση του K) είτε καθιστά αδύνατη την επίλυσή του (μείωση του K) και (β) παρουσιάζεται λιγότερο ευαίσθητο αναφορικά με τα S_y και S_s , ειδικά εντός του εύρους κύμανσης -25% έως 50%, των αρχικών ρυθμισμένων τιμών τους.

Το τελευταίο στάδιο της άσκησης προσομοίωσης περιλάμβανε την επαλήθευση του μοντέλου, η οποία πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα 2013-2018, όπου υπήρχαν και οι πρωτογενείς μετρήσεις της υπόγειας στάθμης. Τόσο από τα στατιστικά κριτήρια όσο και από τα γραφικά (διαγράμματα, πιεζομετρικές καμπύλες), προέκυψε ικανοποιητική απόκριση του μοντέλου στις πραγματικές συνθήκες και τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια με αυτά των σταδίων ρύθμισης. Συμπερασματικά λοιπόν, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα απ' όλα τα στάδια σύνθεσης του μαθηματικού μοντέλου, συντάχθηκε και βαθμονομήθηκε ένα αξιόπιστο εργαλείο προσομοίωσης της υπόγειας ροής, το οποίο λαμβάνει υπόψη την ακριβή υδρογεωλογική δομή και υδροδυναμική εξέλιξη του συστήματος. Ως εκ τούτου, το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τη μελλοντική διαχείριση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής έρευνας.

Με βάση το παραπάνω συμπέρασμα, για την αξιοπιστία του συγκεκριμένου μοντέλου ως εργαλείου διαχείρισης, χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να αποδοθεί η απόκριση του υπόγειου υδατικού συστήματος της περιοχής, υπό το καθεστώς διάφορων μελλοντικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής. Στην περίπτωση του δυσμενέστερου υποθετικού σεναρίου (σύμφωνα με το μοντέλο HA), υιοθετήθηκε μείωση των κατακρημνισμάτων κατά 24.34%, για το χρονικό διάστημα 2021-2040, η οποία επέφερε μια πτώση της μέσης στάθμης κατά -1.586 m και κατ' αντιστοιχία μια μέση μείωση του όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων νερού της τάξης των $140 \cdot 10^6$

m³. Στην περίπτωση του ευνοϊκότερου υποθετικού σεναρίου (σύμφωνα με το μοντέλο RH), υιοθετήθηκε αύξηση των κατακρημνισμάτων κατά 12.02%, για το ίδιο χρονικό διάστημα (2021-2040). Με βάση την αύξηση αυτή προέκυψε μια άνοδος της μέσης στάθμης κατά +0.327 m, η οποία με τη σειρά της επέφερε μια μέση αύξηση του όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων νερού της τάξης των 28*10⁶ m³.

Όσον αφορά τις δύο παραπάνω περιπτώσεις διαχειριστικών σεναρίων, σημειώνεται ότι για την απλοποίηση και την άμεση εφαρμογή τους έλαβαν χώρα κάποιες παραδοχές, οι οποίες αναφέρονται και περιγράφονται αναλυτικά στο οικείο κεφάλαιο της διατριβής. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι:

(α) και στις δύο περιπτώσεις αυτό που μεταβλήθηκε ήταν η τροφοδοσία του συστήματος αποκλειστικά και μόνο από τη βροχόπτωση, η οποία αποτελεί μόλις το 20% της συνολικής τροφοδοσίας του συστήματος. Έτσι, στην υποθετική μεταβολή της συνολικής τροφοδοσίας κατά 20%, η επίδραση θα ήταν κατά πολύ εντονότερη, τόσο στη μεταβολή της στάθμης, όσο και στη μεταβολή του όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων.

(β) Ο λόγος που δεν εξετάστηκαν τα σενάρια μεταβολής της συνολικής τροφοδοσίας (GHB, γεωτρήσεις εισροής, βροχόπτωση) ήταν διότι αποτελεί εξαιρετικά χρονοβόρα αλλά και επισφαλής διαδικασία (ελλείψει περισσότερων δεδομένων), το να προσδιοριστούν οι μεταβολές που επιφέρει η μεταβολή των βροχοπτώσεων στους άλλους παράγοντες τροφοδοσίας. Κι αυτό γιατί πρόκειται για μια αλυσίδα μεταβολών που δεν αφορούν μόνο τη συγκεκριμένη υπολεκάνη αλλά την ευρύτερη περιοχή. Παρ' όλα αυτά, τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διατριβή θα μπορούσαν να αποτελέσουν το έναυσμα για μελλοντική έρευνα, έτσι ώστε να αξιολογηθούν και να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο τα ποσοτικά αποτελέσματα, που επιφέρουν τα παραπάνω διαχειριστικά σενάρια κλιματικής αλλαγής και γιατί όχι να εξεταστούν και οι ποιοτικές μεταβολές των υπόγειων υδατικών πόρων, υπό το πρίσμα αυτών των σεναρίων.

Ως συνιστάμενο μέτρο αντιμετώπισης του δυσμενέστερου υποθετικού σεναρίου προκρίθηκε από την παρούσα έρευνα ο τεχνητός εμπλουτισμός, καθώς πρόκειται για μία μέθοδο η οποία μπορεί να υποστηριχθεί τόσο από τις γεωλογικές-υδρογεωλογικές συνθήκες όσο και από το κοινωνικοοικονομικό καθεστώς της περιοχής έρευνας. Εξετάστηκε το ενδεχόμενο εκμετάλλευσης του 10% των μέσων χειμερινών εκφορτίσεων των πηγών Μάτι Τυρνάβου, έτσι ώστε να τροφοδοτηθούν 20 γεωτρήσεις με ρυθμό παροχής 60 m³/h ανά χειμερινή περίοδο (Νοέμβριος-Μάρτιος, 151 μέρες). Μια τέτοια εφαρμογή για συνολικά 19 έτη, θα επέφερε άνοδο της μέσης στάθμης κατά +0.280 m και μια αναπλήρωση του όγκου των ρυθμιστικών αποθεμάτων νερού της τάξης των 25*10⁶ m³, σε σχέση πάντα με το δυσμενέστερο υποθετικό σενάριο. Μεγαλύτερη άνοδο παρουσίαζαν οι γεωτρήσεις παρατήρησης που βρίσκονταν κοντά στη προτεινόμενη θέση εμπλουτισμού (ανατολικό τμήμα των πηγών Μάτι Τυρνάβου) και οι γεωτρήσεις στα κατάντη του κεντρικού και ανατολικού

τμήματος της περιοχής προσομοίωσης, ενώ τη μικρότερη οι γεωτρήσεις που βρίσκονταν κοντά στην επαφή των ασβεστολιθικών σχηματισμών με τις αλλουβιακές αποθέσεις στα δυτικά κράσπεδα της υπολεκάνης (πρακτικά ανεπηρέαστες).

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε διεξοδικά και ουσιαστικά με την μελέτη του ΥΥΣ της υπολεκάνης Τυρνάβου, αποδίδοντας μια πολύ καλή προσέγγιση, περιγραφή και αξιολόγηση της κατάστασης των υδατικών πόρων και της υδροδυναμικής λειτουργίας και εξέλιξής τους. Προέκρινε νέες μεθόδους συλλογής, ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων για την σύνθεση αποτελεσμάτων, υιοθετώντας την συνδυαστική αξιολόγησή τους. Επιβεβαίωσε το βασικό μοντέλο δομής και υδροδυναμικής λειτουργίας της περιοχής μελέτης, ωστόσο ανέδειξε την αναστροφή τάσεων που παρατηρείται προς ανάκαμψη της ποιοτικής κατάστασης και συνέδεσε το παρατηρούμενο αποτέλεσμα με τις διαχειριστικές πρακτικές και τάσεις της περιοχής. Ανακάλυψε και πιστοποίησε σε σημαντικό βαθμό νέους μηχανισμούς τροφοδοσίας του συστήματος, ανατρέποντας την μέχρι σήμερα κρατούσα εικόνα και προσφέροντας με τον τρόπο αυτό νέες προοπτικές στον τρόπο διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης. Καταγράφοντας την αρχική κατάσταση ήπιας εκμετάλλευσης και ισορροπίας, την μετέπειτα κατάσταση υπερεκμετάλλευσης και την υφιστάμενη κατάσταση των υπόγειων υδατικών πόρων, προέβλεψε την απόκριση του συστήματος σε πιθανές μελλοντικές καταστάσεις και προέκρινε τρόπους αντιμετώπισης. Η διατριβή αυτή εκτιμάται ότι μπορεί να συνεισφέρει στην ανάπτυξη ανθεκτικότητας (ανθεκτικά συστήματα) και την επίτευξη ασφάλειας (επάρκειας) στον τομέα νερού του συστήματος Τυρνάβου, ως ένας κρίκος του συμπλέγματος Νερό-Περιβάλλον-Ενέργεια-Τροφή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2011). Detailed data table for the 2011 priority list of hazardous substances. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, (accessed 20 November 2011).
- Aggarwal, P. K., Araguas, L., Garner, W. A., Groeninig, M., & Kulkarni, K. (2009). Introduction to water sampling analysis for isotope hydrology. Water Resources Programme—IAEA. <http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/other/Sampling%20booklet%20web.pdf>. Accessed December.
- Ajami, H., McCabe, M. F., Evans, J. P., & Stisen, S. (2014). Assessing the impact of model spin-up on surface water-groundwater interactions using an integrated hydrologic model. *Water Resources Research*, 50(3), 2636-2656.
- Al-Bassam, A. M., & Khalil, A. R. (2012). DurovPwin: a new version to plot the expanded Durov diagram for hydro-chemical data analysis. *Computers & geosciences*, 42, 1-6.
- Al-Bassam, A. M., Khalil, A. R., & Kassem, O. M. (2014). Using Updated DurovPwin Program for Hydro-Chemical Data Processing: Case study of Al-Ula area, Saudi Arabia. *RECENT ADVANCES in ENVIRONMENTAL SCIENCE and GEOSCIENCE*, 75.
- Alcamo, J., Endejan, M. B., Kaspar, F., & Rösch, T. (2001). The GLASS model: a strategy for quantifying global environmental security. *Environmental Science & Policy*, 4(1), 1-12.
- Alexandridis, T. K., Panagopoulos, A., Galanis, G., Alexiou, I., Cherif, I., Chemin, Y., & Zalidis, G. C. (2014). Combining remotely sensed surface energy fluxes and GIS analysis of groundwater parameters for irrigation system assessment. *Irrigation science*, 32(2), 127-140.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO-Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (<http://www.fao.org/docrep>) ARPAV (2000), La caratterizzazione climatica della Regione Veneto, Quaderni per. Geophysics, 156, 178.
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliot, R., Howell, T., Itenfisu, D., & Jensen, M. (2005). The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. American Society of Civil Engineers Environmental and Water Resource Institute (ASCE-EWRI). 59 pp.
- Allen, M. J., & Yen, W. M. (2002). Introduction to measurement theory. 4. printing ed. Long Grove, IL.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W. (1992). Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic press.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (1996). Ion exchange and sorption. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 142-201.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Arampatzis, G., Panagopoulos, A., Pisinaras, V., Tziritis, E., & Wendland, F. (2018). Identifying potential effects of climate change on the development of water resources in Pinios River Basin, Central Greece. *Applied water science*, 8(2), 1-17.
- Argiriou, A. A., & Lykoutis, S. (2005). Stable isotopes in rainfall over Greece: results of the 2000–2003 measurement campaign. *Isotopic composition of the precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate*, Vienna, Austria, 83-98.
- Argiriou, A. A., & Lykoudis, S. (2006). Isotopic composition of precipitation in Greece. *Journal of Hydrology*, 327(3-4), 486-495.
- Ashley, R. P., & Lloyd, J. W. (1978). An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. *Journal of Hydrology*, 39(3-4), 355-364.

- ASTM (1993). D5447-93 Standard Guide for application of a groundwater flow model to a site specific problem, 6pp.
- ASTM (1994) D5609-94 Standard guide for defining boundary conditions in groundwater flow modeling.
- ASTM (1994) D5611-94 Standard guide for conducting a sensitivity analysis for a groundwater flow model application, 5pp.
- ASTM (1999). D5880–95 Standard guide for subsurface flow and transport modelling.
- ASTM (2002). D5981–96 Standard guide for calibrating a groundwater flow model application, 6pp.
- Atekwana, E. A., Atekwana, E. A., Rowe, R. S., Werkema Jr, D. D., & Legall, F. D. (2004). The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*, 56(4), 281-294.
- Atkinson, T. C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *Journal of hydrology*, 35(1-2), 93-110.
- Aubouin, J. (1957). Essai de correlations stratigraphiques en Grece occidentale. *Bulletin de la Société géologique de France*, 6(4-5), 281-304.
- Aubouin, J. (1959). Contribution à l'étude géologique de la Grèce septentrionale: les confins de l'Epire et de la Thessalie; Place des Hellénides parmi les édifices structuraux de la Méditerranée orientale. Laboratoire de géologie de l'Université.
- Aubouin, J. (1965). *Geosynclines*. Developments in Geotectonics, v.1: Amsterdam. Elsevier.
- Aubouin, J. (2013). *Geosynclines*. Elsevier.
- Babiy L. (1984). Reliability of information in hydrochemical investigations. In: Eriksson E (eds.) Proc. of Conf. Hydrochemical balances of freshwater systems pp.179-185. Uppsala.
- Barzegar, R., Moghaddam, A. A., & Tziritis, E. (2016). Assessing the hydrogeochemistry and water quality of the Aji-Chay River, northwest of Iran. *Environmental earth sciences*, 75(23), 1-15.
- Biel, R. (1944). *Climatology of the Mediterranean area*: Chicago, The University of Chicago Press.
- Boonstra, J., & de Ridder, N. A. (1981). Numerical modelling of groundwater basins: a user-oriented manual (No. 29). ILRI.
- Bosch, P., & Gabrielson, P. (2003). Environmental indicators: Typology and use in reporting. *European Environment Agency, Copenhagen*.
- Bower, C. A., Ogata, G., & Tucker, J. M. (1968). Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. *Soil Science*, 106(1), 29-34.
- Brahana, J. V., Thrailkill, J., Freeman, T., & Ward, W. C. (1988). Carbonate rocks. *Hydrogeology*. The Geological Society of North America, Boulder Colorado. 1988. p 333-352. 4 fig, 4 tab, 85 ref.
- Bro, R., Smilde, A. K. (2014). Principal component analysis. *Analytical Methods*, 6(9), 2812-2831.
- Brouwer, C., Prins, K., & Heibloem, M. (1989). *Irrigation water management: irrigation scheduling*, FAO. Water Resources, Development and Management Service Land and Water Development Division.
- Brown, K., & Trott, S. (2014). Groundwater flow models in open pit mining: can we do better?. *Mine Water and the Environment*, 33(2), 187-190.
- Brunn, J. (1956). Contribution a l' etude geologique du Pinde septentrional et d' une partie de la Macedoine occidentale. *Ann. Geol. Pays Hell.*, 7, 1-358.
- Burdon, D. J., & Mazloum, S. (1958). *Some Chemical Types of Ground-water from Syria*. By David J. Burdon and Soubhi Mazloum. Unesco.
- Büttner, G., Feranec, J., Jaffrain, G., Mari, L., Maucha, G., & Soukup, T. (2004). The CORINE land cover 2000 project. *EARSeL eProceedings*, 3(3), 331-346.
- Caputo, R. (1990). Geological and structural study of the recent and active brittle deformation of the Neogene-Quaternary basins of Thessaly (Central Greece).
- Caputo, R., Bravard, J., Helly, B. (1994). The Pliocene-Quaternary tecto-sedimentary evolution of the Larissa Plain (Eastern Thessaly, Greece). *Geodinamica Acta (Paris)*, 1994, 7, 4, 219-231.
- Caputo, R. (1994). Late Quaternary faulting in Thessaly, Greece. *Proceed. Congr. Recent Crustal Movements*, Kobe, December 6–11, 1993. *J. Geol. Soc. Japan Spec. Issue*, 397–399 (Kobe).

- Caputo, R. (1995). Inference of a seismic gap from geological data: Thessaly (Central Greece) as a case study. *Ann. Geofis.* 38, 1–19.
- Caputo, R., Piscitelli, S., Oliveto, A., Rizzo, E., Lapenna, V. (2003). The use of electrical resistivity tomographies in active tectonics: examples from the Tyrnavos Basin, Greece. *Journal of Geodynamics*, 36(1-2), 19-35.
- Caputo, R., Helly, B., Pavlides, S., Papadopoulos, G. (2004). Palaeoseismological investigation of the Tyrnavos fault (Thessaly, central Greece). *Tectonophysics*, 394(1-2), 1-20.
- Cattell, R.B. (1978). *The scientific use of factor analysis in behavioral and life sciences*, New York, Plenum Press. 76, pp. 97-124.
- Celestino, A.E.M.; Ramos-Leal, J.; Cruz, D.A.M.; Tuxpan, J.; Bashulto, J.D.L.; Ramírez, J.M. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality, using multivariate statistical approaches and water quality index in a wastewater irrigated region. *Water* 2019, 11, 1702.
- Ceron, J., Espinosa, R., Bosch, A. (2000). Numerical analysis of hydrogeochemical data: a case study (Alto Guadalentin, southeast Spain), *Applied Geochemistry*, 15, pp. 1053-1067.
- Chai, Y., Xiao, C., Li, M., & Liang, X. (2020). Hydrogeochemical Characteristics and Groundwater Quality Evaluation Based on Multivariate Statistical Analysis. *Water*, 12(10), 2792.
- Chatfield, C., Collins, A. (1980). *Principal component analysis. Introduction to multivariate analysis.* Springer, Boston, MA, pp. 57-81.
- Chourasia, L. P., & TELLAM, J. H. (1992). Determination of the effect of surface water irrigation on the groundwater chemistry of a hard rock terrain in central India. *Hydrological sciences journal*, 37(4), 313-328.
- Chow, V.T. (1964). *Handbook of applied hydrology.*
- Christensen, T. H., Bjerg, P. L., Banwart, S. A., Jakobsen, R., Heron, G., & Albrechtsen, H. J. (2000). Characterization of redox conditions in groundwater contaminant plumes. *Journal of Contaminant hydrology*, 45(3-4), 165-241.
- Christensen, O. B., Drews, M., Christensen, J. H., Dethloff, K., Ketelsen, K., Hebestadt, I., & Rinke, A. (2006). The HIRHAM regional climate model. Version 5 (beta). Technical Report 06-17.
- Chung, E. S., Hong, W. P., Lee, K. S., & Burian, S. J. (2011). Integrated use of a continuous simulation model and multi-attribute decision-making for ranking urban watershed management alternatives. *Water resources management*, 25(2), 641-659.
- Clark, I.D., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology.* Lewis Publishers, New York, pp. 328.
- Compagnie Generale de Geophysique. (1972). *Reconnaissance par prospection électrique dans la plaine de Thessalie (Grèce): France, CGG.*
- Constadinidis, D. (1978). *Hydrodynamique d'un système aquifère hétérogène. Hydrogéologie de la Thessalie orientale (Doctoral dissertation, France. Université Scientifique et Médicale de Grenoble).*
- Constadinidis, D. (1978b). *Comparaison des méthodes de détermination du coefficient d'emmagasinement des nappes aquifères. Application aux formations alluviales et karstiques de Thessalie orientale (Grèce).*
- Coplen, T. B., Herczeg, A. L., & Barnes, C. (2000). Isotope engineering—using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems. In *Environmental tracers in subsurface hydrology* (pp. 79-110). Springer, Boston, MA.
- Coutagne, A. (1954). Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. *La Houille Blanche*, 360-374.
- Craig, H. (1961). Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, 133(3467), 1833-1834.
- Douglas, E. B., Leo, W. N. (1977). *Hydrochemical relationships using partial correlation coefficients*, *Water Resources Bull.*, v.13, no. 4, pp. 843-846.
- Danalatos, N. G. (1993). *Quantified analysis of selected land use systems in the Larissa region. Greece (unpublished PhD dissertation, Wageningen Agricultural University).*
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436-468.

- Demitrack, A. (1986). The late Quaternary geologic history of the Larissa plain. Thessaly. Greece: Tectonic, climatic and human impact on the landscape (Soil stratigraphy, Neolithic period, Pinios river, Uranium/Thorium disequilibrium dating). (Doctoral dissertation, Stanford University).
- Deverel S. J., Millard S. P. (1988). Distribution and mobility of selenium and other trace elements in shallow groundwater of the western San Joaquin Valley, California. *Environmental Science and Technology* 22:697-702.
- Directive, C. (1998). On the quality of water intended for human consumption. Official Journal of the European Communities, 330, 32-54.
- Directive, W. F. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official journal of the European communities, 22(12), 2000.
- Dono, G., Giraldo, L., & Severini, S. (2010). Pricing of irrigation water under alternative charging methods: Possible shortcomings of a volumetric approach. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1795-1805.
- Dotsika, E., Lykoudis, S., & Poutoukis, D. (2010). Spatial distribution of the isotopic composition of precipitation and spring water in Greece. *Global and Planetary Change*, 71(3-4), 141-149.
- Dotsika, E., Poutoukis, D., Raco, B., & Psomiadis, D. (2010). Stable isotope composition of Hellenic bottled waters. *Journal of Geochemical Exploration*, 107(3), 299-304.
- Drever J. (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments*. Prentice-Hall, 3rd ed., p.436
- Durov, S. A. (1948). Natural waters and graphic representation of their composition. In *Dokl Akad Nauk SSSR* (Vol. 59, No. 3, pp. 87-90).
- Dworak, T., Berglund, M., Laaser, C., Strosser, P., Roussard, J., Grandmougin, B., ... & Rodríguez-Díaz, J. A. (2007). EU water saving potential (Part 1-Report).
- Electrowatt Engineering Services. (1967). Preliminary results: Athens, Ministry of Public Works, Development of the Thessaly plain. Preliminary study and feasibility report.
- Elzamy, A., Hussin, B., Abu-Naser, S. S., & Doheir, M. (2015). Predicting Software Analysis Process Risks Using Linear Stepwise Discriminant Analysis: Statistical Methods.
- Essink, O. (2000). Groundwater Modelling, Utrecht University, Interfaculty Centre of Hydrology Utrecht, Institute of Earth Sciences, Department of Geophysics, pp. 201.
- E.U. Council. (1998). Council directive 98/33 about water quality intended for human composition. Official paper of the European Communities VL 330:32-54.
- European Commission. (2003). Analysis of Pressures and Impacts-Guidance Document No 3.
- European Commission. (2016). Guidelines on Integrating Water Reuse into Water Planning and Management in the context of the WFD (Issue June). http://ec.europa.eu/environment/water/pdf/Guidelines_on_water_reuse.pdf
- European Environment Agency. (2020). CORINE Land Cover, Methodology and Nomenclature, <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>. Accessed 2020.
- Expósito, A., & Berbel, J. (2017). Why is water pricing ineffective for deficit irrigation schemes? A case study in southern Spain. *Water resources management*, 31(3), 1047-1059.
- FAO. (1978). Effective Rainfall in Agriculture. FAO Irrigation and drainage paper. <http://www.fao.org/docrep/X5560E/X5560E00.htm>
- Fetter, C. W., Boving, T., & Kremer, D. (2017). *Contaminant hydrogeology*. Waveland Press.
- Ford, D., & Williams, P. D. (2013). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Frigge, M., Hoaglin, D. C., Iglewicz, B. (1989). Some implementations of the boxplot. *The American Statistician*, 43(1), 50-54.
- Galazoulas, E. C., & Petalas, C. P. (2014). Application of multivariate statistical procedures on major ions and trace elements in a multilayered coastal aquifer: the case of the south Rhodope coastal aquifer. *Environmental Earth Sciences*, 72(10), 4191-4205.
- Gale, I., Neumann, I., Calow, R., & Moench, D. M. (2002). The effectiveness of Artificial Recharge of groundwater: a review.

- Galioto, F., Guerra, E., Raggi, M., & Viaggi, D. (2017). The impact of new regulations on water pricing in the agricultural sector: a case study from Northern Italy. *Agricultural Economics Review*, 18(2), 77-95.
- Gallardo, A. H., Reyes-Borja, W., & Tase, N. (2005). Flow and patterns of nitrate pollution in groundwater: a case study of an agricultural area in Tsukuba City, Japan. *Environmental geology*, 48(7), 908-919.
- Gat, J. R., & Gonfiantini, R. (1981). Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle.
- Gat, J. R., Bowser, C. J., & Kendall, C. (1994). The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere: estimate based on stable isotope data. *Geophysical Research Letters*, 21(7), 557-560.
- Globally Harmonized System (GHS)*, (Rev.1). (2005). GHS classification manual. (accessed 12 February 2013).
- Godfriaux, I. (1968). *Etude géologique de la région de l'Olympe (Grèce) (Doctoral dissertation, Université de Lille.)*.
- Greswell, R. (1995). A laboratory investigation of flow and transport processes in the Lincolnshire limestones (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., & Turner, K. A. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology journal*, 10(4), 455-474.
- Güler, C., Kurt, M. A., Alpaslan, M., & Akbulut, C. (2012). Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Journal of Hydrology*, 414, 435-451.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). Modflow-2000, the u. s. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. Open-file report. U. S. Geological Survey, (92), 134.
- Heaton, R. D. (1981). Wastewater reclamation and reuse. *GeoJournal*, 5(5), 483-501.
- Helly, B., Bravard, J., Caputo, R. (2000). Η ανατολική Θεσσαλική πεδιάδα. Μεταβολές των ιστορικών τοπίων και η προσχωματική εξέλιξη, *Θεσσαλικό Ημερολόγιο* 38. Σελ. 3-35.
- Heng, L. K. (2002). Deficit irrigation practices (No. 22). Food & Agriculture Org.
- Hill, R. A. (1940). Geochemical patterns in Coachella valley, California. *Transactions - American Geophysical Union*, 21, 46-53.
- Hill, M. C. (2000). Methods and guidelines for effective model calibration. In *Building Partnerships* (pp. 1-10).
- Hounslow A. (1995). Water quality data: Analysis and interpretation. Lewis Publishers CRC press, pp.397
- Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability*, 9(10), 1734.
- Jayakumar, R., Siraz, L. (1996). Factor analysis in hydrochemistry of coastal aquifers – a preliminary study, *Environmental Geology*, 31 (3/4), pp. 174-177.
- Jolliffe, I. (2011). Principal component analysis. *International encyclopedia of statistical science*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1094-1096.
- Ilias, A., Panoras, A., & Angelakis, A. (2014). Wastewater recycling in Greece: The case of Thessaloniki. *Sustainability*, 6(5), 2876-2892.
- IMPRESS, W. (2003, April). Guidance for the analysis of pressures and impacts in accordance with the Water Framework Directive. In Guidance Document prepared by WG IMPRESS. Available online at <http://forum.europa.eu.int/Public/irc/env/wfd/library>, accessed at (Vol. 7).
- International Toxicity Estimates for Risk (ITER). (2011). Toxicology Data Network. International Toxicity Estimates for Risk (accessed 30 November 2012).
- Iwashita, M., & Shimamura, T. (2003). Long-term variations in dissolved trace elements in the Sagami River and its tributaries (upstream area), Japan. *Science of the total environment*, 312(1-3), 167-179.
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 141-151

- Karageorgis, A. P., Skourtos, M. S., Kapsimalis, V., Kontogianni, A. D., Skoulikidis, N. T., Pagou, K., & Levkov, Z. (2005). An integrated approach to watershed management within the DPSIR framework: Axios River catchment and Thermaikos Gulf. *Regional environmental change*, 5(2-3), 138-160.
- Karagiorgou, O. (2001). *Urbanism and economy in late antique Thessaly*. University of Oxford. Trinity, Oxford.
- Karakostas, V., Papazachos, C., Papadimitriou, E., Fouvelis, M., Kiratzi, A., Pikridas, C., ... & Galanis, O. (2021). The March 2021 Tyrnavos, central Greece, doublet (Mw6. 3 and Mw6. 0): Aftershock relocation, faulting details, coseismic slip and deformation. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 58, 131-178.
- Karamanis, D., Stamoulis, K., Ioannides, K., & Patiris, D. (2008). Spatial and seasonal trends of natural radioactivity and heavy metals in river waters of Epirus, Macedonia and Thessalia. *Desalination*, 224(1-3), 250-260.
- Keery, J., Binley, A., Crook, N., & Smith, J. W. (2007). Temporal and spatial variability of groundwater–surface water fluxes: Development and application of an analytical method using temperature time series. *Journal of Hydrology*, 336(1-2), 1-16.
- Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., ... & Wyser, K. (2005). A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). SMHI.
- Koppen, W. (1936). *Das geographische system der klimat*. Handbuch der klimatologie, 46.
- Koppen, W. P., & Geiger, R. (1968). *Klima der Erde: Climate of the Earth*. Perthes.
- Korzun, V. I. (1984). *World Water Balance and Water Resources of the Earth* (English transl., UNESCO, Paris, 1978). *Gypsum precipitation from cold brines in an anoxic basin in the eastern Mediterranean Scientific staff of Cruise Bannock*, 12.
- Konikow, L. F. (1978). Calibration of ground-water models. In *Verification of mathematical and physical models in hydraulic engineering* (pp. 87-93). ASCE.
- Koukouvelas, I. K., Nikolakopoulos, K. G., Kyriou, A., Caputo, R., Belesis, A., Zygouri, V., ... & Tsentzos, I. (2021). The March 2021 Damasi Earthquake Sequence, Central Greece: Reactivation Evidence across the Westward Propagating Tyrnavos Graben. *Geosciences*, 11(8), 328.
- Koutsis, R., & Stournaras, G. (2011). Groundwater vulnerability assessment in the Loussi polje area, N Peloponessus: the PRESK method. In *Advances in the Research of Aquatic Environment* (pp. 335-342). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Kristensen, P. (2004). *The DPSIR Framework*. National Environmental Research Institute, Denmark. European Topic Centre. *European Environment Agency*.
- Kukurić, N., & Hall, M. J. (1998). The electronic encapsulation of knowledge for groundwater Quality management. *Water resources management*, 12(1), 51-79.
- Lambrakis, N., Tiniakos, L., Voudouris, K., Kallergis, G. (2000). Hydrogeologische Untersuchungen auf der insel Serifos zur Beschaffenheit der granodioritischen Wasser. *Beitrage zur Hydrogeologie* 51, Graz 2000, 95-100.
- Lachenbruch, P. A., & Goldstein, M. (1979). Discriminant analysis. *Biometrics*, 69-85.
- Leake, W. (1830). *Travels in the Morea: with a map and plans*. John Murray.
- LeGrand, H., Stringfield, V. (1971). Development and distribution of permeability in carbonate aquifers. *Water Resources Research*, 7(5), 1284-1294.
- Lerner, D. N., Issar, A. S., & Simmers, I. (1990). *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge* (Vol. 8, pp. 99-228). Hannover: Heise.
- Liu, C. W., Lin, K. H., & Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313(1-3), 77-89.
- Liu, W., Yu, J., Shen, J., Zheng, Q., Han, M., Hu, Y., & Meng, X. (2021). Application of Clustering and Stepwise Discriminant Analysis Based on Hydrochemical Characteristics in Determining the Source of Mine Water Inrush. *Geofluids*, 2021.
- Lloyd, J. W. (1965). The hydrochemistry of the aquifers of north-eastern Jordan. *Journal of Hydrology*, 3(3-4), 319-330.

- Lloyd, J. W., & Heathcote, J. A. A. (1985). Natural inorganic hydrochemistry in relation to ground water.
- Lyra, A., Pliakas, F., Skias, S., & Gkiougkis, I. (2016). Implementation of DPSIR framework in the management of the Almyros basin, Magnesia Prefecture. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 50(2), 825-834.
- Maillet, E. T. (1905). *Essais d'hydraulique souterraine & fluviale*. A. Hermann.
- Masoumi, F., Najjar-Ghabel, S., & Safarzadeh, A. (2021). Automatic calibration of groundwater simulation model (MODFLOW) by indetermistic SUFI-II algorithm. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(4), 16-16.
- Mather, J. R. (1978). *The climatic water balance in environmental analysis*. DC Heath and Company, Lexington, Massachusetts, 239.
- Mattas, C., Voudouris, K. S., & Panagopoulos, A. (2014). Integrated Groundwater Resources Management Using the DPSIR Approach in a GIS Environment Context: A Case Study from the Gallikos River Basin, North Greece. *Water*, 6(4), 1043-1068.
- Matthess, G. (1982). *The properties of ground-water* (No. 551.49 M38)
- McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. US Geological Survey.
- Menberg, K., Blum, P., Kurylyk, B. L., & Bayer, P. (2014). Observed groundwater temperature response to recent climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11), 4453-4466.
- Milanovic, P. T. (1981). *Karst hydrogeology* (No. 551.49 M637). Water Resources Publications.
- Mirus, B. B., & Loague, K. (2013). How runoff begins (and ends): Characterizing hydrologic response at the catchment scale. *Water Resources Research*, 49(5), 2987-3006.
- Misra, K. C. (2012). *Introduction to geochemistry: principles and applications*. John Wiley & Sons.
- Missimer, T. M., Guo, W., Walker, C. W., & Maliva, R. G. (2002). Hydraulic and density considerations in the design of aquifer storage and recovery systems. *Florida Water Resources Journal*, 55(2), 30-36.
- Morell, I., Gimenez, E., Esteller, M. (1996). Application of principal components analysis to the study of salinization on the Castellon Plain (Spain), *The Science of the Total Environment*, 177, pp. 161-171.
- Mountrakis, D., Sapountzis, E., Kiliyas, A., Eleftheriadis, G., Christofides, G. (1983). Paleogeographic conditions in the western Pelagonian margin in Greece during the initial rifting of the continental area. *Can J Early Sci* 20:1673–1681.
- Mountrakis, D., Kiliyas, A., Pavlides, S., Zouros, N., Spyropoulos, N., Tranos, M., Soulakellis, N. (1993). Field study of the southern Thessaly highly active fault zone. *Proceedings of the 2nd congress of the Hellenic Geophysical Union, Florina 5-7 May, vol 2/3:603-614*.
- Negrel, P., Pauwels, H., Dewandel, B., Gandolfi, J. M., Mascré, C., & Ahmed, S. (2011). Understanding groundwater systems and their functioning through the study of stable water isotopes in a hard-rock aquifer (Maheshwaram watershed, India). *Journal of Hydrology*, 397(1-2), 55-70.
- Nouri, J., Mahvi, A. H., Jahed, G. R., & Babaei, A. A. (2008). Regional distribution pattern of groundwater heavy metals resulting from agricultural activities. *Environmental Geology*, 55(6), 1337-1343.
- Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., Voudouris, K. (2015). A GIS/remote sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*, 525, 197-208.
- Olmez I (1989) Pollution source identification in groundwater. Report No MITNRL-036, Institute of Technology, Cambridge.
- Omman, I., Stocker, A., & Jäger, J. (2009). Climate change as a threat to biodiversity: An application of the DPSIR approach. *Ecological Economics*, 69(1), 24-31.
- Panagopoulos, A. (1995). A methodology for groundwater resources management of a typical alluvial aquifer system in Greece (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- Panagopoulos, A., Lloyd, J., Fitzsimons, V. (1995). Groundwater evolution of the Tirnavos alluvial basin, central Greece, as indicated by hydrochemistry. In *Proc 3rd hydrogeological conference, Hellenic Chapter of IAH, Heraklion* (pp. 332-344).
- Panagopoulos, A., Kosmas, C., Pateras, D., Panoras, A., Danalatos, N., Yassoglou, N. (2001). Guidelines for establishing a code for good agricultural practice in the river Pinios sedimentary basin, southern

Greece. In *Proc. 12th World Fertilizer Congress, Beijing, China. Preprints, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China.*

Panagopoulos A., Voudouris K., Hionidi M., Koumantakis I. (2002). Irrational water resources management impacts on the coastal aquifer system of Corinthia. *Proc. 5th Int. Conference Protection and Restoration of the Environment, Skiathos, v.1, pp.419-426.*

Panagopoulos A., Teloglou I., Stathaki S., Ilias A., Dalambakis P., Arampatzis G. and Hatzigiannakis E. (2004). Groundwater artificial recharge possibilities at the Tumpa region aquifer system (N. Greece), VII International Conference on Protection and Restoration of the Environment, June 28 – July 1, Mykonos, Greece.

Panagopoulos, A., Karyotis, A., Georgiou, T., Tsitouras, A. (2006). Groundwater natural background levels and threshold definition in the Eastern Thessaly groundwater body (Pinios River Basin, Central Greece). *Greek Case Study Report, BRIDGE Project.*

Panagopoulos A., Dalambakis P., Vrouhakis Y., Stathaki S., Vizantinopoulos S., Panoras A. (2007). Residues of soil fumigant 1,3-Dichloropropene and its related compounds in the groundwater – Greece 2005-2007: monitoring networks design and sampling campaigns – Final field phase report, NAGREF, 109p plus appendices, Thessaloniki. [Confidential report].

Panagopoulos A., Vrouhakis I. and Stathaki S. (2011). A methodological approach for the selection of groundwater monitoring points: application in typical Greek basin. 9th International Hydrogeological Congress, 4th MEM Workshop on the Hydrology of the Fissured Rocks, 5-8 October, Kalavrita, Greece.

Panagopoulos, A., Kassapi, K. A., Arampatzis, G., Perleros, B., Drakopoulou, S., Tziritis, E., Chrysafi, A. A., Vrouhakis, I. (2012). Assessment of chemical and quantitative status of groundwater systems in Pinios hydrological basin-Greece. In *Proc. Int. Conf. Protection and restoration of the environment XI, Thessaloniki* (pp. 511-517).

Panagopoulos A., Arampatzis G., Ilias A., Vizantinopoulos S., Vrouhakis I., Dalambakis P., Hatzigiannakis E. (2014). An approach to unbiased groundwater monitoring networks compilation for PPPs residues field studies. *Proc. 41st Int. Congress of IAH, Marrakech.*

Panagopoulos A., Arampatzis G., Vizantinopoulos S., Dalambakis P., Ilias A., Vrouhakis I. and Stathaki S. (2014). Monitoring networks design and performance of monitoring campaigns for the investigation of residues of the herbicide FLUOMETURON and its metabolites in the groundwater resources of Greece, LRI, Field report (2013) & Final report (2014).

Panagopoulos, G., Angelopoulou, D., Tzirtzilakis, E., Giannouloupoulos, P. (2016). The contribution of cluster and discriminant analysis to the classification of complex aquifer systems. *Environmental Monitoring Assessment* 188, pp.590-612.

Panagopoulos A., Vrouhakis I., Vizantinopoulos S., Dalambakis P., Ilias A., Stathaki S., Arampatzis G., Hatzigiannakis E., Karyotis Th. and Karyoti A. (2017). Monitoring networks design and performance of monitoring campaigns for the investigation of residues of the nematicide FENAMIPHOS and its metabolites in the groundwater resources of Greece, SWRI, Field report (2015) & Final Field report (2017).

Panagopoulos, A., Herrmann, F., Pinaras, V., & Wendland, F. (2018). Impact of climate change on irrigation need and groundwater resources in Pinios basin. In *Proceedings* (Vol. 2, No. 11, p. 659). MDPI AG.

Panda, U. C., Sundaray, S. K., Rath, P., Nayak, B. B., & Bhatta, D. (2006). Application of factor and cluster analysis for characterization of river and estuarine water systems—a case study: Mahanadi River (India). *Journal of hydrology*, 331(3-4), 434-445.

Panoras, A., Ilias, A., Skarakis, G., Papadopoulos, A., Papadopoulos, F., Parisopoulos, G., ... & Zdragas, A. (2000). Reuse of Treated Municipal Waste Water for Sugar Beet Irrigation. *Journal of Balkan Ecology*, 3(4), 91-95.

Panoras, A., Evgenidis, G., Bladenopoulou, S., Melidis, B., Doitsinis, A., Samaras, I., ... & Masti, T. (2001). Corn irrigation with reclaimed municipal wastewater. In *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY* (Vol. 7, pp. 699-706).

Panoras, A., and Ilias, A. (2003). Assessing the suitability of Thessaloniki reclaimed municipal wastewater for irrigation purposes. *Agricultural Engineering* 5-6: 139-142.

- Park, Y., Kim, Y., Park, S. K., Shin, W. J., & Lee, K. S. (2018). Water quality impacts of irrigation return flow on stream and groundwater in an intensive agricultural watershed. *Science of the Total Environment*, 630, 859-868.
- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. (2004). PHREEQC2 User's Manual and Program, Water-Resources Investigations Report.
- Payne, B. R., Δημητρούλα, Χ., Λεοντιάδης, Ι. Λ., & Καλλέργης, Γ. Α. (1976). Environmental isotope data in the Western Thessaly valley, Greece: use of mathematical model for quantitative evaluations with tritium = Συμβολή της ισοτοπικής υδρολογίας εις την επίλυσιν υδρογεωλογικών προβλημάτων εις Δυτ. Θεσσαλίαν. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 12(2), 29-94.
- Petalas, C., & Anagnostopoulos, K. (2006). Application of stepwise discriminant analysis for the identification of salinity sources of groundwater. *Water Resources Management*, 20(5), 681-700.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions - American Geophysical Union*, 25, 914-928.
- Prickett, T. A. (1979). Ground-Water Computer Models—State of the Art a. *Groundwater*, 17(2), 167-173.
- Rao, Y. S., Reddy, T. V. K., & Nayudu, P. T. (1997). Groundwater quality in the Niva river basin, Chittoor district, Andhra Pradesh, India. *Environmental Geology*, 32(1), 56-63.
- Ravikumar, P., Somashekar, R. K., & Prakash, K. L. (2015). A comparative study on usage of Durov and Piper diagrams to interpret hydrochemical processes in groundwater from SRLIS river basin, Karnataka, India. *Elixir Earth Sci*, 80(2015), 31073-31077.
- Reghunath, R., Sreedhara Murthy, T.R., Raghavan, B.R. (2002). The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India, *Water Research*, 36, pp. 2437-2442.
- Reimann C., Filzmoser P. (1999). Normal and lognormal distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, vol.39 (9).
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R., & Dutter, R. (2011). *Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R*. John Wiley & Sons.
- Richards L. (1969). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USA Salinity Laboratory Staff. *Agriculture Handbook no.60*.
- Rouhani, S. (1985). Variance reduction analysis. *Water Resources Research*, 21(6), 837-846.
- Rouhani, S., & Hall, T. J. (1988). Geostatistical schemes for groundwater sampling. *Journal of Hydrology*, 103(1-2), 85-102.
- Rushton, K. R., & Wedderburn, L. A. (1973). Starting conditions for aquifer simulations. *Groundwater*, 11(1), 37-42.
- Rushton, K. R. (1978). Estimating transmissivity and storage coefficient from abstraction well data. *Groundwater*, 16(2), 81-85.
- Sandoval, J. A., & Tiburan Jr, C. L. (2019). Identification of potential artificial groundwater recharge sites in Mount Makiling Forest Reserve, Philippines using GIS and Analytical Hierarchy Process. *Applied geography*, 105, 73-85.
- Sarma, D. D. (2010). *Geostatistics with applications in earth sciences*. Springer Science & Business Media.
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). *Chemistry for environmental engineering and science* (Vol. 5, p. 587590). New York: McGraw-Hill.
- Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 115-124.
- Sharma, L., Greskowiak, J., Ray, C., Eckert, P., & Prommer, H. (2012). Elucidating temperature effects on seasonal variations of biogeochemical turnover rates during riverbank filtration. *Journal of hydrology*, 428, 104-115.

- Singh, A., Panda, S. N., Kumar, K. S., & Sharma, C. S. (2013). Artificial groundwater recharge zones mapping using remote sensing and GIS: a case study in Indian Punjab. *Environmental management*, 52(1), 61-71.
- Singh, A. (2014). Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: a review. *Science of the Total Environment*, 499, 414-423.
- Schoeller, H. (1948). Le regime hydro-geologique des calcaires eocenes du synclinal du Dyr el Kef (Tunisie). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5(1-3), 167-180.
- Schoeller, H. (1962). Eaux souterraines. In *Eaux souterraines*. Masson.
- Schoeller, H. (1967). Hydrodynamique dans le karst. *Chronique d'Hydrogéologie*, 10, 7-21.
- Schwartz, F. W., & Zhang, H. (2003). *Fundamentals of Groundwater* John Wiley & Sons. New York, 583.
- Serra, L. (1954). Le contrôle hydrologique d'un bassin versant. *La Houille Blanche (3èmes Journées de l'hydraulique, SHF), Paris*, 29-35.
- Sharp, Z. (2017). *Principles of stable isotope geochemistry*.
- Shaw, E. M. (1994). *Hydrology in Practice*, ed., 569 pp.
- Shu, L. C., Wang, M. M., Liu, R. G., & Chen, G. H. (2007). Sensitivity analysis of parameters in numerical simulation of groundwater [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 5.
- Shyu, G. S., Cheng, B. Y., Chiang, C. T., Yao, P. H., & Chang, T. K. (2011). Applying factor analysis combined with kriging and information entropy theory for mapping and evaluating the stability of groundwater quality variation in Taiwan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(4), 1084-1109.
- Siegel, F. R. (2002). *Environmental geochemistry of potentially toxic metals* (Vol. 32). Berlin: Springer.
- Simeonov, V., Stratis, J. A., Samara, C., Zachariadis, G., Voutsas, D., Anthemidis, A., ... & Kouimtzis, T. (2003). Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water research*, 37(17), 4119-4124.
- Singh, A. (2014). Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: a review. *Science of the Total Environment*, 499, 414-423.
- Skoulikidis, N. T. (1993). Significance evaluation of factors controlling river water composition. *Environmental Geology*, 22(2), 178-185.
- Skoulikidis, N. T., Amaxidis, Y., Bertahas, I., Laschou, S., & Gritzalis, K. (2006). Analysis of factors driving stream water composition and synthesis of management tools—a case study on small/medium Greek catchments. *Science of the Total Environment*, 362(1-3), 205-241.
- Sogreah (1974). Study for the development of groundwater in the Thessaly plain, Final report.
- Sors, J. C. (2001). Measuring progress towards sustainable development in Venice: a comparative assessment of methods and approaches.
- Stamatis, G. (1999). The chemical composition of the surface system of Peneos river, Thessaly/Central Greece. *Environmental geology*, 38(2), 126-140.
- Stamatis, G. (1999). Hydrochemische Untersuchungen der Grundwässer von Ossa/E-Thessalien (Zentral-Griechenland). *Z. d. Hydrogeologie und Umwelt H*, 18, 1-26.
- Stamatis, G., & Gartzos, E. (1999). The silica supersaturated waters of northern Evia and eastern central Greece. *Hydrological Processes*, 13(17), 2833-2845.
- Stamatis, G., Parpodis, K., Lambrakis, N., & Zagana, E. (2007). Origin and quality of thermal groundwaters in the region of Farsala (E. Thessaly/Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 40(2), 570-579.
- Stamatis, G., Parpodis, K., Filintas, A., & Zagana, E. (2011). Groundwater quality, nitrate pollution and irrigation environmental management in the Neogene sediments of an agricultural region in central Thessaly (Greece). *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 1081-1105.
- Steinhorst, R. K., & Williams, R. E. (1985). Discrimination of groundwater sources using cluster analysis, MANOVA, canonical analysis and discriminant analysis. *Water Resources Research*, 21(8), 1149-1156.
- Stiff Jr, H. A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of petroleum technology*, 3(10), 15-3.

- Strahler, A. (1952). Hypsometric (area – altitude) analysis of erosional topography. *Bull. Geol. Soc. Am.* 63, pp.1117-1142.
- Strahler, A. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Trans. Amer. Geoph. Union*, vol. 38, No 6, pp.913-920.
- Svante, W., Esbensen, K., Geladi P. (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and intelligent laboratory systems* 2.1-3, pp. 37-52.
- Taylor, M., Elliott, H. A., & Navitsky, L. O. (2018). Relationship between total dissolved solids and electrical conductivity in Marcellus hydraulic fracturing fluids. *Water Science and Technology*, 77(8), 1998-2004.
- Tebbutt THY. (1992). *Principles of Water Quality and Control*, 4th edn. Pergamon Press: New York; 251 pp.
- Thornwaite, C. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. The Geographical Review, 38, 1, p. 55-94, New York.
- Thornwaite, C., Matter, J. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology Publication in Climatology, 10 No3, p.181-311, Conterton, New Jersey.
- Thyne, G., Güler, C., & Poeter, E. (2004). Sequential analysis of hydrochemical data for watershed characterization. *Groundwater*, 42(5), 711-723.
- Tison, G. (1960). Courbe de tarissement coefficient d'écoulement et perméabilité du bassin, *Memoires AIHS, Helsinki*, 1960, Proceedings: pp. 229-243.
- Tulipano L., Fidelibus D., and Panagopoulos A. (2005). Groundwater management of coastal karstic aquifers. *European Cooperation in the Field of Technical Research: Environment*, EUR21366EN (Cost Action 621), EC, Brussels.
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour. (in French). *Ann. Agron.*, 12, 13-49.
- Tziritis, E., Panagopoulos, A., & Arampatzis, G. (2014). Development of an operational index of water quality (PoS) as a versatile tool to assist groundwater resources management and strategic planning. *Journal of hydrology*, 517, 339-350.
- Tziritis, E., Arampatzis, G., Hatzigiannakis, E., Panoras, G., Panoras, A., & Panagopoulos, A. (2016). Quality characteristics and hydrogeochemistry of irrigation waters from three major olive groves in Greece. *Desalination and Water Treatment*, 57(25), 11582-11591.
- Tziritis, E., Skordas, K., Kelepertsis, A. (2016). The use of hydrogeochemical analyses and multivariate statistics for the characterization of groundwater resources in a complex aquifer system. A case study in Amyros River basin, Thessaly, central Greece. *Environmental Earth Sciences* 75.4: 339.
- Tziritis, E. P., Datta, P. S., & Barzegar, R. (2017). Characterization and assessment of groundwater resources in a complex hydrological basin of central Greece (Kopaida basin) with the joint use of hydrogeochemical analysis, multivariate statistics and stable isotopes. *Aquatic Geochemistry*, 23(4), 271-298.
- Tziritis, E., Pisinaras, V., Panagopoulos, A., & Arampatzis, G. (2020). RIVA: a new proposed method for assessing intrinsic groundwater vulnerability. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(6), 7043-7067.
- Urey, H. C. (1947). The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 562-581.
- US National Council. (1990). *Groundwater models: Scientific and regulatory applications*. National Academy Press, Washington DC.
- Valko, M. M. H. C. M., Morris, H., & Cronin, M. T. D. (2005). Metals, toxicity and oxidative stress. *Current medicinal chemistry*, 12(10), 1161-1208.
- Voudouris, K., Panagopoulos, A., Koumantakis, J. (2000). Multivariate statistical analysis in the assessment of hydrochemistry of the Northern Korinthia prefecture alluvial aquifer system (Peloponnese, Greece). *Natural Resources Research* 9.2, pp. 135-146.

- Voutsis, N., Kelepertzis, E., Tziritis, E., & Kelepertzis, A. (2015). Assessing the hydrogeochemistry of groundwaters in ophiolite areas of Euboea Island, Greece, using multivariate statistical methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 159, 79-92.
- Vrouhakis I., Panagopoulos A. and Stamatis G. (2017). Current quality and quantity status of Tirnavos sub-basin water system- Central Greece. 11th International Hydrogeological Congress, Athens 4-7 October.
- Vrouhakis I., Tziritis E., Panagopoulos A., Kulls C. and Stamatis G. (2019). The Use Of Environmental Stable Isotopes At The Tirnavos Alluvial Basin (Central Greece). 15th International Congress of the Geological Society of Greece, Athens 22-24 May.
- Vrouhakis I., Pisinaras V., Panagopoulos A. and Stamatis G. (2019). Multivariate statistical analyses of groundwater hydrochemical data of Tirnavos sub-basin (Central Greece). 16th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes 4-7 September.
- Walter, J., Chesnaux, R., Gaboury, D., & Cloutier, V. (2019). Subsampling of regional-scale database for improving multivariate analysis interpretation of groundwater chemical evolution and ion sources. *Geosciences*, 9(3), 139.
- Walton, W. C. (1970). Groundwater resource evaluation. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering (USA) eng.
- Walton, N. R. G. (1989). Electrical conductivity and total dissolved solids—what is their precise relationship?. *Desalination*, 72(3), 275-292.
- Water Hazard Classes (WGC). (2005). Germany – Substances Hazardous to Water – Water Hazard Classes (accessed 30 march 2013).
- Waterloo Hydrogeologic Inc. (2015). Visual MODFLOW 4.6 Manual.
- Wei, Y. N., Fan, W., Wang, W., & Deng, L. (2017). Identification of nitrate pollution sources of groundwater and analysis of potential pollution paths in loess regions: a case study in Tongchuan region, China. *Environmental Earth Sciences*, 76(12), 1-13.
- World Health Organization. (1998). Guidelines for drinking water quality. Addendum to vol.1 Recommendations 2nd, Geneva.
- World Health Organization. (2008). Guidelines for drinking water quality 3rd ed, vol. 1 Recommendations. *World Health Organization Geneva*.
- World Health Organization. (2011). Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed., Malta, 2011.
- World Health Organization. (2012). Guidance for Immunotoxicity Risk Assessment for Chemicals. (IPCS harmonization project document; no. 10), Geneva, 2012.
- Wilcox, L.V. (1955). Classification and use of irrigation waters, U. S. Depart. Agric. Circ. 969, Washington, pp. 19.
- Yeh, W. W. G. (1986). Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem. *Water resources research*, 22(2), 95-108.
- Yoshimura, K., Nakao, S., Noto, M., Inokura, Y., Urata, K., Chen, M., & Lin, P. W. (2001). Geochemical and stable isotope studies on natural water in the Taroko Gorge karst area, Taiwan—chemical weathering of carbonate rocks by deep source CO₂ and sulfuric acid. *Chemical Geology*, 177(3-4), 415-430.
- Yurtsever, Y., & Araguas, L. A. (1993). Environmental isotope applications in hydrology: An overview of the IAEA's activities, experiences, and prospects. *IAHS PUBLICATION*, 3-3.
- Zhang, Y., & Shen, Y. (2019). Wastewater irrigation: past, present, and future. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(3), e1234.
- Zdechlik, R. (2016). A review of applications for numerical groundwater flow modeling. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 3, 11-18.
- Zimmermann, U., Münnich, K. O., & Roether, W. (1967). Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen isotopes. *Isotope techniques in the hydrologic cycle*, 11, 28-36.
- Zwick, W. R., & Velicer, W. F. (1986). Comparison of five rules for determining the number of components to retain. *Psychological bulletin*, 99(3), 432.

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξάκης, Δ. (2002). Η επίδραση γεωλογικών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην ποιότητα και τη χημική σύσταση των υπογείων νερών περιοχών της ανατολικής Αττικής. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος.
- Βασιλάκης, Ε., Μαυρούλης, Σ., Αλεξόπουλος, Ι., & Δίλαλος, Σ. (2015). Μορφοτεκτονική εξέλιξη της Δελταϊκής περιοχής του Πηνειού (Θεσσαλία). Πανελλήνια και Διεθνή Γεωγραφικά Συνέδρια, Συλλογή Πρακτικών, 1671-1684.
- Βασιλείου, Ε. (2011). Υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής Ποταμιάς Ελασσόνας. Επιπτώσεις από τη μελλοντική εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων στο υδατικό καθεστώς (Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. Τομέας Γεωλογικών Επιστημών).
- Βλαχόπουλος, Ν. (2016). Υδροδυναμική ανάλυση υφάλμυρων καρστικών πηγών Αγίων Αποστόλων (Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος. Τομέας Δυναμικής-Τεκτονικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας).
- Βουδούρης, Κ. (2004). Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειων ροών. ΑΠΘ, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ. (2006). Θέματα υδρογεωλογίας περιβάλλοντος. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, σ. 27.
- Βουδούρης, Κ. (2009). Υδρογεωλογία περιβάλλοντος. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σ. 460.
- Βρουχάκης, Ι. (2003). Η εξέλιξη της κοιλάδας του Πορταϊκού ποταμού (Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Τμήμα Γεωλογίας. Τομέας Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας).
- Γαμβρούλα, Δ. (2013). Περιβαλλοντική-υδρογεωχημική έρευνα στη λεκάνη των Μεγάρων (Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Σχολή Αγροτικής Παραγωγής Υποδομών και Περιβάλλοντος. Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής. Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Γεωλογίας).
- Γουργουλέτης, Ν. (2020). Διερεύνηση ορθών πρακτικών και μέτρων εξοικονόμησης υδατικών πόρων στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος).
- Δημόπουλος, Γ. (1983). Εφαρμοσμένη Γεωλογία-Τόμος 1ος Υδρογεωλογία, Θεσσαλονίκη, σελ. 428.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2013). Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (GR08). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2014). Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (GR08). Παράρτημα 1: Περιγραφή της κατάστασης των υδάτων. Μέρος Ε, Παραδοτέο 14: Έκθεση εφαρμογής της Οδηγίας 2006/118/ΕΚ «Σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση» και της ΚΥΑ 39626/2208/Ε130/2009. Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2017). 1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΕΛ08).
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2017). 1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΕΛ08), Ενδιάμεση Φάση, Παραδοτέο 9, Επικαιροποίηση Μητρώου Προστατευόμενων Περιοχών, Μάρτιος 2017.
- Ευαγγελόπουλος Α., 2005. Διαχειριστική μελέτη του υπόγειου υδάτινου περιοχών δικαιοδοσίας των ΤΟΕΒ Νομού Λάρισας, Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Λάρισας, Λάρισα.
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Επίσημη Εφημερίδα της ΕΕ, αριθμ. L, 327.
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. Οδηγία 2006/118/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με την προστασία των υπόγειων νερών από τη ρύπανση και την υποβάθμιση.
- Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.). (2010). Υδρογεωλογική μελέτη Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας. Θεσσαλονίκη, 2010.

- Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων (Ι.Ε.Υ.Π.). (2015). Παρακολούθηση της ποσότητας και ποιότητας των υδάτων σε εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ στα όρια των ακόλουθων περιφερειών της χώρας: Ηπείρου, Θεσσαλίας, Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Ιονίων Νήσων, Βορείου Αιγαίου, Δυτικής Ελλάδας, Πελοποννήσου και Κρήτης (MIS 374339). Σίνδος, 2015.
- Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων (Ι.Ε.Υ.Π.). (2020). Λειτουργία Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης και Καταγραφής της Ποσότητας (ποτάμια) και Ποιότητας (ποτάμια και λίμνες) των Επιφανειακών Υδάτων της Χώρας (Οδηγία 2000/60/ΕΚ)(MIS 5001336). Σίνδος, 2020.
- Θεοδωρίκας, Σ. (1997). Γεωχημεία. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη.
- Καλλέργης, Γ. (1970). Υδρογεωλογική μελέτη της υπολεκάνης Καλαμπάκας (Δυτική Θεσσαλία). Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Καλλέργης, Γ., Χριστοδούλου, Γ. (1972). Σχέσις ενεργού κατεισδύσεως και βροχοπτώσεως εις τας αλλουβιακάς αποθέσεις περιοχής Καλαμπάκας (Δυτ. Θεσσαλία)= Relation between effective infiltration and precipitation in alluvial deposits of Kalambaka area (W. Thessaly). *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 9(1), 119-128.
- Καλλέργης, Γ. (2000). Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία, τόμοι Α και Β (2 η έκδοση). *Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα*.
- Καλλέργης, Γ., (2001). Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, 2η έκδοση, τόμος Α, Β, Γ, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Καραπιλάφης, Δ. Γ. (2008). Προσομοίωση της υπόγειας ροής με τον κώδικα Modflow (No. GRI-2009-3083). Aristotle University of Thessaloniki.
- Καρυώτης, Θ. (1995). Συσχέτιση ροής εδαφικού αζώτου με χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Κατσικάτσος, Γ., Βιδάκης, Μ., Μιγκίρος, Γ. (1978). ΙΓΜΕ, Γεωλογικός χάρτης Φύλλο Πλατύκαμπος.
- Κατσικάτσος, Γ. (1992). Γεωλογία της Ελλάδας. Πανεπιστήμιο Πάτρας, ΟΕΔΒ, Αθήνα, 451.
- Κελεπερτζής, Α. (2000). Εφαρμοσμένη Γεωχημεία. Βιβλίο. Μακεδονικές Εκδόσεις.
- Κοινοπραξία Γ. ΚΑΡΑΒΟΚΥΡΗΣ & ΣΥΝ/ΤΕΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧ/ΚΟΙ Ανώνυμη Εταιρία - ΒΑΣΙΛΗΣ ΠΕΡΛΕΡΟΣ –ΕΝVECO Ανώνυμη Εταιρεία Προστασίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος - ΑΝΤΖΟΥΛΑΤΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ –ΕΠΕΜ Εταιρία Περιβαλλοντικών Μελετών Α.Ε. - ΟΜΙΚΡΟΝ Οικονομικές & Αναπτυξιακές Μελέτες Ε.Π.Ε. -ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ ΗΛΙΑΣ - ΤΣΕΚΟΥΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ - ΚΟΤΖΑΓΕΩΡΓΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ - ΓΚΑΡΓΚΟΥΛΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (Διακριτικός τίτλος: Κ/ΞΙΑ Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας), 2014.
- Κοινοπραξία Γ. ΚΑΡΑΒΟΚΥΡΗΣ & ΣΥΝ/ΤΕΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧ/ΚΟΙ Ανώνυμη Εταιρία –ΕΝVECO Ανώνυμη Εταιρεία Προστασίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος - ΟΜΙΚΡΟΝ Σύμβουλοι Περιβάλλοντος Ανώνυμη Εταιρία - ΟΜΙΚΡΟΝ Οικονομικές & Αναπτυξιακές Μελέτες Ανώνυμη Εταιρία – Χρήστος Σαλόγιαννος – Γεώργιος Τσεκούρας – Κωνσταντίνος Οικονόμου (Διακριτικός τίτλος: Κ/ΞΙΑ Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Ηπείρου, Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και Θεσσαλίας), 2017.
- Κουκίδου, Ε. Χ. (2010). Εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων για την προσομοίωση του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της λεκάνης Τυρνάβου (No. GRI-2010-5558). Aristotle University of Thessaloniki.
- Κουκίδου, Ε., Παναγόπουλος, Α. (2010). Application of FEFLOW for the simulation of groundwater flow at the Tirnavos (central Greece) alluvial basin aquifer system. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 43(4), 1747-1757.
- Κουτσογιάννης, Δ. (1997). Αναβάθμιση και επικαιροποίηση της υδρολογικής πληροφορίας της Θεσσαλίας ΥΠΕΧΩΔΕ-ΕΜΠ.
- Λαμπράκης, Ν. Ι., Παναγόπουλος, Γ., & Πυτικάκης, Ε. (2004). Υδροχημικές συνθήκες και ποιότητα των υπογείων νερών της πεδινής ζώνης της λεκάνης του ποταμού Πηνειού, Ν. Ηλείας. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 36(4), 2002-2011.
- Λάππας, Ι. (2018). Εφαρμοσμένη υδρογεωλογική έρευνα παράκτιων υδατικών συστημάτων: η περίπτωση του παράκτιου τμήματος Αταλάντης Ν. Φθιώτιδας (Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. Τομέας Γεωλογικών Επιστημών).

- Λεκκας, Ε. (1988). Γεωλογική δομή και γεωδυναμική εξέλιξη της οροσειράς του Κόζιακα (Δυτική Θεσσαλία). *Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*, 21-25.
- Λουκάς, Α., Μυλόπουλος, Ν., Μεθυμάκη, Ι., Χατζηευαγγέλου, Κ., Ψοχιου, Β. (2003). Διαχείριση επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης Πηνειού.
- Μακρογιάννης, Τ., Σαχσαμάνογλου Χ. (1993). Στοιχεία Γενικής Μετεωρολογίας. *Art of Text, Θεσσαλονίκη*.
- Μανάκος Α., Τσιούμας Β. (2010). Υπόγειο υδατικό δυναμικό Θεσσαλίας (Υ.Δ. 08). Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Υδρογεωλογίας, Περιφερειακή Μονάδα Κεντρικής Μακεδονίας.
- Μαρίνος, Π., Περλέρος, Β. (1990). Ground water relationships with Penios and Titarisios rivers in the karstic aquifer of central Thessaly plain (abstracts)= Σχέσεις καρστικής υδροφορίας Κεντρικής Θεσσαλίας με Πηνειό και Τιταρήσιο. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 25, 122.
- Μαρίνος Π., Περλέρος, Β. (1991). Σχέσεις καρστικής υδροφορίας Κεντρικής Θεσσαλίας με Πηνειό και Τιταρήσιο= Ground water relationships with Penios and Titarisios rivers in the karstic aquifer of Central Thessaly Plain. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 25(4), 233-253.
- Μιγκίριος, Γ. (1980). ΙΓΜΕ, Γεωλογικός χάρτης Φύλλο Γόννοι.
- Ματιάτος, Ι. (2010). *Υδρογεωλογικές και ισοτοπικές έρευνες σε περιοχές της χερσονήσου της Αργολίδας* (Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας).
- Ματιάτος, Ι. (2012): Έλεγχος αγροτικής ρύπανσης και θαλάσσιας διείσδυσης με χρήση μαθηματικού προσομοιώματος με στόχο τον προσδιορισμό των επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον στην περιοχή της Τροιζήνας (Αττική). Μεταπτυχιακή εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, σελ.215.
- Μουντράκης, Δ. (1985). Γεωλογία της Ελλάδας. University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 98.
- Μπαλαφούτης, Χ. (2002). Γενική κλιματολογία και κλίμα Μεσογείου. ΑΠΘ, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο.
- Μπουκουβάλα, Σ. (2011). Η πολιτιστική κληρονομιά του Τυρνάβου και η απήχυσή της στους εφήβους της περιοχής. (Πτυχιακή εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τμήμα Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας).
- Μυριούνης, Χ. Τ. (2008). Υδρογεωλογική και υδρομηχανική διερεύνηση των υπογείων νερών της παράκτιας ζώνης της υδρολογικής λεκάνης Αλμυρού Μαγνησίας (Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας).
- Ναλμπάντης, Ι. & Κουτσογιάννης, Δ. (1997). Τελική Έκθεση. Αναβάθμιση και επικαιροποίηση της υδρολογικής πληροφορίας της Θεσσαλίας, Τεύχος 4. Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ξανθοπούλου, Ε., Μαμάσης, Ν., Αναστασοπούλου, Π., Αλεξοπούλου, Κ. (1997). Αναβάθμιση και επικαιροποίηση της υδρολογικής πληροφορίας της Θεσσαλίας, Τεύχος 1. Επικαιροποίηση υδρομετεωρολογικών δεδομένων, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα.
- Οδηγία 92/43/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1992 «για τη διατήρηση των φυσικών οικοτόπων καθώς και της άγριας πανίδας και χλωρίδας». (1992).
- Οδηγία 98/83 ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρώπης, της 3ης Νοεμβρίου 1998 «σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης». (1998).
- Οδηγία 2009/147/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30ης Νοεμβρίου 2009 «περί της διατήρησης των άγριων πτηνών». (2009).
- Οργανισμός Πληρωμών και Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων (ΟΠΕΚΕΠΕ), Ψηφιακά δεδομένα 2015.
- Παναγόπουλος, Α. (1996). Μελέτη διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων της λεκάνης Τυρνάβου με τη χρήση μαθηματικού ομοιώματος. Πρακτικά Β' Πανελληνίου Συνεδρίου "Εγγειοβελτιωτικά έργα- Διαχείριση υδατικών πόρων-Εκμηχάνιση Γεωργίας", Τόμος Α, σσ. 393-404, ΓΕΩΤΕΕ, Λάρισα.

- Παπαθεοδώρου, Γ., Φερεντίνος, Γ. (1994). Εφαρμογές μεθόδων στατιστικής πολυμεταβλητής ανάλυσης σε προβλήματα μόλυνσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος από βαρέα μέταλλα, 3^ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, 1,2,3, Απριλίου.
- Παπαμιχαήλ, Δ., Μπαμπατζιμόπουλος Χ. (2015). Εφαρμοσμένη Γεωργική Υδραυλική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπανικολάου, Δ. (1986). Γεωλογία της Ελλάδας. Εκδόσεις Επτάλοφος, σελ. 240.
- Περγιαλιώτης, Π. (2003). Το υδατικό δυναμικό της Ελλάδας. Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα.
- Πισινάρας, Β. (2008). Ανάπτυξη ενός Πλαισίου Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Πολύπλοκων Συστημάτων Υπόγειων Υδατικών Πόρων. (Διδακτορική Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (ΔΠΘ). Πολυτεχνική Σχολή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος).
- Πλαστήρας, Β. (1982). ΙΓΜΕ, Γεωλογικός χάρτης Φύλλο Λάρισα.
- Πλιάκας, Φ. (2003). Συμπληρωματικές σημειώσεις υδραυλικής υπογείων νερών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Σύμβαση της Βέρνης, που εγκρίθηκε την 19η Σεπτεμβρίου 1979 «περί της διατήρησης της άγριας ζωής και του φυσικού περιβάλλοντος». (1979).
- Σούλιος, Γ. (1985). Συμβολή στην υδρογεωλογική μελέτη των καρστικών υδροφόρων συστημάτων του Ελληνικού χώρου. ΑΠΘ, Επιστ. Επετ. Σχολής Θετικών Επιστημών, τομ. 23, παραρτ. Αρ. 27. Θεσσαλονίκη.
- Σούλιος, Γ. (1986). Γενική Υδρογεωλογία, τόμος Α. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Σούλιος, Γ. (1986). Γενική Υδρογεωλογία, τόμος Β. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Σταμάτης, Γ. Ν., & Ζαγγανά, Ε. (2004). Εφαρμογή ιχνηθετικών και υδροχημικών μεθόδων στην έρευνα του καρστικού συστήματος της Β. Όσσας/ΒΑ-Θεσσαλία. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 36(4), 2067-2076.
- Σταμάτης, Γ., Μιγκίρος, Γ. (2004). Σχέση διαρρηκτικής τεκτονικής και υδροφορίας των συμπαγών σχηματισμών της Όσσας (Α. Θεσσαλία, Ελλάδα). *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 36(4), 2077-2086.
- Σταμάτης, Γ. (2009). Επιβάρυνση των εδαφών και νερών σε βαρέα τοξικά μέταλλα. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Μέθοδοι εξυγίανσης επιβαρημένων περιοχών. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Στουρνάρας Γ. (2007) ΝΕΡΟ, Περιβαλλοντική Διάσταση και Διαδρομή, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα.
- Σύμπραξη Ζ&Α Π. ΑΝΤΩΝΑΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Α.Μ.Ε.& ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ ΒΑΪΝΑΛΗΣ. (2010). Υδρογεωλογική μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού καρστικού ασβεστολιθικού συστήματος Τιταρήσιου – Πηνειού ποταμού περιοχής Τυρνάβου.
- Σύμπραξη Παγώνης, Κ., Καϊμάκη, Σ., Καζάντζης, Γ., Μανωλόπουλος, Π., Σιαπαρίνας, Κ., ΧηΔιαμαντής, Α. (2008). Μελέτη Κοστολόγησης Αρδευτικού Νερού στη λεκάνη απορροής Πηνειού (Υπολεκάνη Τυρνάβου).
- Σωτηριάδης, Λ., & Ψιλοβίκος, Α. (1984). Ασκήσεις Γεωμορφολογίας. *Εργαστήριο Φυσικής Γεωγραφίας. Τομέας Γεωλογίας-Φυσικής Γεωγραφίας. Τμήμα Γεωλογίας. ΑΠΘ.*
- Τζιμόπουλος, Δ. Χ. & Μπαλλάς, Γ. Λ. (2005). Διαχείριση του υδροφορέα Πυθίου - Ελασσόνας με εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού. Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με βάση την λεκάνη απορροής. 5^ο Εθνικό συνέδριο Ελληνική Επιτροπή Διαχείρισης Υδατικών πόρων, 6-9 Απριλίου Ξάνθη.
- Τζιρίτης, Ε. (2008). Υδρογεωχημική – Περιβαλλοντική μελέτη του καρστικού συστήματος Αν. Κωπαΐδας – Υλίκης και προσομοίωση της τρωτότητας του με μεθόδους Γεωπληροφορικής (Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος. Τομέας Οικονομικής Γεωλογίας-Γεωχημείας).
- Τσαγκαλίδης, Α. (1990). Πετρολογική μελέτη περιοχής Όσσας Θεσσαλίας (Doctoral dissertation, Γεωργικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τμήμα Γενικό).
- Τσίτσης, Χ. (2020). Αξιολόγηση πιέσεων και επιπτώσεων στην λίμνη Βεγορίτιδα με την εφαρμογή της προσέγγισης DPSIR και νευρωνικών δικτύων.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (2012). Κλιματικά δεδομένα Ελληνικών περιοχών. Τεχνική οδηγία ΤΕΕ, 20701-3/2010. Β' Έκδοση.

Φλόκας, Α. (1994). Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ.465.

Χαμπίδη, Π. (2012). Φυσικές και ανθρωπογενείς επιπτώσεις στην ποιότητα των νερών και εδαφών της Ανατολικής Αττικής (Doctoral dissertation, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τμήμα Γενικό. Τομέας Γεωλογικών Επιστημών και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος. Εργαστήριο Ορυκτολογίας και Γεωλογίας).

Χαραλάμπους Α., (2007). Υδατικό Περιβάλλον, ΕΜΠ, Αθήνα.

Χαριζόπουλος, Ν. (2013). Διερεύνηση των μηχανισμών ποσοτικής και ποιοτικής υποβάθμισης των υδατικών και εδαφικών πόρων στη λεκάνη Δομοκού από φυσικές και ανθρωπογενείς επιδράσεις (Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΓΠΑ). Σχολή Αγροτικής Παραγωγής Υποδομών & Περιβάλλοντος. Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής. Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Γεωλογίας).

Χατζηανδρέου, Α. (2015). Ποιότητα και ρύπανση υπόγειων νερών.

Ψιλοβίκος, Α. (1991). Η εξέλιξη του ποταμού Πηνειού της Θεσσαλίας. Ανάτυπο από τα «ΤΡΙΚΑΛΙΝΑ», Τόμος 11^{ος}, σελ. 441-454.

ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

<http://www.ypeka.gr>

<http://www.grida.no/resources/8124>

<http://www.hydroscope.gr/>

http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Thessaly&poli=Larisa

<http://hikersbay.com/climate-conditions/greece/larissa/klimatologikes-synthikes-se-larisa.html?lang=el>

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%8D%CF%81%CE%BD%CE%B1%CE%B2%CE%BF%CF%82>

<https://geodata.gov.gr/>

<https://www.ypeth.gr/archive/limni-argyropoylioy-piges-mati-tyrnavoy>

https://ampelwnaslarisas.blogspot.com/2015/03/blog-post_83.html

<http://hikersbay.com>

http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city

<http://www.demography-lab.prd.uth.gr/MESOS%20ETHSISO%20RYTHMOS%20METAVOLHS.pdf>

http://www.emv.gr/emv/el/agriculture/agriculture_city?poli=Larisa

<https://www.nih.gov/>

<https://www.mednutrition.gr/portal/ygeia/kardiaggeiaka/15337-natrio-kai-kalio-pos-oi-ilektrolytes-sxetizontai-me-tin-ypertasi>

<https://www.itrofi.gr/ygeia/vitamines/article/1719/o-rolos-toy-kaliy-sti-diatirisi-tis-ygeias-toy-organismoy-oi>

<https://www.mednutrition.gr/portal/efarmoges/leksiko-diatrofis/15015-xlorio>

<https://www.pharm24.gr/blog/vitamines-symplhromata-diatrofis/metalla-ixnostoixeia/magganio/>

<https://medicalpq.gr>

<https://www.iatronet.gr/ygeia/iatriki-ergasias/article/346/molyvdos.html>

[https://www.naturagraeca.com/ws/214,278,237,1,1,%CE%A0%CE%B7%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CF%8C%CF%82-\(%CE%B8%CE%B5%CF%83%CF%83%CE%B1%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82\)](https://www.naturagraeca.com/ws/214,278,237,1,1,%CE%A0%CE%B7%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CF%8C%CF%82-(%CE%B8%CE%B5%CF%83%CF%83%CE%B1%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82))

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B9%CF%84%CE%B1%CF%81%CE%AE%CF%83%CE%B9%CE%BF%CF%82>

<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Πίνακας Π1.1. Μέση μηνιαία θερμοκρασία Σταθμού Λάρισας

ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ: ΛΑΡΙΣΑ												
ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (°C)(ΕΜΥ)												
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ	ΔΕΚ
1970	8.1	8.5	10.1	16	18.2	24.4	27.2	26.8	22.2	15.4	10.8	5.8
1971	8	6.1	8.5	13.3	20.7	25.2	25.4	26.1	20.3	14.3	10.6	6.2
1972	6.6	7	9.5	15.1	19.8	26	26.3	25.3	20.6	13	10.4	5.7
1973	4.5	7.3	7.3	13.9	21.3	24.5	28	25.2	22.4	16.4	8.9	5.3
1974	6	8.1	9.5	11.9	18.5	24.3	27.4	26.3	21.9	17.6	10.6	5.4
1975	4.3	5.4	11.2	14.8	20.5	24.4	26.9	24.7	23.3	16	10.5	5.6
1976	5.4	5.7	8.9	14.3	18.6	23.5	25.7	22.9	20.7	17	11.3	6.8
1977	6	10.1	10.2	14.3	21.1	25.5	28.5	26.6	21	14.8	12	4.9
1978	4.7	8.8	10.8	13.5	19.4	26	27.4	25.1	19.9	4.8	7.6	8.8
1979	4.9	7.8	11.1	12.5	19.1	25.7	26.3	25.4	21.2	14.9	11.3	7
1980	3.9	5.9	9.3	12.5	17.2	23.9	27.6	25.6	21.4	17	12.2	6.2
1981	2.1	5.9	11.2	13.5	17.7	26.5	26.4	25.1	22.1	18.7	7.8	7.7
1982	11.1	10.5	9.9	11.8	17.7	25.2	25.9	25.6	22.3	16.5	8.8	7.4
1983	4.8	4.3	9	15.7	21.1	22.9	26.9	24.7	21.2	15.4	9.6	6.3
1984	6.2	7.1	8.5	11.5	19.3	24.1	26.2	24	22.4	18.6	11.1	6
1985	6	3.9	9.1	15.8	22	25.6	26.9	26.9	21.9	14.4	11.8	8
1986	6.7	7.1	9.3	15.1	19.5	25.5	26.5	27	22.2	15.7	9.1	3.4
1987	6.3	7.7	4.6	13	17.8	25.1	28.3	25.5	23.8	14.9	10.3	6.6
1988	7.3	6.6	8.9	12.8	20.2	26.2	30.3	27.3	22.9	15.5	6.7	2.9
1989	3.3	7.3	11.3	16	18.7	23.7	26.3	26.2	22.2	14.6	10.2	5.1
1990	3.7	8.1	11.7	15.8	20	25.9	27.8	25.3	21.6	16.8	12.3	6.9
1991	3.6	5.6	10.3	12.7	16.7	25.4	25.7	24.9	21.4	17.1	11.1	2.5
1992	4.1	5.5	9.8	14.5	18	24.5	25.3	27.5	21.4	19	11.2	5.3
1993	4	3.6	9.3	14.5	19.7	23.7	26	26.9	22.1	19.2	9.2	8.5
1994	6.2	6.5	10.5	12.6	20.5	14.5	26.8	26.5	22.8	14.8	8.9	7.8
1995	4.8	5.2	8.9	14.2	19.8	24.5	25.8	26.8	21.3	15.4	10.9	7.6
1996	5.9	6.2	9.3	13.8	18.8	23.4	26.4	25.5	21.1	14.8	11.4	5.5
1997	6.5	8.1	11.2	14.2	17.6	25.6	27.3	26.2	20.9	17.5	10.6	8.4
1998	4.7	7.5	10.8	12.9	19	25.1	26.3	26.5	22.3	16.1	10.2	5.4
1999	7.2	6.4	8.6	14	19.6	24.8	27.7	25.8	22	14.6	9.5	6.7
2000	6.3	6.2	9.7	14.8	20.2	25.2	25.6	26	21.8	16.8	10.4	6.9
2001	5.4	8.9	9.3	15.7	19.1	24.9	27.9	26.1	22.7	15.4	9.1	5.1
2002	5.2	7.5	11.2	16.9	18.5	25.8	26.7	25.2	21.2	15.2	11.2	4.6
2003	3.8	6.5	9.7	14.4	17.8	26	26.2	26.5	20.6	16.9	11	6.5
2004	4.6	8.2	8.5	14.7	18.6	25.4	27.1	27.3	20.8	15.8	9.8	7
2005	5.2	6.8	9.6	13.9	19.3	24.9	26.8	25.7	21.7	15.7	10.2	6
2006	3.0	5.2	9.7	14.1	19.0	23.7	25.1	26.8	20.7	16.2	8.5	4.9
2007	6.8	7.2	9.9	13.4	19.9	25.3	28.0	26.9	20.6	16.0	9.9	4.9
2008	4.5	6.6	11.5	14.6	19.6	25.2	26.7	26.5	20.6	15.7	11.6	6.7
2009	6.2	5.8	8.9	13.0	19.9	23.9	26.7	25.7	21.1	16.8	10.8	9.2
2010	6.8	8.4	10.4	15.1	21.3	25.7	28.4	29.4	22.5	15	13.4	6.7
2011	6.2	7.3	9.7	13.6	19.4	25.6	29.5	27	25.5	14.5	8.3	6.8
2012	3.3	5.1	10.7	15.6	20.1	28	31.1	28.8	23.5	19.2	12.7	5.7
2013	6.2	8.4	10.8	16.7	22.6	26	27.9	28.5	23.5	17	12.4	5.7
2014	7.8	9.6	11.6	15.1	20.7	26.5	28.4	28.1	22.2	16.4	11.8	7.9
2015	5.4	6.7	9.3	14.6	21.8	24.6	29.2	27.6	24.2	17	12.4	5.8
2016	6.1	11.2	10.9	17.5	20.3	27.3	29.2	27.7	21.9	16.7	10.7	4.6
2017	0.7	8.4	12	15	20.8	26.7	28.1	27.5	23.6	16.3	10.7	7
2018	6.7	8.3	12.2	17.3	22.4	25.4	27.8	26.9	22.6	17.2	11.9	5.5

Πίνακας Π1.2. Μέση μηνιαία θερμοκρασία σταθμών στην ευρύτερη περιοχή

Σταθμός	ΑΓΧΙΛΙΟΣ	ΛΑΡΙΣΑ	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	ΦΑΡΣΑΛΑ	ΤΡΙΚΑΛΑ	ΣΚΟΠΙΑ	Μ.ΚΕΡΑΣΙΑ	ΜΑΚΡΥΡΑΧΗ	ΛΟΥΤΡΟΠΗΓΗ	ΛΙΒΑΔΙ
Υψόμετρο (m)	12.4	71.3	106.7	148	163	444.7	509	577.2	772.3	1181.3
Ημερομηνία	ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)									
Οκτ-80	18.2	17.0	17.0	16.7	16.8	17.3	16.1	16.8	16.2	13.3
Οκτ-81	19.6	18.7	19.3	18.5	18.7	19.0	17.6	20.5	18.1	14.7
Οκτ-82	17.3	16.5	16.2	16.5	17.2	16.4	18.0	16.4	15.0	12.3
Οκτ-83	16.0	15.4	15.0	16.2	15.4	16.0	14.3	15.8	15.7	11.9
Οκτ-84	19.1	18.6	18.1	18.5	18.7	20.1	18.7	23.1	20.1	15.7
Οκτ-85	15.1	14.4	14.0	15.2	15.1	13.6	13.9	13.8	14.6	10.4
Οκτ-86	17.0	15.7	15.8	15.9	17.1	16.3	15.0	17.2	15.9	11.2
Οκτ-87	15.7	14.9	15.0	15.2	15.8	14.7	13.7	15.0	14.1	10.9
Οκτ-88	16.7	15.5	15.1	15.4	15.6	15.0	14.7	17.1	16.0	10.9
Οκτ-89	15.6	14.6	14.3	15.7	15.5	14.5	14.3	15.4	16.0	10.5
Οκτ-90	17.2	16.8	17.0	17.1	16.8	16.9	16.4	15.1	17.8	13.2
Οκτ-91	17.9	17.1	17.0	17.3	17.4	17.4	16.5	18.2	16.1	13.1
Οκτ-92	20.3	19.1	18.2	18.2	18.3	19.1	17.5	20.4	17.4	14.9
Οκτ-93	19.4	19.1	18.4	18.6	18.4	18.6	17.9	19.9	16.7	16.0
Οκτ-94	18.9	17.7	17.5	16.8	17.7	17.2	15.7	18.5	8.8	13.2
Οκτ-95	15.4	14.9	18.7	15.6	14.8	13.7	14.0	14.1	12.7	11.1
Οκτ-96	15.3	14.5	14.3	13.8	14.6	13.0	12.8	12.3	10.8	9.7
Οκτ-97	15.4	14.5	14.3	14.4	14.2	14.1	13.0	12.5	12.5	10.7
Οκτ-98	18.4	17.3	16.6	17.1	17.3	16.9	16.0	15.7	15.7	13.2
Οκτ-99	19.3	18.2	17.6	18.0	18.4	18.6	16.5	17.0	17.0	14.4
Οκτ-00	16.2	16.0	15.6	16.1	15.7	15.5	13.8	10.1	10.1	12.3
Νοε-80	13.7	12.2	12.5	12.8	10.5	12.6	11.4	10.8	11.8	8.9
Νοε-81	9.6	7.8	8.0	10.0	9.5	10.2	6.7	9.6	8.0	6.2
Νοε-82	10.4	8.8	8.0	10.1	9.8	8.6	8.7	9.7	8.2	7.8
Νοε-83	10.8	9.6	9.3	10.7	11.0	9.6	7.6	10.6	8.8	6.3
Νοε-84	12.3	11.1	10.5	11.8	10.7	11.4	10.1	13.0	11.8	7.8
Νοε-85	13.3	11.8	11.3	14.5	10.8	12.1	10.9	11.5	13.4	8.3
Νοε-86	10.4	9.1	8.9	9.5	10.3	9.0	8.8	10.7	9.4	5.2
Νοε-87	12.0	10.3	9.7	10.5	9.7	10.1	9.0	11.9	11.6	6.5
Νοε-88	8.3	6.7	6.6	8.4	9.7	6.3	6.1	9.0	6.4	3.0
Νοε-89	11.5	10.2	10.0	11.8	10.4	9.8	9.8	10.9	11.7	6.3
Νοε-90	13.7	12.3	11.8	13.3	10.6	13.8	11.9	10.8	16.1	8.8
Νοε-91	12.5	11.1	10.4	11.5	10.7	11.3	9.7	10.2	10.5	7.1
Νοε-92	13.0	11.2	10.7	13.3	11.0	12.4	11.9	10.6	12.0	9.8
Νοε-93	10.4	9.2	8.5	9.3	8.5	7.4	7.5	9.4	7.4	5.1
Νοε-94	12.1	9.8	9.0	10.8	9.5	9.8	9.2	10.1	5.5	6.7
Νοε-95	9.7	8.2	7.4	9.4	7.9	8.0	7.3	6.5	6.2	5.3
Νοε-96	12.9	11.2	11.0	11.5	11.2	12.4	10.9	10.9	10.1	9.2
Νοε-97	12.6	11.2	10.9	10.8	10.9	10.3	8.8	9.0	9.0	6.0
Νοε-98	12.5	11.1	10.2	10.9	10.4	11.1	8.4	8.6	8.6	2.1
Νοε-99	12.6	11.3	10.9	11.0	11.0	11.2	10.3	9.6	9.6	6.6
Νοε-00	14.1	13.5	12.8	13.6	13.0	14.2	12.9	9.3	9.3	11.2
Δεκ-80	8.3	6.2	7.1	8.5	7.3	6.0	2.4	7.2	5.0	2.7
Δεκ-81	10.1	7.7	7.9	9.4	8.6	8.4	5.6	7.6	7.8	4.6
Δεκ-82	8.9	7.4	7.1	9.3	8.4	8.8	7.6	7.6	7.2	4.7
Δεκ-83	7.7	6.3	5.4	7.5	5.9	6.4	4.2	8.0	7.4	3.3
Δεκ-84	7.4	6.0	5.4	7.3	5.3	5.1	5.0	6.6	6.0	2.3
Δεκ-85	9.4	8.0	7.6	10.2	9.3	9.0	8.4	8.9	9.5	5.9
Δεκ-86	5.9	3.4	2.8	4.0	3.0	4.1	5.3	6.7	5.2	2.4
Δεκ-87	8.5	6.6	6.6	7.8	6.4	7.2	6.6	8.3	9.6	3.8
Δεκ-88	6.1	2.9	3.7	5.4	2.7	5.2	5.4	5.6	5.4	2.8

Δεκ-89	6.9	5.1	5.5	7.8	6.0	6.7	7.5	8.9	8.5	4.5
Δεκ-90	8.7	6.9	6.0	7.8	6.0	6.9	4.7	6.9	7.0	2.3
Δεκ-91	4.3	2.5	2.0	4.6	2.3	2.2	4.0	5.3	5.2	-0.8
Δεκ-92	7.0	5.2	4.5	8.2	4.6	5.2	5.0	5.9	6.0	1.9
Δεκ-93	10.4	8.6	7.9	9.7	8.4	8.9	8.4	7.5	7.8	6.9
Δεκ-94	8.2	5.6	5.4	8.2	5.2	6.3	5.8	6.7	4.3	3.8
Δεκ-95	11.0	9.4	8.8	9.8	9.4	8.2	7.1	7.1	6.7	4.6
Δεκ-96	9.5	7.5	7.2	8.3	7.5	8.4	6.7	7.4	6.6	4.7
Δεκ-97	8.4	6.7	8.2	6.5	6.5	6.3	5.2	5.3	5.3	2.9
Δεκ-98	6.4	4.9	4.1	4.1	4.4	3.9	3.1	2.5	2.5	2.1
Δεκ-99	9.6	8.1	7.0	8.7	8.2	8.8	8.2	8.0	8.0	5.6
Δεκ-00	9.1	7.3	8.6	7.2	7.2	8.2	6.4	3.4	3.4	5.9
Ιαν-81	3.5	2.1	1.9	4.0	3.0	0.8	0.6	1.4	0.9	-2.2
Ιαν-82	6.7	5.0	5.4	6.4	6.2	5.8	4.1	5.2	5.2	3.7
Ιαν-83	6.4	4.8	5.0	6.9	5.5	6.2	3.5	5.9	5.0	3.6
Ιαν-84	7.5	6.2	5.7	7.2	5.9	7.1	5.8	9.8	8.3	4.9
Ιαν-85	7.5	6.0	5.1	6.6	4.8	5.3	4.4	6.8	6.4	1.9
Ιαν-86	8.4	6.7	6.7	8.0	8.2	6.6	6.1	6.5	8.1	2.1
Ιαν-87	8.3	6.3	6.0	8.5	7.1	6.3	6.1	7.7	7.5	2.4
Ιαν-88	8.6	7.3	7.9	7.3	6.0	7.6	6.6	8.0	8.7	4.2
Ιαν-89	5.3	3.3	3.4	5.4	4.6	4.9	5.5	5.6	6.1	1.7
Ιαν-90	5.6	3.7	5.5	6.0	2.9	4.7	6.1	5.6	4.2	1.5
Ιαν-91	5.6	3.6	3.7	6.1	3.8	5.6	6.1	4.3	4.9	2.0
Ιαν-92	6.1	4.1	4.3	6.1	4.9	5.8	6.0	5.3	5.0	3.4
Ιαν-93	6.6	4.1	2.6	7.3	2.6	4.7	5.5	4.1	3.5	3.7
Ιαν-94	9.1	7.6	7.1	7.9	7.4	7.6	6.2	6.6	6.5	4.8
Ιαν-95	7.7	5.5	4.5	5.8	4.8	4.4	4.2	4.0	3.6	1.2
Ιαν-96	7.5	6.2	5.6	6.5	6.0	4.4	3.7	2.8	2.9	1.5
Ιαν-97	7.9	6.2	5.2	6.3	5.9	7.1	7.1	5.8	7.5	5.2
Ιαν-98	7.7	5.9	6.2	6.7	6.2	7.2	6.3	6.1	6.1	4.2
Ιαν-99	7.6	5.7	6.0	7.2	6.3	7.1	5.5	5.0	5.0	3.8
Ιαν-00	4.1	2.3	2.6	2.9	2.9	2.5	1.1	0.8	0.8	-0.6
Ιαν-01	8.4	7.2	6.5	6.9	7.0	7.1	4.5	2.4	2.4	4.4
Φεβ-81	7.2	5.9	6.6	6.8	6.5	5.1	7.5	5.9	2.8	1.9
Φεβ-82	4.9	4.3	4.0	6.1	4.8	3.6	2.2	5.3	1.8	0.5
Φεβ-83	5.2	4.3	4.3	5.8	4.4	4.1	3.5	5.0	2.1	0.3
Φεβ-84	8.1	7.1	6.4	8.1	6.0	5.2	4.2	6.9	5.7	1.1
Φεβ-85	5.5	3.9	4.2	7.4	3.4	4.5	4.8	7.0	4.0	1.3
Φεβ-86	8.6	7.1	6.7	7.6	7.8	6.1	5.1	7.5	6.3	2.1
Φεβ-87	8.9	7.7	7.8	8.1	7.8	6.8	6.3	7.2	6.6	3.5
Φεβ-88	7.9	6.6	6.5	7.1	6.3	6.5	6.0	7.2	6.6	2.9
Φεβ-89	8.4	7.3	7.3	6.8	8.4	7.3	7.3	8.3	7.8	3.6
Φεβ-90	9.1	8.1	8.2	8.0	8.2	8.3	9.1	10.0	9.8	4.9
Φεβ-91	7.0	5.6	5.4	5.8	5.4	4.5	5.0	5.8	2.7	0.9
Φεβ-92	6.4	5.5	5.8	6.1	6.4	5.3	5.6	5.0	3.3	1.6
Φεβ-93	5.4	3.6	2.7	4.6	3.1	2.8	3.9	3.9	0.5	0.7
Φεβ-94	8.1	6.9	5.0	6.4	5.2	5.3	4.6	5.8	5.4	1.9
Φεβ-95	10.5	9.2	9.6	8.8	10.2	8.9	8.8	6.7	8.6	5.4
Φεβ-96	7.5	6.5	6.1	6.5	6.4	5.3	4.1	3.8	3.5	1.4
Φεβ-97	7.9	6.7	7.0	6.9	7.5	7.2	7.1	5.4	6.2	3.7
Φεβ-98	8.9	8.1	8.5	7.3	9.1	8.2	7.7	6.9	6.9	5.9
Φεβ-99	7.4	5.5	5.4	6.3	5.8	4.9	3.6	4.2	4.2	1.6
Φεβ-00	7.9	6.8	6.7	6.3	7.1	6.2	5.5	4.7	4.7	1.5
Φεβ-01	9.2	8.0	7.6	8.0	8.3	7.9	5.7	2.0	2.0	5.3
Μαρ-81	12.2	11.2	12.9	12.6	13.3	11.7	10.2	10.4	9.1	8.0
Μαρ-82	9.0	8.2	8.7	9.0	9.0	10.4	6.0	7.3	6.3	3.8
Μαρ-83	9.9	9.0	10.2	10.8	10.8	9.5	10.2	8.8	9.4	5.5
Μαρ-84	9.2	8.5	8.9	9.7	9.1	7.5	6.1	7.9	7.3	2.8
Μαρ-85	9.8	9.1	9.1	9.8	8.9	7.5	6.2	10.0	7.4	2.9
Μαρ-86	10.1	9.3	9.7	9.6	10.8	8.3	7.4	8.4	6.9	2.7
Μαρ-87	5.6	4.6	3.8	4.3	2.9	4.6	5.0	3.3	8.6	1.4

Μαρ-88	9.7	8.9	10.0	9.8	10.3	8.7	8.2	10.1	8.6	3.4
Μαρ-89	11.4	11.3	12.2	12.1	13.5	10.7	10.8	11.6	11.1	7.0
Μαρ-90	12.1	11.7	12.3	13.1	12.9	12.2	12.7	13.6	14.1	8.5
Μαρ-91	10.7	10.3	11.2	11.8	11.5	9.9	9.9	9.5	10.0	6.6
Μαρ-92	9.6	9.8	9.2	13.3	10.0	8.6	7.8	10.5	8.0	5.1
Μαρ-93	9.8	9.4	9.7	10.9	10.6	8.2	8.6	7.9	8.8	4.3
Μαρ-94	11.4	11.2	12.5	13.4	12.8	10.7	10.5	9.9	10.2	8.1
Μαρ-95	10.8	9.7	10.1	10.4	10.4	8.4	8.0	8.2	7.5	4.9
Μαρ-96	7.3	6.5	6.5	6.1	6.8	5.0	4.2	3.9	3.1	1.1
Μαρ-97	9.4	8.5	9.0	8.0	9.6	7.4	7.4	6.2	6.9	3.9
Μαρ-98	8.1	7.5	8.2	7.7	8.6	7.2	6.2	5.5	5.5	2.5
Μαρ-99	10.8	10.1	10.0	11.8	10.8	9.7	8.3	7.9	7.9	6.2
Μαρ-00	9.8	9.2	9.8	9.2	10.7	9.2	8.1	8.5	8.5	6.2
Μαρ-01	15.1	15.1	15.4	14.7	16.1	15.2	14.2	8.8	8.8	10.6
Απρ-81	14.5	13.5	14.7	14.5	15.8	12.5	10.0	13.2	13.2	8.8
Απρ-82	12.3	11.8	12.8	14.3	15.3	12.1	12.2	13.0	11.0	8.0
Απρ-83	15.8	15.7	18.0	16.9	16.8	15.7	11.6	17.2	16.1	11.9
Απρ-84	12.2	11.5	12.5	13.2	12.2	11.3	10.1	10.6	13.3	6.2
Απρ-85	15.7	15.8	16.7	15.6	17.7	15.8	14.5	18.7	16.2	11.1
Απρ-86	15.4	15.1	16.9	16.1	17.2	14.9	14.6	16.0	16.2	10.9
Απρ-87	13.5	13.0	14.4	13.7	15.4	12.8	12.3	12.1	13.1	7.9
Απρ-88	13.1	12.8	14.9	13.9	13.9	12.2	12.0	13.8	12.9	8.0
Απρ-89	16.2	16.0	17.8	16.2	16.7	15.9	15.7	17.2	16.9	12.0
Απρ-90	15.5	15.8	16.4	15.8	16.3	15.0	14.1	16.0	14.9	10.7
Απρ-91	13.5	12.7	13.4	13.3	13.2	11.5	11.0	10.8	11.2	6.3
Απρ-92	14.2	14.5	15.0	15.8	15.5	12.8	12.8	12.7	12.9	9.1
Απρ-93	14.0	14.5	17.5	14.6	15.9	12.7	12.4	14.3	13.1	9.1
Απρ-94	15.8	15.1	16.0	15.7	15.9	13.6	12.4	14.9	12.4	10.4
Απρ-95	14.0	13.7	14.8	13.3	15.0	11.4	11.5	12.4	11.3	8.2
Απρ-96	12.9	12.4	13.6	13.7	13.9	10.8	10.7	10.8	9.5	7.6
Απρ-97	11.4	10.6	11.2	10.1	11.3	8.6	7.8	8.0	7.9	4.5
Απρ-98	16.0	16.2	17.2	15.6	17.5	14.9	14.1	15.1	15.1	11.2
Απρ-99	15.9	15.5	16.3	15.8	16.5	15.2	12.9	13.7	13.7	11.4
Απρ-00	16.1	16.3	17.5	15.2	17.6	14.7	15.1	14.4	14.4	11.9
Απρ-01	14.6	14.7	15.5	13.6	15.3	12.1	12.8	6.8	6.8	9.6
Μαϊ-81	18.2	17.7	18.8	18.6	19.6	16.2	14.9	15.7	16.3	12.3
Μαϊ-82	17.8	17.7	18.9	19.0	19.8	16.8	13.2	16.5	16.8	13.9
Μαϊ-83	21.1	21.1	22.3	20.1	22.4	20.5	16.7	18.7	21.6	15.9
Μαϊ-84	19.4	19.3	20.7	19.7	20.6	18.4	17.6	8.0	19.6	14.2
Μαϊ-85	21.0	22.0	21.8	19.9	23.6	20.7	19.5	23.9	21.3	15.8
Μαϊ-86	19.3	19.5	20.9	19.6	21.1	18.2	17.2	17.2	17.8	12.3
Μαϊ-87	17.8	17.8	19.0	18.7	19.3	16.9	16.3	18.2	18.0	11.1
Μαϊ-88	19.6	20.2	21.0	19.8	21.2	18.8	18.2	20.3	19.0	14.1
Μαϊ-89	18.4	18.7	20.0	18.8	19.9	17.4	17.1	17.5	17.1	12.1
Μαϊ-90	19.7	20.0	20.7	19.2	20.6	18.8	17.7	15.2	19.6	14.1
Μαϊ-91	17.4	16.7	18.9	18.2	17.8	15.5	14.5	17.7	17.8	10.3
Μαϊ-92	17.3	18.0	18.1	18.0	18.7	15.1	15.7	15.5	17.8	11.2
Μαϊ-93	19.3	19.8	20.4	19.5	20.3	17.1	17.1	16.4	17.8	13.3
Μαϊ-94	20.6	20.9	21.0	20.2	21.7	18.8	17.9	18.0	17.5	15.3
Μαϊ-95	20.1	20.2	21.2	18.9	20.8	17.5	16.7	17.8	17.0	13.4
Μαϊ-96	21.4	21.4	22.3	20.6	22.6	20.0	19.0	19.7	8.6	15.8
Μαϊ-97	21.1	21.3	22.4	19.5	22.1	18.5	18.7	19.2	19.3	15.8
Μαϊ-98	19.1	19.0	19.7	18.2	19.6	16.9	15.9	16.2	16.2	12.5
Μαϊ-99	20.8	20.8	23.9	20.5	22.3	19.9	18.0	19.0	19.0	15.8
Μαϊ-00	21.2	21.6	22.4	20.3	22.2	19.3	19.5	19.5	19.5	16.4
Μαϊ-01	19.7	20.1	21.0	19.4	20.8	17.7	18.9	11.6	11.6	14.8
Ιουν-81	25.8	26.5	25.9	25.0	26.9	24.2	23.5	24.4	24.3	19.7
Ιουν-82	24.6	25.2	25.8	24.8	27.3	22.8	26.1	23.0	24.3	20.0
Ιουν-83	22.4	22.9	22.9	23.6	24.6	21.2	20.0	15.4	21.6	16.3
Ιουν-84	23.5	24.1	25.1	23.9	25.4	22.5	21.7	9.8	23.5	16.8
Ιουν-85	25.1	25.6	26.3	24.8	27.1	23.7	22.4	28.4	25.4	17.9

Ιουν-86	25.2	25.5	25.2	24.2	26.2	22.0	21.9	20.9	23.2	17.3
Ιουν-87	24.8	25.1	25.7	25.0	26.3	23.9	22.7	23.3	24.8	17.2
Ιουν-88	25.4	26.2	26.6	24.8	26.6	24.5	22.9	25.2	24.2	18.4
Ιουν-89	23.4	23.7	24.7	23.6	24.9	22.2	21.2	21.6	23.0	16.2
Ιουν-90	25.2	25.9	26.3	24.6	26.5	23.5	22.8	23.7	25.6	18.5
Ιουν-91	25.1	25.4	26.6	25.1	26.5	24.4	23.9	23.4	24.0	19.7
Ιουν-92	23.8	24.5	24.5	23.5	24.8	21.5	21.1	17.4	22.5	18.1
Ιουν-93	25.6	25.9	26.4	24.8	26.2	22.8	22.5	21.5	21.8	19.0
Ιουν-94	24.7	25.5	25.3	24.5	25.4	22.5	21.3	20.6	20.7	18.6
Ιουν-95	26.1	26.7	27.4	25.2	26.9	24.2	23.4	23.8	22.4	19.8
Ιουν-96	25.4	25.9	26.4	24.5	26.0	22.8	22.4	22.9	21.7	18.9
Ιουν-97	25.2	26.4	27.4	25.3	27.0	23.3	23.7	24.2	24.0	20.5
Ιουν-98	25.8	26.5	25.1	25.2	26.8	23.4	23.0	23.8	23.8	18.7
Ιουν-99	26.3	26.6	28.0	25.3	27.2	24.7	21.6	24.1	24.1	20.2
Ιουν-00	25.6	26.1	26.0	24.0	26.1	22.9	23.5	23.0	23.0	19.4
Ιουν-01	25.4	26.1	26.2	24.2	26.3	22.6	23.2	16.7	16.7	19.3
Ιουλ-81	26.4	26.4	26.9	26.0	27.5	24.2	24.1	24.6	24.1	19.8
Ιουλ-82	25.6	25.9	27.6	25.9	27.9	25.5	27.0	24.4	23.8	20.4
Ιουλ-83	26.9	26.9	27.1	26.1	27.4	25.4	23.7	24.7	25.5	20.9
Ιουλ-84	25.6	26.2	26.9	26.3	27.4	24.6	24.3	25.0	25.4	19.6
Ιουλ-85	26.4	26.9	27.5	26.3	29.1	25.3	25.0	25.0	27.5	20.4
Ιουλ-86	26.5	26.5	26.5	25.6	28.4	25.4	23.6	24.4	26.1	19.4
Ιουλ-87	27.7	28.3	28.7	27.2	29.3	27.0	26.9	27.6	29.1	20.7
Ιουλ-88	29.2	30.3	30.2	28.1	31.1	28.8	28.3	29.0	28.5	23.2
Ιουλ-89	26.2	26.3	16.2	25.7	26.9	24.6	23.9	24.6	24.7	18.7
Ιουλ-90	27.5	27.8	28.6	26.7	28.5	26.2	26.2	25.5	27.1	21.3
Ιουλ-91	26.4	25.7	26.2	25.4	26.2	24.0	24.2	24.1	23.3	19.8
Ιουλ-92	25.6	25.3	25.6	24.6	25.6	22.0	22.4	23.4	22.5	18.3
Ιουλ-93	26.8	27.4	27.6	26.0	27.7	24.7	24.7	24.4	23.5	21.6
Ιουλ-94	26.8	27.3	25.6	26.5	26.9	24.6	23.3	24.3	22.6	21.2
Ιουλ-95	27.0	26.9	26.8	25.8	26.8	24.0	23.3	24.7	23.2	20.3
Ιουλ-96	26.9	27.1	27.3	26.1	26.9	24.6	23.9	24.7	22.7	21.4
Ιουλ-97	28.1	28.2	28.8	25.4	27.8	25.9	24.8	25.8	25.7	21.5
Ιουλ-98	28.3	29.2	29.3	27.2	28.9	26.8	26.0	26.5	26.5	22.2
Ιουλ-99	27.8	27.9	28.0	26.3	27.5	25.5	23.8	25.3	25.3	22.3
Ιουλ-00	28.3	29.0	29.2	27.7	28.9	27.8	26.2	27.1	27.1	23.1
Ιουλ-01	28.7	28.4	29.2	27.8	28.8	26.5	25.9	20.2	20.2	21.9
Αυγ-81	25.4	25.1	25.8	24.9	25.6	23.4	23.5	23.8	23.6	19.8
Αυγ-82	25.7	25.6	27.4	25.4	26.9	26.1	21.2	24.4	24.4	21.3
Αυγ-83	24.7	24.7	25.3	24.5	25.1	23.8	23.6	26.3	23.4	19.9
Αυγ-84	24.3	24.0	24.5	24.1	24.2	23.3	22.8	23.0	23.8	18.3
Αυγ-85	26.8	26.9	27.1	27.3	27.5	25.8	25.9	26.4	28.6	21.7
Αυγ-86	27.5	27.0	26.0	26.0	27.4	26.0	25.4	26.1	26.9	20.4
Αυγ-87	25.9	25.5	26.4	25.3	27.5	25.0	24.6	24.2	26.1	19.5
Αυγ-88	27.5	27.3	28.0	26.8	30.1	26.5	26.2	26.9	26.0	21.4
Αυγ-89	26.5	26.2	26.7	25.7	26.3	25.3	25.2	25.7	25.5	19.9
Αυγ-90	25.4	25.3	25.9	24.6	25.8	24.7	24.2	23.2	25.2	20.6
Αυγ-91	25.8	24.9	25.9	24.7	25.1	24.1	24.0	23.6	23.6	19.0
Αυγ-92	27.7	27.5	26.9	26.9	27.4	25.3	26.1	24.9	24.7	22.8
Αυγ-93	26.5	26.8	26.3	25.9	26.9	25.3	25.6	24.5	23.5	22.4
Αυγ-94	27.3	27.2	27.3	26.1	27.3	26.4	25.2	24.7	24.0	22.6
Αυγ-95	25.8	25.1	25.0	24.0	24.6	23.3	22.5	23.1	21.4	19.1
Αυγ-96	26.1	26.2	26.4	24.3	26.0	24.3	23.9	24.3	22.2	20.3
Αυγ-97	25.3	24.9	25.7	23.5	24.8	23.0	22.6	22.8	22.8	18.5
Αυγ-98	27.4	27.9	28.0	26.5	27.7	26.4	25.6	25.9	25.9	22.2
Αυγ-99	27.5	27.5	28.0	26.7	27.4	26.2	26.0	26.2	26.2	22.8
Αυγ-00	27.4	26.8	26.5	25.1	27.4	25.5	25.1	25.9	25.9	21.9
Αυγ-01	27.5	27.5	27.7	26.4	27.8	25.9	25.2	19.1	19.1	21.4
Σεπ-81	22.5	22.1	23.0	21.8	22.4	22.1	21.1	21.0	21.1	18.0
Σεπ-82	22.5	22.3	23.6	22.2	22.9	21.8	21.4	21.5	21.2	18.9
Σεπ-83	21.6	21.2	21.6	21.5	21.1	21.2	20.4	23.8	21.0	16.7

Σεπ-84	23.0	22.4	22.1	21.9	21.3	23.3	21.2	25.4	22.7	17.7
Σεπ-85	22.3	21.9	22.5	22.4	23.6	21.6	21.3	22.0	22.7	16.9
Σεπ-86	23.1	22.2	22.0	21.5	23.3	21.1	20.6	21.5	22.7	18.0
Σεπ-87	24.0	23.8	24.3	24.1	25.7	23.7	24.4	25.4	24.7	20.1
Σεπ-88	23.3	22.9	23.5	22.1	23.4	21.5	21.3	22.5	22.3	17.2
Σεπ-89	23.0	22.2	23.0	22.2	23.7	21.9	21.2	21.9	21.3	16.6
Σεπ-90	22.2	21.6	22.4	22.1	22.4	21.4	20.9	20.7	22.7	16.9
Σεπ-91	22.0	21.4	22.2	21.8	22.3	21.4	21.5	20.5	20.9	17.1
Σεπ-92	22.2	21.4	21.3	22.5	21.7	20.4	20.2	19.7	19.9	17.3
Σεπ-93	22.8	22.0	21.5	22.0	22.7	21.1	20.4	21.4	19.1	18.4
Σεπ-94	25.2	25.0	25.0	24.0	25.2	24.9	23.3	23.8	21.4	21.7
Σεπ-95	23.1	21.8	21.8	21.2	21.9	21.1	19.1	21.8	18.6	16.4
Σεπ-96	21.8	20.6	20.5	19.5	20.4	19.7	18.4	18.6	16.8	14.9
Σεπ-97	20.5	20.4	21.4	20.1	21.2	19.4	18.8	18.6	18.6	16.0
Σεπ-98	22.3	21.3	21.7	20.8	21.6	20.5	19.0	19.0	19.0	18.7
Σεπ-99	22.7	22.5	22.0	21.4	22.2	21.2	20.8	20.4	20.4	17.9
Σεπ-00	22.7	22.6	23.2	21.7	22.9	21.7	20.3	21.1	21.1	17.7
Σεπ-01	24.2	23.9	24.0	22.4	24.1	22.3	21.9	15.4	15.4	18.0

Πίνακας Π1.3. Μέση μηνιαία και αθροιστική βροχόπτωση για το Σταθμό Τυρνάβου

ΣΤΑΘΜΟΣ: ΤΥΡΝΑΒΟΣ - ΥΨΟΜΕΤΡΟ: 97.1 m

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΕΤΟΣ
1981	4.0	32.8	15.2	47.0	13.0	15.8	17.0	54.0	10.2	89.6	80.2	53.0	431.8
1982	18.2	101.8	70.8	137.2	105.2	13.4	7.2	25.2	10.0	109.2	72.6	54.0	724.8
1983	31.4	26.2	9.2	12.0	12.6	71.0	49.2	22.4	6.8	16.2	48.4	170.2	475.6
1984	40.2	49.8	44.0	86.4	0.0	43.6	5.2	65.8	4.2	2.2	54.4	16.8	412.6
1985	30.2	7.2	63.8	23.0	20.0	14.0	11.0	0.0	0.0	73.6	170.2	20.4	433.4
1986	45.4	83.8	38.2	0.0	25.0	45.2	12.4	11.2	5.0	78.2	56.0	19.0	419.4
1987	46.4	43.6	126.4	56.0	28.6	6.4	8.2	10.2	2.0	79.8	96.8	40.5	544.9
1988	8.2	26.2	29.6	18.8	15.2	18.0	0.0	11.0	0.0	14.0	128.2	96.8	366.0
1989	0.0	12.0	33.4	12.0	22.8	43.8	36.4	25.2	0.0	22.2	56.8	61.8	326.4
1990	33.0	7.4	15.0	9.4	73.1	12.0	0.0	94.2	16.0	31.4	73.4	103.4	468.3
1991	22.2	26.8	70.6	103.6	70.2	12.6	24.0	44.3	24.6	12.6	34.8	13.0	459.3
1992	20.0	16.6	14.6	128.4	90.0	88.9	3.6	2.0	0.0	38.0	60.8	22.6	485.5
1993	76.4	24.6	34.4	16.8	54.4	26.2	0.0	10.0	5.8	18.2	156.0	36.4	459.2
1994	95.4	61.2	15.4	54.0	31.0	0.0	12.4	5.8	0.0	60.8	62.2	63.6	461.8
1995	85.0	9.8	34.0	20.0	40.0	9.8	52.6	21.8	53.6	4.8	33.8	163.4	528.6
1996	38.4	74.0	105.4	14.8	15.4	3.0	19.1	9.2	49.8	79.6	35.2	61.6	505.5
1997	14.2	15.1	13.8	53.0	39.0	15.2	6.8	69.0	1.8	83.2	24.6	114.6	450.3
1998	52.3	69.6	35.4	6.8	87.6	19.2	0.0	1.0	42.8	18.1	206.4	71.9	611.1
1999	27.0	70.4	83.2	15.6	10.0	15.4	32.4	17.0	15.8	52.8	83.5	64.8	487.9
2000	31.6	44.4	25.3	11.6	39.8	15.0	8.0	2.0	9.7	27.8	26.0	6.7	247.9
2001	31.6	29.6	6.0	49.6	109.8	24.2	48.5	39.6	0.0	5.6	29.2	78.4	452.1
2002	23.7	17.4	67.4	57.6	35.7	0.3	71.7	53.4	171.4	51.5	49.0	161.2	760.3
2003	94.9	30.4	7.6	24.1	45.2	36.3	59.9	17.0	21.7	87.1	9.6	37.4	471.2
2004	111.0	10.0	33.5	62.8	34.4	44.5	20.9	3.6	8.6	33.6	26.5	38.3	427.7
2005	26.2	43.0	55.6	0.0	18.2	11.2	7.0	45.4	68.2	7.4	66.5	84.0	432.7
2006	92.2	50.6	41.2	38.5	0.0	48.0	5.4	5.8	60.4	79.8	16.3	10.4	448.6
2009	95.4	19.5	65.0	23.0	39.4	10.3	16.5	3.8	63.8	141.5	47.2	96.2	621.6
2010	16.1	0.0	50.7	21.0	47.8	53.6	15.5	19.0	54.7	158.9	43.9	51.0	532.2
2011	27.0	36.5	41.0	42.6	48.5	30.1	0.0	89.6	33.3	21.5	12.5	59.5	442.1
2012	16.4	72.0	58.3	40.4	109.7	13.0	0.0	8.0	67.5	40.0	72.5	72.5	570.3
2013	42.5	77.5	20.0	4.8	27.3	40.5	66.0	0.0	10.0	30.5	44.5	57.0	420.6

2014	24.5	19.0	55.0	39.0	27.0	16.0	31.8	2.8	117.5	83.5	40.5	75.5	532.1
2015	7.0	58.8	86.0	13.5	39.5	81.0	0.0	27.0	114.5	94.1	28.0	15.0	564.4
2016	15.0	15.0	68.0	10.5	108.0	16.0	0.0	19.2	147.0	51.8	26.0	7.0	483.5
2017	85.5	23.0	51.9	6.5	63.7	41.5	65.0	14.5	15.0	0.0	96.0	58.0	520.6
2018	43.0	159.0	52.5	0.0	23.0	76.5	13.0	34.0	15.0	5.5	68.3	14.5	504.3
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	1,471.5	1,464.6	1,637.4	1,260.3	1,570.1	1,031.5	726.7	884.0	1,226.7	1,804.6	2,236.8	2,170.4	17,484.6
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	40.9	40.7	45.5	35.0	43.6	28.7	20.2	24.6	34.1	50.1	62.1	60.3	485.7

Πίνακας Π1.4. Μέση μηνιαία και αθροιστική βροχόπτωση για το Σταθμό Λάρισας

ΣΤΑΘΜΟΣ: ΛΑΡΙΣΑ - ΥΨΟΜΕΤΡΟ: 71.3 m

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΕΤΟΣ
1981	75.7	30.1	8.9	26.8	30.6	9.5	8.6	18.9	10.4	75.0	57.7	39.6	391.8
1982	9.0	121.9	36.0	122.8	128.8	26.4	13.6	40.9	7.3	74.8	92.2	30.6	704.3
1983	5.8	29.8	9.9	11.8	22.1	51.5	77.1	11.4	3.2	21.2	40.5	156.5	440.8
1984	26.6	26.7	42.8	74.9	13.1	17.8	2.2	53.8	6.0	26.9	54.7	30.7	376.2
1985	30.2	9.9	54.8	13.6	11.4	9.6	2.8	4.8	2.2	47.8	154.0	14.9	356.0
1986	17.4	68.5	29.7	4.8	23.2	40.2	7.2	10.2	8.0	116.8	8.2	21.0	355.2
1987	28.0	42.5	116.4	74.7	33.4	1.9	2.4	10.0	7.0	60.9	76.2	35.8	489.2
1988	37.8	26.2	25.9	30.4	6.9	9.0	0.9	1.6	9.8	34.2	122.6	96.9	402.2
1989	1.7	5.4	34.9	11.0	29.4	35.0	31.5	29.9	2.3	22.4	43.1	76.1	322.7
1990	1.2	6.9	10.2	15.4	53.9	6.0	50.3	64.1	6.5	30.8	71.1	73.6	390.0
1991	30.8	17.3	51.4	90.5	60.0	24.6	42.5	56.4	40.8	24.7	47.6	2.9	489.5
1992	5.8	9.2	10.4	88.3	51.4	74.2	13.8	6.0	3.2	39.3	62.0	25.4	388.9
1993	16.0	29.2	25.3	12.4	76.0	3.9	1.4	3.2	6.9	9.1	148.7	24.6	356.7
1994	71.4	32.3	21.5	61.9	26.7	1.3	24.2	8.2	3.2	85.9	49.9	61.5	448.0
1995	56.8	5.9	32.7	18.1	32.3	34.4	31.0	12.3	24.0	7.8	22.5	92.7	370.5
1996	73.6	56.0	61.9	22.3	9.0	0.3	14.7	30.5	63.7	70.0	30.9	50.0	482.9
1997	31.4	14.5	20.8	48.2	17.6	30.7	1.4	30.6	1.4	55.2	18.1	67.7	337.6
1998	17.1	57.1	32.6	4.5	131.5	7.0	0.3	0.7	37.1	17.6	155.0	52.8	513.3
1999	47.6	55.8	80.5	30.3	5.4	5.0	0.0	6.9	23.9	57.4	63.5	61.7	438.0
2000	14.1	38.0	24.7	13.0	25.7	16.0	0.8	3.6	9.6	40.8	25.6	16.0	227.9
2001	32.8	20.8	8.9	49.2	66.8	11.4	61.1	18.9	0.9	2.0	14.0	44.0	330.8

2002	13.0	15.0	45.0	58.0	6.0	0.0	35.0	36.0	122.0	88.0	31.0	130.0	579.0
2003	89.0	17.0	21.0	26.0	44.0	34.0	29.0	4.0	21.0	75.0	7.0	50.0	417.0
2004	87.0	7.0	31.0	42.0	56.0	92.0	6.0	0.0	18.0	52.0	25.0	32.0	448.0
2005	24.0	34.0	59.0	5.0	25.0	4.0	15.0	16.0	44.0	9.0	56.0	62.0	353.0
2006	121.6	37.8	42.2	36.1	1.5	9.1	28.2	10.4	108.7	116.3	11.4	13.0	536.4
2007	14.0	28.2	26.4	24.4	36.1	26.2	0.0	24.9	21.8	103.4	98.0	19.6	422.9
2008	3.3	18.3	12.2	41.7	3.6	12.7	29.2	2.8	64.8	18.5	20.6	61.7	289.8
2009	82.8	28.7	63.0	13.7	44.7	6.9	31.5	1.8	30.0	117.3	32.5	87.4	540.3
2010	20.0	58.0	48.0	9.0	51.0	10.0	45.0	14.0	62.0	127.0	36.0	19.0	499.0
2011	23.0	18.0	34.0	19.0	11.0	6.0	0.0	47.0	5.0	37.0	2.0	34.0	236.0
2012	14.0	60.0	40.0	47.0	87.0	0.0	0.0	3.0	42.0	40.0	73.0	85.0	491.0
2013	33.0	62.0	29.0	2.0	35.0	56.0	28.0	0.0	10.0	9.0	31.0	41.0	336.0
2014	19.0	17.0	46.0	44.0	26.0	25.0	16.0	8.0	70.0	66.0	32.0	60.0	429.0
2015	13.0	39.0	69.0	26.0	7.0	95.0	6.0	70.0	73.0	109.0	19.0	5.0	531.0
2016	48.0	12.0	84.0	3.0	66.0	10.0	2.0	7.0	121.0	47.0	34.0	5.0	439.0
2017	63.0	26.4	24.9	12.7	51.3	36.6	76.7	14.5	17.8	12.4	85.3	59.9	481.6
2018	24.0	113.0	26.0	3.0	6.0	68.0	27.0	44.0	14.0	9.0	47.0	22.0	403.0
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	1,098.8	1,180.0	1,291.2	1,130.9	1,324.2	852.7	703.8	686.8	888.3	1,600.6	1,836.1	1,680.0	14,274
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	32.32	34.71	37.98	33.26	38.95	25.08	20.70	20.20	26.13	47.08	54.00	49.41	419.8

Πίνακας Π1.5. Μέση μηνιαία και αθροιστική βροχόπτωση για το Σταθμό Ελασσώνας

ΣΤΑΘΜΟΣ: ΕΛΑΣΣΩΝΑ - ΥΨΟΜΕΤΡΟ: 276.3 m

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΕΤΟΣ
1981	64.2	37.1	26.2	39.0	10.9	37.1	28.0	46.8	6.5	97.9	60.6	77.0	531.3
1982	2.8	66.1	45.9	166.5	99.8	10.8	10.4	42.6	23.7	96.2	110.3	44.1	719.2
1983	5.0	24.0	47.1	7.3	44.0	100.2	89.1	20.0	24.4	29.0	72.2	181.6	643.9
1984	39.2	55.5	21.2	56.1	1.6	33.8	0.0	85.0	10.0	0.5	51.6	57.2	411.7
1985	99.9	16.6	77.6	21.9	42.7	30.8	10.4	0.0	0.0	47.5	151.6	9.7	508.7
1986	50.4	104.2	93.7	4.2	78.2	63.0	36.5	6.5	3.4	52.2	19.7	19.9	531.9
1987	44.2	33.8	124.7	73.8	70.2	20.8	12.7	38.8	0.9	89.3	77.7	18.3	605.2
1988	20.9	8.6	16.0	7.6	15.8	12.1	29.6	17.1	5.3	14.4	80.3	88.1	315.8
1989	2.0	5.0	9.2	5.0	15.4	32.2	53.0	6.6	10.2	17.6	37.0	26.3	219.5

1990	0.0	2.0	12.1	13.2	74.2	2.6	61.0	98.0	15.7	38.7	23.0	76.4	416.9
1991	19.5	37.0	40.6	67.4	25.4	5.2	33.6	39.7	32.8	12.1	35.6	5.8	354.7
1992	4.4	0.8	13.5	101.6	41.5	88.4	13.3	7.2	0.0	33.4	53.7	31.5	389.3
1993	17.0	15.7	6.8	17.8	61.3	13.2	4.8	19.8	8.2	3.6	113.6	30.0	311.8
1994	55.0	29.0	10.2	50.5	23.4	16.4	25.0	6.6	3.1	44.1	49.2	48.3	360.8
1995	63.7	4.0	14.6	17.4	38.4	20.4	68.5	22.8	76.6	1.8	29.9	48.0	406.1
1996	25.7	104.2	63.3	13.1	14.9	27.2	18.6	45.1	53.0	55.6	30.1	55.0	505.8
1997	26.2	13.1	12.6	32.4	12.9	33.2	10.7	53.5	11.0	59.7	15.4	85.8	366.5
1998	10.1	40.3	16.4	2.4	154.0	15.1	0.4	37.5	36.8	28.2	212.5	66.1	619.8
1999	54.8	54.9	109.1	20.0	11.7	29.2	18.0	103.5	24.4	68.8	80.3	59.7	634.4
2000	23.5	38.8	24.4	7.0	44.6	13.0	9.1	0.0	11.4	52.2	25.3	11.8	261.1
2001	47.0	26.4	8.2	68.2	45.7	1.7	17.0	29.9	0.0	5.2	37.6	33.4	320.3
2002	33.1	10.6	75.2	78.0	22.3	19.1	93.3	30.0	170.6	82.0	59.6	131.9	805.7
2003	112.7	30.2	13.9	13.5	75.4	37.7	86.5	19.3	38.1	83.1	11.3	49.7	571.4
2004	58.0	10.5	31.7	54.0	55.7	67.1	11.7	8.0	17.6	30.8	25.0	54.7	424.8
2005	31.2	51.9	36.2	11.0	47.7	14.5	24.8	67.8	33.5	10.9	49.0	74.3	452.8
2006	97.2	64.7	58.4	96.6	11.1	20.0	40.0	6.5	67.3	72.4	17.3	11.2	562.7
2007	7.8	19.6	19.4	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	175.9	74.5	10.5	331.1
2008	9.2	0.0	4.3	21.3	0.0	0.0	0.0	27.5	98.4	21.8	18.6	16.1	217.2
2009	23.6	25.7	28.4	28.5	91.4	194.0	7.2	5.9	125.7	173.5	52.5	41.1	797.5
2010	141.4	56.0	49.8	32.4	29.5	0.0	63.1	63.0	96.6	150.4	152.4	123.5	958.1
2011	75.7	135.8	169.5	91.0	98.3	13.9	0.0	59.1	11.6	18.3	0.0	0.0	673.2
2012	0.0	13.4	22.0	10.9	40.0	3.9	0.0	6.8	132.8	60.0	62.2	110.0	462.0
2014	20.0	7.8	63.8	59.9	26.2	51.7	25.7	21.1	68.8	66.6	42.5	111.0	565.1
2015	7.6	27.1	69.8	24.7	25.2	37.2	12.1	70.6	95.2	29.9	49.4	0.3	449.1
2016	27.0	30.1	105.0	9.7	94.5	39.9	0.4	20.7	152.9	22.2	32.0	0.8	535.2
2017	40.4	20.4	24.8	26.7	48.3	51.8	58.1	37.6	13.8	14.4			336.3
ΑΓΡΟΙΣΜΑ	1,360.4	1,220.9	1,565.6	1,374.0	1,592.2	1,157.2	972.6	1,170.9	1,480.3	1,860.2	2,013.5	1,809.1	17,576.9
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	37.79	33.91	43.49	38.17	44.23	32.14	27.02	32.53	41.12	51.67	57.53	51.69	492.6

Πίνακας Π1.6. Μέση μηνιαία και αθροιστική βροχόπτωση για το Σταθμό Βερδικούσσας

ΣΤΑΘΜΟΣ: ΒΕΡΔΙΚΟΥΣΣΑ - ΥΨΟΜΕΤΡΟ: 914.6 m

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΕΤΟΣ
1981	101.0	68.8	25.8	61.4	28.1	32.8	14.1	38.3	14.2	113.2	99.5	77.5	674.7
1982	6.0	91.1	143.3	192.4	139.1	24.4	0.0	51.6	20.9	156.8	289.9	118.3	1,233.8
1983	4.0	48.2	58.3	24.2	73.7	120.7	65.4	0.0	0.0	37.4	122.8	89.2	643.9
1984	84.6	126.8	82.6	146.5	38.4	36.4	0.0	106.7	24.8	0.0	112.2	53.3	812.3
1985	91.5	33.9	104.3	50.6	54.4	41.9	0.0	0.0	0.0	80.0	276.6	46.8	780.0
1986	85.0	161.4	111.4	16.4	72.3	53.1	36.1	14.5	5.7	113.5	104.7	15.0	789.1
1987	35.0	35.0	222.4	78.3	90.3	23.0	41.3	91.5	20.4	109.1	142.2	39.6	928.1
1988	96.5	55.6	42.3	36.0	12.3	12.5	27.5	3.4	9.7	53.5	101.9	104.6	555.8
1989	6.0	43.2	60.1	20.5	51.8	20.4	18.4	22.1	7.7	48.4	58.4	85.0	442.0
1990	0.0	21.7	0.0	32.0	236.0	0.0	50.0	81.0	17.0	59.0	78.0	139.5	714.2
1991	51.8	48.9	104.4	131.3	102.0	14.3	28.8	52.7	36.3	33.7	49.0	16.0	669.2
1992	27.0	19.0	18.0	110.0	115.0	116.0	0.9	0.0	0.1	89.0	68.5	65.0	628.5
1993	88.7	84.5	24.8	10.7	134.5	10.0	0.0	28.1	25.5	48.9	166.2	39.2	661.1
1994	128.0	155.1	15.4	118.6	17.5	8.0	19.6	64.0	0.0	103.5	82.4	111.4	823.5
1995	12.4	9.2	31.7	4.2	13.1	0.7	51.8	55.2	75.8	3.2	23.7	59.9	340.9
1996	111.3	83.5	103.3	2.1	5.5	3.0	57.7	30.8	74.9	47.7	60.9	82.3	663.0
1997	42.7	13.4	28.7	52.7	8.5	10.1	26.5	67.5	16.8	133.7	136.9	125.4	662.9
1998	13.8	87.9	48.3	12.8	160.6	32.9	0.0	19.0	47.0	29.5	286.8	162.9	901.5
1999	118.6	54.9	85.0	66.8	65.4	22.5	28.5	33.2	23.1	53.8	136.7	38.7	727.2
2000	19.5	75.8	14.2	36.6	63.7	31.3	0.0	8.5	25.2	61.0	49.7	39.7	425.2
2001	38.3	12.5	24.7	59.7	55.1	0.0	35.6	44.5	0.0	38.4	27.0	0.0	335.8
2002	5.3	13.1	82.8	69.9	59.1	22.7	57.0	26.3	84.9	19.0	88.1	196.8	725.0
2003	97.4	0.0	9.7	14.6	27.8	22.8	33.2	26.1	34.4	66.4	37.5	70.9	440.8
2004	55.0	13.8	61.8	59.6	40.2	40.2	17.3	26.5	27.5	102.7	62.8	66.0	573.4
2005	34.1	56.3	45.5	17.6	34.7	7.5	0.0	33.7	96.1	10.2	50.6	121.7	508.0
2006	65.7	52.8	58.9	45.8	19.0	55.9	107.8	9.2	112.8	113.1	25.6	21.1	687.7
2007	44.0	62.9	57.0	33.4	95.3	119.0	0.0	47.6	36.2	73.5	85.8	31.7	686.4
2008	17.8	8.1	33.0	43.2	17.3	27.6	9.4	10.2	103.9	21.2	41.9	44.6	378.2
2009	87.6	12.8	48.9	43.5	67.1	59.8	7.7	3.4	96.6	119.3	77.6	166.7	791.0
2010	32.5	106.4	56.5	48.1	82.5	48.0	27.9	5.6	192.8	175.1	62.4	29.7	867.5
2011	31.9	99.0	55.7	38.9	76.5	119.3	0.0	115.0	36.2	61.2	60.9	23.7	718.3
2012	15.5	21.8	50.9	119.4	99.0	19.7	25.2	57.0	103.3	47.8	143.4	110.3	813.3
2013	47.8	87.2	59.5	18.8	60.7	31.9	56.1	3.6	25.1	37.5	82.7	57.7	568.6
2014	48.3	64.1	105.5	87.0	48.7	60.2	21.2	25.4	110.4	107.3	58.3	137.8	874.2
2015	25.1	47.6	80.2	21.1	24.8	79.5	10.8	45.8	123.5	137.1	46.1	5.1	646.7

2016	95.5	37.6	140.3	12.8	164.5	48.5	22.2	103.3	164.7	115.6	83.4	7.3	995.7
2017	8.4	51.8	33.9	56.1	139.5	83.4	36.2	51.7	36.6	37.1	158.3	97.3	790.3
2018	39.6	190.2	143.3	22.6	63.3	98.2	106.3	85.1	27.6	12.1	115.3	17.0	920.6
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	1.913.14	2.255.86	2.472.45	2.016.18	2.657.36	1.558.26	1.040.50	1.488.14	1.857.66	2.669.53	3.754.68	2.714.67	26.398.4
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	50.35	59.36	65.06	53.06	69.93	41.01	27.38	39.16	48.89	70.25	98.81	71.44	694.7

Πίνακας Π1.7. Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite

	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ	Σ/Μ.Ο.
T °C	5.48	7.14	9.87	14.39	19.58	24.97	27.26	26.29	22.02	15.94	10.53	6.24	15.81
i	1.15	1.71	2.80	4.95	7.90	11.41	13.03	12.34	9.44	5.78	3.09	1.40	75.02
ET _p '	9.4	14.7	25.4	48.0	80.8	121.8	141.2	132.9	98.5	57.1	28.4	11.7	769.88
Ld	0.846	0.836	1.03	1.11	1.236	1.246	1.266	1.18	1.04	0.96	0.836	0.816	
ET _p	7.97	12.31	26.19	53.30	99.83	151.73	178.74	156.79	102.45	54.80	23.71	9.58	877.40

Πίνακας Π1.8. Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Serra

	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ	M.Ο.
T °C	5.48	7.14	9.87	14.39	19.58	24.97	27.26	26.29	22.02	15.94	10.53	6.24	15.81
ET _p	747.35												

Πίνακας Π1.9. Υπολογισμός πραγματικής εξατμισοδιαπνοής κατά Turc

Τύπος του Turc για την πραγματική εξατμισοδιαπνοή													
	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ	Σ/Μ.Ο.
P (mm)	32.32	34.71	37.98	33.26	38.95	25.08	20.70	20.20	26.13	47.08	54.00	49.41	419.81
T °C	5.48	7.14	9.87	14.39	19.58	24.97	27.26	26.29	22.02	15.94	10.53	6.24	15.81
T _{cor}	14.21	L _{cor}	798.69	ETa _{cor}	387.08	T	15.81	L	892.78	ETa	396.49		

Πίνακας Π1.10. Υπολογισμός πραγματικής εξατμισοδιαπνοής κατά Coutagne

Τύπος του Coutagne για την πραγματική εξατμισοδιαπνοή													
	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ	Σ/Μ.Ο.
P (mm)	32.32	34.71	37.98	33.26	38.95	25.08	20.70	20.20	26.13	47.08	54.00	49.41	419.81
T °C	5.48	7.14	9.87	14.39	19.58	24.97	27.26	26.29	22.02	15.94	10.53	6.24	15.81
T		14.21	λ	0.36	1/2λ	1.39	1/8λ	0.35	Εφαρμογή		TRUE	ΕΤα	356.63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Κτηνοτροφία

Για την προσέγγιση της συνολικής κατανάλωσης νερού για τις κτηνοτροφικές δραστηριότητες, υιοθετήθηκαν μέσες αντιπροσωπευτικές τιμές και έγινε μια σειρά παραδοχών, όπως αυτές αναλύονται παρακάτω:

- Για την πόση των αιγοπροβάτων η μέση κατανάλωση είναι 5 lt/ημέρα/κεφαλή ενώ όπου υπάρχει αμελκτήριο η μέση κατανάλωση για καθαρισμό αυτού είναι 200 lt/αμελκτήριο/ημέρα. Θεωρήθηκε η ύπαρξη ενός αμελκτηρίου ανά μονάδα εκτροφής.
- Για πόση βοοειδών η μέση κατανάλωση είναι 25 lt/ημέρα/κεφαλή ενώ για καθαρισμό των βοοειδών απαιτούνται 5 lt/ημέρα/κεφαλή. Ο καθαρισμός του αμελκτηρίου απαιτεί 300 lt/αμελκτήριο. Θεωρήθηκε η ύπαρξη ενός αμελκτηρίου ανά μονάδα εκτροφής.
- Θεωρώντας όλους τους χοίρους ως χοιρομάνες (μέγιστη κατανάλωση) χρειάζονται 6 lt/ημέρα/κεφαλή για πόση και 3 lt/ημέρα/κεφαλή για καθαρισμό. Για αρσενικά και νεαρά άτομα χρειάζονται 3 και 2 λίτρα αντίστοιχα και οι μισές ποσότητες για καθαρισμό.
- Για τα ιπποειδή ισχύει ότι και για τα πρόβατα. Γίνεται η παραδοχή ότι στην περιοχή μελέτης δεν υπάρχουν οργανωμένα ιπποφορβεία.
- Για τα πουλερικά γίνεται αποδεκτή κατανάλωση για πόση 2.5 lt/ημέρα/άτομο.
- Το σύνολο του ζωικού κεφαλαίου βρίσκεται εγκατεστημένο εντός της περιοχής μελέτης και το σύνολο των μονάδων καλύπτεται από γεωτρήσεις.
- Κάθε μονάδα εκτροφής αποτελείται από 100 άτομα.

Τα παραπάνω δεδομένα συνδυαστικά με τις παραδοχές που ειπώθηκαν, συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας Π1.11. Ανάλυση κατανάλωσης για κτηνοτροφικές ανάγκες

Κατά κεφαλή κατανάλωση για πόση (lt/ημέρα)		Κατανάλωση ανα μονάδα (100 ατόμων) για καθαρισμό αμελκτηρίου (lt/ημέρα)		Κατανάλωση ανα άτομο για καθαρισμό (lt/ημέρα)	
Ιπποειδή	5	Ιπποειδή	0	Ιπποειδή	0
Βοοειδή	25	Βοοειδή	300	Βοοειδή	5
Χοίροι	6	Χοίροι	0	Χοίροι	3
Αιγοπρόβατα	5	Αιγοπρόβατα	200	Αιγοπρόβατα	0
Πουλερικά	3	Πουλερικά	0	Πουλερικά	0

Πίνακας Π1.12. Συνολικές ημερήσιες καταναλώσεις νερού, στην περιοχή μελέτης, για κτηνοτροφικές ανάγκες (1996)

	Τύρναβος	Αργυροπούλι	Δένδρα	Αμπελώνας	Βρυότοπος	Δελέρια	Ροδιά	Γιάννουλη	Φαλάνη
Ιπποειδή	0.74	0.78	0.02	0.05	0.04	0.02	0.27	0.00	0.08
Βοοειδή	42.08	40.56	5.45	21.55	3.27	2.97	4.95	7.26	0.69
Χοίροι	49.95	10.98	0.00	9.48	1.58	0.00	0.00	0.00	6.16
Αιγοπρόβατα	155.05	161.00	24.08	139.43	26.74	49.63	171.93	1.27	42.81
Πουλερικά	42.00	30.75	9.00	22.20	2.40	1.35	7.20	9.00	10.82
ΣΥΝΟΛΟ	289.82	244.07	38.55	192.70	34.02	53.97	184.35	17.53	60.56

Πίνακας Π1.13. Συνολικές ημερήσιες καταναλώσεις νερού, στην περιοχή μελέτης, για κτηνοτροφικές ανάγκες (2002)

	Τύρναβος	Αργυροπούλι	Δένδρα	Αμπελώνας	Βρυότοπος	Δελέρια	Ροδιά	Γιάννουλη	Φαλάνη
Ιπποειδή	0.98	0.80	0.02	0.21	0.10	0.00	0.63	0.00	0.07
Βοοειδή	48.51	43.56	0.00	55.18	11.88	9.38	59.00	3.60	18.48
Χοίροι	77.58	11.12	0.00	2.70	9.14	0.00	0.00	0.00	12.97
Αιγοπρόβατα	168.84	163.10	30.10	404.61	43.05	139.90	482.23	4.24	43.73
Πουλερικά	41.40	22.50	9.30	18.90	0.84	1.68	6.90	5.40	9.76
ΣΥΝΟΛΟ	337.31	241.08	39.42	481.60	65.01	150.96	548.76	13.23	85.00

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑΘΜΗΣ

Πίνακας Π1.14. Απόλυτα υψόμετρα υπόγειας στάθμης για τις 6 περιόδους μετρήσεων

Κωδικός Γεώτρησης	Χ	Υ	Υψόμετρο (m)	Απόλυτα υψόμετρα στάθμης					
				Ιούλ-Αυγ 2016	Σεπτ 2016	Απρ 2017	Σεπτ 2017	Δεκ 2017	Απρ 2018
75Α	350825.2	4397045	97.71	73.43	72.76	76.08	72.09	74.02	76.34
AD2	358859.4	4402741	68.9	65.02	64.32	65.62	64.38	65.25	66.63
AD3	353898.8	4407524	73.73	72	71.53	72.44	71.37	72.08	72.34
FAKAS-1	357694	4404073	68.76	-	-	65.91	63.39	67.76	64.49
LB110	348823.1	4396683	105.07	-	72.68	-	-	-	82.98
LB113	359019.8	4395607	75	41.67	57.15	60.51	49.21	60.36	53.42
LB115	358524.9	4401597	72.72	45.34	55.93	61.97	49.77	60.31	56.75
LB128	357461.4	4395980	79.18	48.11	61.52	64.29	55.09	64.03	-
LB129	356659.3	4397751	81.09	47.68	63.84	66.55	58.74	64.91	-
LB131	358735.3	4397078	77.18	34.17	56.9	-	48.68	60.63	-
LB134	360230.2	4397842	71.41	-	53.29	58.43	45.41	58.01	-
LB139	357480.2	4400418	77.17	48.54	56.81	62.35	-	60.75	-
LB140	357050	4401475	75.71	-	58.12	-	-	61.78	-
LB148	361219.9	4396735	71.58	35.63	50.42	55.77	41.82	55.97	51.28
LB152	360673.2	4394263	73.92	-	51.76	-	-	-	-
LB214	370643	4394774	54	-	-	31.57	-	-	32.49
LB250	355413.9	4394568	85.58	-	61.1	65.42	59.6	65.25	62.52
LB251	357309.1	4392001	78.41	-	59.74	64.45	58.91	-	-
LB257	359563.5	4390273	75.28	55.96	60.78	61.51	-	62.53	-
LB259	361580.9	4390974	63	32.92	42.5	-	-	-	-
LB260	361210.3	4391683	74.82	-	54.97	56.64	48.4	58.49	-
LB268	362778.3	4392712	71.45	37.54	49.58	-	40.99	-	-
LB278	351607	4398639	90.94	-	73.67	75.01	72.05	73.77	75.24
LB81	353968.9	4396916	87.82	-	66.39	-	-	-	-
LB84	354933	4395815	86.77	-	63.39	67.95	59.72	66.6	63.84
LB90	355006.3	4391983	85.87	-	62.02	65.86	66.55	64.92	-
LB95	356485	4394250	83.72	-	59.63	64.49	58.53	63.93	-
LB98	359260.2	4392853	77.9	-	54.38	59.98	53.37	60.13	-
LB99	359364	4392010	77.0	-	53.02	60.78	53.00	-	81.33
SR110	351671.9	4409854	98.69	72.97	72.34	73.74	72.19	71.15	73.68
SR111	353494.4	4403890	88.86	72.8	71.69	74.19	72.49	73.35	74.84
SR112	349021	4399881	149	57.92	59.05	59.03	57.47	-	61.06
SR114	351959	4394967	106.24	-	76.66	-	77.09	-	-
SR39	354354.5	4402470	80.67	62.48	66.54	69.63	64.25	68.8	69.02
Γ3	355878	4408351	88.2	59.64	59.64	-	-	-	-
ΕΛ55	354089.7	4400764	83.99	-	61.38	-	60.27	-	-
Λ41	351754.5	4391310	77.61	68.77	70.31	70.84	69.71	70.83	70.27
Λ43	353671.7	4392232	85.46	57.84	61.94	65.37	69.1	64.68	63.88
Λ53	358617.9	4398711	75.97	-	54.15	-	-	59.05	-
Λ76	352199.9	4396326	92.69	-	69.35	72.54	-	-	72.58
SR119	352825.6	4406766	126.53	73.14	72.43	74.16	72.26	73.63	74.16
SR118	352168.5	4407950	80.33	73.03	72.75	73.71	72.14	73.54	73.68
PZT3α	350995.4	4397803	105.94	78.45	75.77	80.53	77.30	-	80.82
Π14Λ	346076.5	4391914	116.71	83.65	83.51	85.85	83.09	-	86.26
PZ52	346058.1	4393602	139.02	79.31	-	81.9	78.94	-	82.16
ΕΛ19	365287	4402245	73.65	-	32.5	36.45	33.83	34.15	32.1
LB118	368195	4400668	72.25	-	12.2	17.74	11.42	17.57	15.14
LB273	361309	4401493	66.79	-	-	59.98	47.86	56.39	59.1
AD6	363879	4394498	67.65	-	-	56.05	51.4	56.26	57.23
PZT1	352728	4397684	91.20	-	73.35-	80.64	73.25	-	81.33

ΔΕΛΤΙΟ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΕΛ.Γ.Ο.
ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ "ΑΙΜΙΛΙΟΣ"

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΔΑΦΟΨΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
(πρώην ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΓΓΕΙΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΕΩΝ)

ΔΕΛΤΙΟ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ

Λεκάνη Απορροής / Νομός :	
Τοποθεσία:	
Κωδικός θέσης:	
Όνομα απογραφέα:	
Ημερομηνία απογραφής:	
Κατηγορία απογραφής:	Δείγμα ____, Στάθμη ____, Παροχή _____
Τύπος Σ.Ε.Υ.:	Γεώτρηση ____, Πηγάδι ____, Άλλο ____
Χρήση:	Άρδευση ____, Ύδρευση ____, Βιομηχανία ____, Άλλο ____, Συνδυαστική __
Καθεστώς ιδιοκτησίας:	Ιδιωτική ____, Δημοτική ____, ΤΟΕΒ ____, Στρατιωτική ____, Άλλη ____
Όνομα ιδιοκτήτη:	
Τηλέφωνο επαφή :	
Συντεταγμένες (Ε.Γ.Σ.Α. * 87):	X: _____, Y: _____, Z: _____ (m)
Πρόσβαση στη θέση:	Εύκολη ____, Δύσκολη ____, Ανάλογα με τις συνθήκες ____
Καθεστώς λειτουργίας:	Σε χρήση ____, Όχι σε χρήση ____, Σε συντήρηση _____
Δυνατότητα δειγματοληψίας:	Ναι ____, Όχι ____, Πώς: _____
Δυνατότητα μέτρησης υπόγειας στάθμης:	Ναι ____, Όχι ____, Πώς: _____
Παροχή (m³/h):	
Φωτογραφίες:	
Τύπος καλλιέργειας άρδευσης:	
Μέθοδος άρδευσης:	
Βάθος έργου:	m
Βάθος αντλίας:	m
Βάθη φίλτρων:	m
Διαθεσιμότητα γεωλογικής τομής:	
Υπαρξη θάνας στην κεφαλή:	
Πιθανότητα τοποθέτησης (εάν δεν έχει):	
Υπαρξη χλωριοτήρα:	
Δυνατότητα παράκαμψής του:	
Άδεια δειγματοληψίας:	
Είδος υδροφόρου:	Υπο πίεση ____, Ελεύθερος ____, Σύνθετος ____
Έτος κατασκευής:	
Βάθος υπόγειας στάθμης (m):m Ημερομηνία:
Άλλες σημειώσεις:	

* Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987

Εικόνα Ε1.1. Δελτίο απογραφής ειδικά διαμορφωμένο για τις ανάγκες της διατριβής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Πίνακας Π1.15. Σύνοψη των κριτηρίων αξιολόγησης και τελική βαθμολογία (R), για τις 170 προ-επιλεγμένες γεωτρήσεις

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	WF	75Λ	AA	AD1	AD2	AD3	AD6	ALATAS	F-1	F-2	F-3	K-1	K-2	K-3	LB100	LB101	LB102	LB103	LB104	LB105	LB106
Λιθολογική Τομή	4	5	1	5	5	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1	5	5
Βάθος Υπόγειας Στάθμης	5	2	2	3	4	5	3	1	4	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	3	2
Βάθη Φίλτρων	6	3	1	3	3	1	3	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	3	1	3	3
Είδος Υδροφόρου	8	3	1	3	3	1	3	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	3	1	3	3
Βάθος Έργου	6	5	1	5	5	1	5	1	1	3	1	5	5	5	1	1	1	2	1	5	5
Δυνατότητα Μέτρησης Στάθμης	10	5	3	5	5	5	5	1	3	1	3	1	2	1	3	3	1	1	1	3	1
Δεδομένα Υπ. Στάθμης	9	5	1	2	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Καθεστώς Λειτουργίας	8	5	5	1	3	3	1	5	5	5	5	5	2	2	5	5	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Δειγματοληψίας	7	5	3	1	3	3	1	3	5	3	3	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Δεδομένα Ποιότητας	9	4	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	7	5	5	1	5	5	1	1	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Χρήση Γεώτρησης	3	1	3	1	2	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5	4	4	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
Προστασία Κεφαλής	7	5	3	4	5	4	4	3	4	2	2	4	2	2	5	5	5	5	5	5	5
R:	4.27	2.43	2.79	4.14	3.14	2.61	1.81	2.99	2.16	2.24	2.99	2.39	2.18	2.37	2.37	2.16	2.69	2.16	3.20	2.94	

	WF	LB108	LB109	LB110	LB113	LB114	LB115	LB116	LB118	LB126A	LB127	LB128	LB129	LB130	LB131	LB134	LB135	LB136	LB137	LB138	LB139	
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ																						
Λιθολογική Τομή	4	1	5	1	5	1	5	5	1	1	1	5	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5
Βάθος Υπόγειας Στάθμης	5	1	3	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1	1	2
Βάθη Φίλτρων	6	1	3	1	3	1	3	3	1	1	1	3	3	1	5	3	3	3	3	3	3	3
Είδος Υδροφόρου	8	1	3	1	3	1	3	3	1	1	1	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3
Βάθος Έργου	6	1	5	3	5	1	5	5	1	1	1	5	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Μέτρησης Στάθμης	10	1	1	3	5	3	3	2	5	3	2	3	2	2	2	3	1	1	1	1	1	2
Δεδομένα Υπ. Στάθμης	9	1	1	4	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
Καθεστώς Λειτουργίας	8	5	5	5	5	5	5	5	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Δειγματοληψίας	7	3	3	5	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3
Δεδομένα Ποιότητας	9	1	1	1	4	1	2	1	1	1	1	2	1	1	4	1	1	1	1	1	1	2
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	7	3	3	5	5	5	5	5	1	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5
Χρήση Γεώτρησης	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Προστασία Κεφαλής	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
R:	2.16	2.99	3.14	3.99	2.52	3.39	3.29	2.10	2.09	2.47	3.02	3.19	2.47	3.70	3.35	2.88	3.03	2.88	3.03	3.03	3.29	

Πίνακας Π.1.16 (συνέχεια)

	WF	LB140	LB148	LB149	LB151	LB152	LB153	LB209	LB213	LB214	LB237	LB242	LB250	LB251	LB255	LB256	LB257	LB258	LB259	LB260	LB261	
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ																						
Λιθολογική Τομή	4	5	5	1	3	5	5	5	4	4	5	5	5	1	1	5	5	1	5	5	5	5
Βάθος Υπόγειας Στάθμης	5	3	2	2	1	2	1	3	2	2	1	1	2	3	2	1	3	2	2	3	2	2
Βάθη Φίλτρων	6	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	1	1	5	5	1	3	3	3
Είδος Υδροφόρου	8	3	3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3
Βάθος Έργου	6	5	5	1	5	3	5	5	3	3	5	5	3	3	1	1	3	5	1	5	5	5
Δυνατότητα Μέτρησης Στάθμης	10	3	3	2	3	3	2	3	1	3	1	1	3	3	3	1	3	3	2	4	3	3
Δεδομένα Υπ. Στάθμης	9	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	3	1	1	1	1	1	2	1	2	2
Καθεστώς Λειτουργίας	8	5	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Δειγματοληψίας	7	3	3	3	3	5	3	3	3	3	3	3	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3
Δεδομένα Ποιότητας	9	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	4	1	1	1
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Χρήση Γεώτρησης	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Προστασία Κεφαλής	7	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
R:	3.45	3.39	2.47	3.09	3.15	3.14	3.12	3.01	3.22	3.03	2.73	3.06	3.03	2.57	2.31	3.47	3.43	2.85	3.46	3.39		

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	WF	LB262	LB263	LB265	LB266	LB267	LB268	LB269	LB271	LB273	LB274	LB276	LB278	LB279	LB282	LB284	LB285	LB291	LB299	LB300	LB301
Λιθολογική Τομή	4	1	1	1	1	1	5	1	4	5	5	5	1	1	5	1	5	1	5	5	1
Βάθος Υπόγειας Στάθμης	5	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1
Βάθη Φίλτρων	6	1	1	1	1	1	3	1	3	3	5	3	1	3	3	1	3	1	3	3	3
Είδος Υδροφόρου	8	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	3	1	1	3	1	3	1	3	3	3
Βάθος Έργου	6	1	1	1	1	1	5	1	3	5	5	5	1	3	5	1	5	1	5	5	1
Δυνατότητα Μέτρησης Στάθμης	10	2	3	3	4	3	3	3	3	5	3	1	5	5	1	1	1	3	1	1	4
Δεδομένα Υπ. Στάθμης	9	1	1	1	1	1	1	1	2	5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Καθεστώς Λειτουργίας	8	5	5	5	5	5	5	5	5	1	5	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Δειγματοληψίας	7	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	1	5	3	3	3	3	3	3	3
Δεδομένα Ποιότητας	9	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	7	5	5	5	5	5	5	5	5	1	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	1
Χρήση Γεώτρησης	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Προστασία Κεφαλής	7	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
R:	2.47	2.57	2.57	2.68	2.57	3.39	2.57	3.22	2.86	3.37	2.88	2.20	3.10	2.88	2.16	2.88	2.37	3.03	3.03	2.63	

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	WF	LB302	LB312	LB313	LB315	LB316	LB317	LB76	LB77	LB78	LB80	LB81	LB83	LB84	LB85	LB86	LB87	LB89	LB90	LB91	LB92
Λιθολογική Τομή	4	5	5	5	1	1	1	1	5	5	5	5	1	5	1	1	5	5	5	5	1
Βάθος Υπόγειας Στάθμης	5	2	1	1	1	1	1	5	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1
Βάθη Φίλτρων	6	3	3	5	1	1	1	1	3	3	3	3	1	3	1	1	5	3	3	3	1
Είδος Υδροφόρου	8	3	3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	1	3	1	1	3	3	3	3	1
Βάθος Έργου	6	5	5	5	1	1	1	1	5	5	5	5	3	5	1	1	5	5	5	5	1
Δυνατότητα Μέτρησης Στάθμης	10	1	1	1	2	2	2	3	1	1	3	3	3	3	1	1	1	1	2	3	1
Δεδομένα Υπ. Στάθμης	9	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Καθεστώς Λειτουργίας	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Δειγματοληψίας	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	3	3	1	3	3	3	3
Δεδομένα Ποιότητας	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	4	2	1
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	7	5	3	3	5	5	5	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3
Χρήση Γεώτρησης	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Προστασία Κεφαλής	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
R:	3.09	2.88	3.01	2.41	2.41	2.41	2.82	2.88	2.73	3.10	3.24	2.50	3.30	2.16	2.16	2.86	2.73	3.33	3.24	2.16	

	WF	LB93	LB94	LB95	LB96A	LB97	LB98	LB99	LB99a	M237	M-1	PZ52	PZT3α	SR01	SR110	SR111	SR112	SR113	SR114	SR118	SR119	
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ																						
Λιθολογική Τομή	4	1	1	5	5	5	5	1	5	1	1	1	1	5	5	5	1	5	5	5	5	5
Βάθος Υπόγειας Στάθμης	5	1	1	2	1	1	2	5	1	1	4	1	2	1	2	3	1	1	2	4	1	1
Βάθη Φίλτρων	6	1	1	3	3	3	3	1	3	1	3	1	1	3	3	3	1	3	3	3	3	3
Είδος Υδροφόρου	8	1	1	3	3	3	3	1	3	1	1	1	1	3	3	3	1	3	3	3	3	3
Βάθος Έργου	6	1	1	5	5	5	5	1	5	1	5	1	1	5	5	5	1	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Μέτρησης Στάθμης	10	1	3	3	1	1	3	3	1	1	2	5	5	3	4	4	4	1	3	2	5	5
Δεδόμένα Υπ. Στάθμης	9	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1	5	5	1	5	5	3	3	3	3	3	3
Καθεστώς Λειτουργίας	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	1
Δυνατότητα Δειγματοληψίας	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	1	1	3	5	5	5	3	3	3	3	1
Δεδομένα Ποιότητας	9	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	4	4	1	4	1	1	1
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	7	3	3	3	3	3	3	1	1	5	5	1	1	5	5	5	5	3	3	1	1	1
Χρήση Γεώτρησης	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	1	1	3	4	1	3	3	3	4	1	1
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	5	5	3	5	5	4	4	4	1	5	5
Προστασία Κεφαλής	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5
R:	2.16	2.37	3.24	2.88	2.88	3.24	2.82	2.73	2.29	2.98	2.32	2.37	3.19	4.12	4.27	3.26	3.07	3.63	2.91	2.85		

	WF	SR39	SR67	Γ1	Γ3	Γ4	ΕΛ19	ΕΛ20	ΕΛ21	ΕΛ22	ΕΛ23	ΕΛ24	ΕΛ25	ΕΛ38	ΕΛ43	ΕΛ45	ΕΛ47	ΕΛ48	ΕΛ50	ΕΛ52	ΕΛ55	
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ																						
Λιθολογική Τομή	4	5	1	5	5	5	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	5	1	1	1
Βάθος Υπόγειας Στάθμης	5	3	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	1	1	2	2
Βάθη Φίλτρων	6	3	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	5	3	1	1	1
Είδος Υδροφόρου	8	3	1	1	3	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1
Βάθος Έργου	6	5	1	1	5	5	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	3	3	5	1	1	1
Δυνατότητα Μέτρησης Στάθμης	10	5	2	1	2	1	5	1	1	1	3	3	1	1	3	3	1	2	1	3	3	3
Δεδόμένα Υπ. Στάθμης	9	5	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4
Καθεστώς Λειτουργίας	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Δειγματοληψίας	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	3	3	3	5	5
Δεδομένα Ποιότητας	9	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	7	3	5	3	5	1	1	3	3	3	3	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Χρήση Γεώτρησης	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5	4	4	5	5	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Προστασία Κεφαλής	7	5	5	5	5	5	3	5	4	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4	5	5	5
R:	3.89	2.41	2.38	3.34	2.79	2.38	2.26	2.09	2.16	2.37	3.13	2.16	2.23	2.52	2.57	2.94	3.16	2.96	2.52	3.01		

	WF	ΕΛ57	ΕΛ59	ΕΛ68	Λ31	Λ32	Λ33	Λ40	Λ40Α	Λ41	Λ42	Λ43	Λ51	Λ52	Λ53	Λ54	Λ55	Λ56	Λ57	Λ58	Λ59	Λ67	Λ76	Λ80	Π14Λ	Υ150	Υ152	Υ175	ΑΣΜΑΚΙ	ΚΙΣΙΚΙ	GC9?	
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ																																
Λιθολογική Τομή	4	1	1	1	5	1	1	1	1	5	5	1	5	1	3	1	1	1	1	1	1	1	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1
Βάθος Υπόγειας Στάθμης	5	1	1	1	1	2	1	1	1	4	3	2	2	1	2	3	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	4
Βάθη Φίλτρων	6	1	1	1	3	1	1	1	1	3	3	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1
Είδος Υδροφόρου	8	1	1	1	3	1	1	1	1	3	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1
Βάθος Έργου	6	1	1	1	5	1	1	1	1	5	5	1	5	1	3	1	1	1	1	1	1	1	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1
Δυνατότητα Μέτρησης Στάθμης	10	3	1	3	1	3	3	1	1	3	3	3	2	3	3	3	1	3	3	1	3	1	3	1	5	2	2	2	1	2	3	
Δεδομένα Υπ. Στάθμης	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1
Καθεστώς Λειτουργίας	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Δυνατότητα Δειγματοληψίας	7	3	3	3	3	3	3	3	3	5	3	5	3	3	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	5	5	5	5	5	3
Δεδομένα Ποιότητας	9	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	4	4	4	4	4	4	1
Προσέγγιση Θέσης-Άδεια Δειγματοληψίας-Ετήσια Πρόσβαση	7	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	3	1	5	5	5	5	5	5	1
Χρήση Γεώτρησης	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3
Ιδιοκτησιακό καθεστώς	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	3	3	3	3	3	3
Προστασία Κεφαλής	7	3	3	5	4	4	5	4	5	5	5	5	4	5	5	5	4		5	5	5	4	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4
R:	2.37	2.16	2.37	2.81	2.35	2.37	2.09	2.16	3.50	3.20	3.01	3.12	2.52	3.06	2.63	2.23	2.20	2.57	2.31	2.57	2.09	3.24	2.88	2.37	2.72	2.72	2.72	2.62	2.72	2.26		

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

 <p>ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS</p>	 <p>ΕΛ.Γ.Ο. ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΓΕΩΡΓΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ "ΔΗΜΗΤΡΑ"</p>
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ	ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΔΑΦΟΨΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ (πρώην ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΓΓΕΙΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΕΩΝ)

"Υδρογεωλογική έρευνα με χρήση σύγχρονων διαχειριστικών εργαλείων στο πλαίσιο της ποιοτικής και ποσοτικής παρακολούθησης του υπόγειου υδατικού συστήματος της υπο-λεκάνης Τυρνάβου (Θεσσαλία)".

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΝΕΡΟΥ

1. Υλικά που χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία

- Για τα δείγματα νερού που προορίζονται για το εργαστήριο φυσικοχημικών δοκιμών του Ι.Ε.Υ.Π. χρησιμοποιούνται πλαστικές φιάλες με εσωτερικό πώμα για την αποφυγή διαρροής του δείγματος κατά τη μεταφορά. Τα μπουκαλάκια αυτά είναι χωρητικότητας 1000ml.
- Για τα δείγματα που προορίζονται για το Εργαστήριο Υδρολογίας του Πανεπιστημίου του Lubeck χρησιμοποιούνται πλαστικές φιάλες με εσωτερικό πώμα για την αποφυγή διαρροής και εξάτμισης του δείγματος κατά τη μεταφορά. Τα μπουκαλάκια αυτά είναι χωρητικότητας 100ml.
- Για τη μεταφορά των δειγμάτων προς το Ι.Ε.Υ.Π. χρησιμοποιούνται ψυχόμενα, θερμικά μονωμένα δοχεία, 42 λίτρων.
- Για τη λήψη και την τοποθέτηση του ύδατος στις φιάλες δειγματοληψίας, στην περίπτωση μη αντλητικού συγκροτήματος ή στην περίπτωση δειγμάτων επιφανειακού ύδατος, χρησιμοποιείται φορητή υποβρύχια αντλία, με μέγιστο βάθος (ή ύψος) άντλησης τα 15m.

Υπόλοιπος εξοπλισμός

- 1) Δελτία απογραφής όλων των θέσεων του δικτύου παρακολούθησης αλλά και όσων θέσεων απογράφησαν.
- 2) Δελτία δειγματοληψίας.
- 3) Δελτίο αποστολής δειγμάτων).
- 4) Προτυπωμένες ετικέτες δειγμάτων.
- 5) Υλικά συσκευασίας (παγοκύστες, ταινία συσκευασίας, τυπωμένες διευθύνσεις αποστολής και διαφάνειες αρχειοθέτησης).
- 6) GPS.
- 7) Πολυπαραμετρικό όργανο μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, θερμοκρασίας, pH, διαλυμένου οξυγόνου και δυναμικού οξειδοαναγωγής.
- 8) Μπαταρίες τροφοδοσίας υποβρύχιας αντλίας νερού.
- 9) Μικρό ηλεκτρικό ψυγείο, 12V λειτουργίας.
- 10) Δοχείο πλήρωσης για δειγματοληψία ισοτόπων.
- 11) Δοχείο πλήρωσης για τις μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων στο πεδίο.
- 12) Δοχείο απιονισμένου νερού.
- 13) Σταθμήμετρο.
- 14) Φωτογραφική μηχανή.
- 15) Στυλό, μολύβια, μαρκαδόροι σήμανσης.
- 16) Γάντια μιας χρήσης.
- 17) Κουζινόχαρτο, σακούλες.
- 18) Εφημερίδες για τις παγοκύστες.
- 19) Γαλότσες, αδιάβροχο.
- 20) Σετ εργαλείων πεδίου.

2. Διαδικασία λήψης δείγματος

- Την προηγούμενη της δειγματοληψίας, το συνεργείο δειγματοληψίας συγκεντρώνει όλο τον απαιτούμενο εξοπλισμό σε συγκεκριμένο χώρο και ελέγχει, βάσει λίστας, ότι δεν λείπει κάτι.

- Τη μέρα της δειγματοληψίας, πριν την αναχώρηση του συνεργείου, τοποθετούνται οι παγοκύστες στα φορητά ψυγεία και φορτώνεται όλος ο εξοπλισμός στο αυτοκίνητο.

- Αφού εντοπιστεί η θέση δειγματοληψίας ξεφορτώνεται από το αυτοκίνητο ότι θα χρειαστεί για τη λήψη των δειγμάτων. Σημειώνεται ότι τα δείγματα που αφορούν επιφανειακά νερά (ποτάμια), λαμβάνονται από τέτοια θέση ώστε αυτά να είναι αντιπροσωπευτικά.

- Σημειώνεται αν υπάρχει χλωριωτήρας και αν αυτός βρίσκεται πριν ή μετά το σημείο δειγματοληψίας.

- Στην περίπτωση που μία γεώτρηση δεν λειτουργεί πριν τη δειγματοληψία, είναι απαραίτητο να μπει σε λειτουργία και να καθαρίσουν οι σωλήνες, πριν από τη συλλογή του δείγματος. Ο χρόνος εκκαθάρισης ποικίλλει για κάθε θέση παρακολούθησης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατασκευής κάθε γεώτρησης καθώς και τις υδρογεωλογικές συνθήκες της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Ο χρόνος πριν την έναρξη της δειγματοληψίας αποφασίζεται βάσει ενός συνόλου κριτηρίων που διασφαλίζουν την ακεραιότητα και την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος. Αυτά τα κριτήρια είναι: (α) η μακροσκοπική εξέταση του αντλούμενου ύδατος για την πιθανή ύπαρξη αιωρούμενων στερεών και θολότητας, (β) σταθερότητα των μετρούμενων τιμών pH, T_{water} και EC στο νερό, (γ) ελάχιστος χρόνος καθαρισμού 5-10 λεπτά.

- Η βάνα (ή το σημείο εξαγωγής του νερού), βρέχεται με νερό της γεώτρησης και καθαρίζεται με ένα κομμάτι κουζινόχαρτο. Στη συνέχεια, τοποθετούνται στα χέρια γάντια latex (χειρουργικά) μιας χρήσης, τα οποία αλλάζονται όσες φορές κριθεί σκόπιμο κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Σημειώνεται ότι από μια θέση δειγματοληψίας σε μια άλλη είναι απαραίτητο να αντικαθίστανται τα γάντια μιας χρήσης.

- Ανοίγεται το καπάκι της πλαστικής φιάλης και στη συνέχεια ξεπλένεται (φιάλη) με το νερό του δείγματος και κρατείται σε μικρή απόσταση από το σημείο εκροής του νερού, μακριά από οτιδήποτε μπορεί να το ακουμπήσει. Το καπάκι πρέπει είτε να κρατείται στο χέρι είτε να τοποθετείται σε σημείο που δεν υπάρχει περίπτωση να λερωθεί ή να σκονιστεί και πάντα από την ανάποδη πλευρά (το ανοικτό μέρος προς τα επάνω). Στη συνέχεια γεμίζεται η φιάλη κρατώντας το υπό γωνία και σε μικρή απόσταση από το σημείο εκροής του νερού. Ξεπλένεται και το καπάκι με νερό δείγματος πριν αυτό βιδωθεί στη φιάλη δειγματοληψίας. Κλείνεται προσεκτικά αεροστεγώς, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία φυσαλίδων.

- Ειδικά στην περίπτωση των δειγμάτων προς ανάλυση ισοτόπων, η πλήρωση της πλαστικής φιάλης πραγματοποιείται με τη βύθισή της, σε μεγαλύτερο δοχείο με νερό δείγματος, έτσι ώστε να αποφευχθούν κενά κατά την πλήρωση. Η φιάλη σφραγίζεται ερμητικά προς αποφυγή εξάτμισης.

- Σε κάθε θέση, εκτός των φιαλών, γεμίζεται με νερό και ένα πλαστικό δοχείο για τις επιτόπου μετρήσεις του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), της θερμοκρασίας νερού (T_w), του διαλυμένου οξυγόνου (DO) και του δυναμικού οξειδοαναγωγής (ORP). Από θέση σε θέση είναι απαραίτητο να ξεπλένεται καλά και να σκουπίζεται τόσο το δοχείο όσο και οι αισθητήρες του οργάνου μέτρησης, με απιονισμένο νερό. Οι μετρήσεις αυτές καταγράφονται στη Φόρμα Συλλογής Δείγματος (Δελτίο Δειγματοληψίας).

- Στην περίπτωση χρήσης της φορητής υποβρύχιας αντλίας διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

α) για τη λήψη υπόγειου ύδατος (μέγιστο βάθος στάθμης 15m), η αντλία βυθίζεται στο μέγιστο δυνατό βάθος άντλησης. Αντλείται νερό για τουλάχιστον 5-10 λεπτά, ανάλογα με τις συνθήκες τις κάθε θέσεις, και στη συνέχεια ακολουθείται η διαδικασία πλήρωσης, που αναφέρθηκε παραπάνω.

β) για τη λήψη επιφανειακού ύδατος (μέγιστο ύψος γέφυρας 15m), η αντλία βυθίζεται στο μέσο περίπου του ύψους της στάθμης του ποταμού, εφόσον αυτό είναι εφικτό. Η διαδικασία πλήρωσης πραγματοποιείται άμεσα εφόσον πρόκειται για νερό συνεχούς ροής.

Σημειώνεται, ότι από θέση σε θέση η φορητή αντλία καθαρίζεται εξωτερικά και εσωτερικά με άντληση ικανής ποσότητας απιονισμένου νερού.

- Εξαιτίας της εξασφάλισης άμεσης αποστολής των λαμβανόμενων δειγμάτων νερού στο εργαστήριο, τα δείγματα δεν διηθούνται στο πεδίο και δεν απαιτείται η χημική τους συντήρηση.
- Αμέσως μετά τη δειγματοληψία, οι φιάλες σκουπίζονται και τοποθετείται πάνω τους, προτυπωμένη ετικέτα με κατάλληλο κωδικό. Στη συνέχεια τοποθετούνται προσεκτικά μέσα στα ψυχόμενα, θερμικά μονωμένα δοχεία.
- Στη συνέχεια συμπληρώνονται το δελτίο δειγματοληψίας με όλα τα απαραίτητα στοιχεία για κάθε δείγμα.
- Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας φωτογραφίζεται οτιδήποτε θεωρηθεί σκόπιμο.

4. Κωδικός δείγματος - Δελτίο δειγματοληψίας

- Σε κάθε δείγμα που λαμβάνεται τοποθετείται στη φιάλη δειγματοληψίας, προτυπωμένη ετικέτα (εκτυπωμένη με ανεξίτηλο μελάνι (εκτύπωση laser)) με τις εξής πληροφορίες (Εικόνα Ε1.2): κωδικός θέσης (Σημείου Εμφάνισης Ύδατος), κωδικός δείγματος, α/α δείγματος, ημερομηνία & ώρα δειγματοληψίας, αρχικά δειγματολήπτη και τυχόν χημικό συντηρητικό που χρησιμοποιήθηκε. Ο κωδικός του δείγματος είναι της μορφής:

ΚΩΔΙΚΟΣ ΘΕΣΗΣ (ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ) / ΦΟΡΕΑΣ ΥΠΟΔΟΧΗΣ / Α/Α ΦΙΑΛΗΣ ΑΠΟ ΧΧ ΦΙΑΛΕΣ / ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ

π.χ. LB273 / Ι.Ε.Υ.Π. / 1-2 / 26-4-2017

 ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΔΗΜΗΤΡΑ	
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΕΥ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΩΡΑ
	ΣΥΝΤΗΡΗΤΙΚΟ
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΑΡΧΙΚΑ

Εικόνα Ε1.2. Ετικέτα σήμανσης για τις φιάλες δειγματοληψίας σχεδιασμένη για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας

- Σε κάθε θέση δειγματοληψίας νερού συμπληρώνεται το δελτίο δειγματοληψίας (Εικόνα Ε1.3). Το έγγραφο αυτό είναι συνοδευτικό κάθε δείγματος και αποτελεί την «ταυτότητά» του. Σε αυτό αναγράφονται:

- τα στοιχεία του δειγματολήπτη (ονοματεπώνυμο και υπογραφή)
- τα στοιχεία της δειγματοληψίας (περίοδος, ημερομηνία και ώρα)
- τα στοιχεία της θέσης δειγματοληψίας (κωδικός θέσης, νομός, υδατικό διαμέρισμα, τοποθεσία, κατάσταση)
- τα στοιχεία του δείγματος (κωδικός δείγματος, χρόνος αναμονής)
- άλλες παρατηρήσεις
- αποτελέσματα μετρήσεων υπαίθρου

- Στη συνέχεια ακολουθεί η αποθήκευση των δειγμάτων στα ψυχόμενα, θερμικά μονωμένα δοχεία, η συσκευασία τους και η αποστολή-παραλαβή τους προς και από τους αποδέκτες.



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΔΑΦΟΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
(πρώην ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΓΓΕΙΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΕΩΝ)

"Υδρογεωλογική έρευνα με χρήση σύγχρονων διαχειριστικών εργαλείων στο πλαίσιο της ποιοτικής και ποσοτικής παρακολούθησης του υπόγειου υδατικού συστήματος της υπο-λεκάνης Τυρνάβου (Θεσσαλία)".

ΦΟΡΜΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

ΟΝΟΜΑ:	
ΥΠΟΓΡΑΦΗ:	
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:	
ΩΡΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:	
ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:	
ΝΟΜΟΣ / ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ:	
ΤΟΠΩΝΥΜΙΟ ΘΕΣΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:	
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΕΥ:	
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:	
ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΛΗΨΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:	
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:	
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ:	

ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Θερμοκρασία νερού T_w : _____ °C

Οξύτητα νερού pH: _____

Ηλεκτρική αγωγιμότητα E.C.: _____ $\mu\text{S}/\text{cm} - 25^\circ\text{C}$

Διαλυμένο Οξυγόνο D.O.: _____ mg/L

Δυναμικό οξειδοαναγωγής ORP: _____ mV

Υπόγεια στάθμη νερού: _____ m

Φωτογραφίες: _____

Εικόνα Ε1.3. Φόρμα συλλογής δείγματος

5. Αποθήκευση

- Κατά τη συλλογή των δειγμάτων νερού, αυτά τοποθετούνται στα θερμικά μονωμένα δοχεία, στα οποία είναι τοποθετημένες, από το πρωί της ημέρας δειγματοληψίας, παγοκύστες, έτσι ώστε τα δείγματα να διατηρούνται σε χαμηλή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας δειγματοληψίας.

- Το συνεργείο είναι εξοπλισμένο με μικρό ηλεκτρικό ψυγείο, το οποίο τροφοδοτείται από τη μπαταρία του αυτοκινήτου (ή με πρόσθετο θερμικά μονωμένο δοχείο) και στο οποίο υπάρχουν επιπλέον παγοκύστες. Υπάρχει έτσι η δυνατότητα να εναλλάσσονται οι παγοκύστες, που έχουν υποστεί απόψυξη, κατά τη διάρκεια της ημέρας, με νέες παγωμένες παγοκύστες.

- Τόσο το ηλεκτρικό όσο και τα θερμικά μονωμένα δοχεία πολυουρεθάνης, αποφεύγεται να βρίσκονται εκτεθειμένα στον ήλιο όπως επίσης αποφεύγεται και το άσκοπο άνοιγμα και κλείσιμο των ψυγείων.

- Με το πέρας της ημέρας δειγματοληψίας, τα δείγματα που προορίζονται για το εργαστήριο φυσικοχημικών δοκιμών του Ι.Ε.Υ.Π., αποστέλλονται στον προορισμό τους με εταιρία μεταφοράς/ταχυμεταφοράς. Πριν την αποστολή ανανεώνονται εκ νέου οι παγοκύστες. Εφόσον πρόκειται για αυθυμερόν μετακίνηση ή για την τελευταία ημέρα δειγματοληψίας, τα δείγματα που προορίζονται για το εργαστήριο του Ι.Ε.Υ.Π., μεταφέρονται από το συνεργείο δειγματοληψίας στις εγκαταστάσεις του Ι.Ε.Υ.Π.

- Η συλλογή και αποστολή των δειγμάτων νερού γίνεται πάντοτε λαμβάνοντας υπόψη την εκτιμώμενη ημερομηνία άφιξης του δείγματος, η οποία θα πρέπει να είναι εργάσιμη, καθώς και τη διαθεσιμότητα δρομολογίων αποστολής της εταιρίας μεταφοράς/ταχυμεταφοράς. Βασική προϋπόθεση της αποστολής, από τη Λάρισα στη Σίνδο, είναι ο χρόνος παράδοσης να μην ξεπεράσει τις 24 ώρες από την ώρα λήψης του δείγματος

6. Συσκευασία δειγμάτων - Συνοδευτικά έγγραφα

- Τα δείγματα τοποθετούνται μέσα στα αριθμημένα θερμικά μονωμένα δοχεία πολυουρεθάνης. Στη βάση των δοχείων τοποθετείται μια στρώση από παγοκύστες τυλιγμένες με χαρτί εφημερίδας, καθώς με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ο χρόνος απόψυξης.

- Εφόσον είναι εφικτό χωροταξικά, είναι δυνατόν μεταξύ των δειγμάτων να τοποθετούνται παγοκύστες. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, οι παγοκύστες τοποθετούνται στο επάνω μέρος των ψυγείων σε στρώση.

- Κάθε θερμικά μονωμένα δοχεία πολυουρεθάνης συνοδεύεται από το «συνοδευτικό δελτίο (αποστολής-παραλαβής) δειγμάτων» (Εικόνα Ε1.4). Στο πάνω μέρος του δελτίου αυτού, συμπληρώνονται ο αριθμός του ψυγείου, τα στοιχεία του αποστολέα των δειγμάτων, η ημερομηνία και ο τρόπος αποστολής καθώς επίσης και ο ακριβής αριθμός των δειγμάτων που φέρει το συγκεκριμένο ψυγείο.

- Το δελτίο αποστολής, αφού υπογραφεί, μπαίνει μέσα σε ζελατίνα και τοποθετείται στο πάνω μέρος του δοχείου πολυουρεθάνης αμέσως πάνω από τα δείγματα ή τις παγοκύστες. Τοποθετείται το καπάκι και το δοχείο σφραγίζεται με ταινία συσκευασίας που φέρει την ένδειξη ΕΥΘΡΑΥΣΤΟ/FRAGILE. Στο εξωτερικό πάνω μέρος του κάθε ψυγείου επικολλάται με ταινία συσκευασίας ο αποστολέας και ο παραλήπτης (διεύθυνση - κινητό τηλέφωνο).



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΔΑΦΟΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
(πρώην ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΓΓΕΙΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΕΩΝ)

"Υδρογεωλογική έρευνα με χρήση σύγχρονων διαχειριστικών εργαλείων στο πλαίσιο της ποιτικής και ποσοτικής παρακολούθησης του υπόγειου υδατικού συστήματος της υπο-λεκάνης Τυρνάβου (Θεσσαλία)".

ΔΕΛΤΙΟ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Δείγματα νερού που σημειώνονται με τον κωδικό θέσης και δείγματος, την ημερομηνία και ώρα δειγματοληψίας και τα στοιχεία του προσώπου που κάνει τη δειγματοληψία.	
<u>Λεπτομέρειες για τη μεταφορά</u>	
Τα δείγματα αποστέλλονται από τον/την:	
Όνομα:	
Υπογραφή:	
Ημερομηνία:	
Αριθμός ψυγείου:	Όγκος δείγματος:
Τα δείγματα παραλαμβάνονται για το ΙΕΥΠ από τον/την:	
Όνομα:	
Υπογραφή:	
Ημερομηνία:	
<u>Βεβαίωση παραλαβής</u>	

Εικόνα Ε1. 4. Συνοδευτικό δελτίο αποστολής δειγμάτων νερού

7. Αποστολή - παραλαβή δειγμάτων

- Η αποστολή των δειγμάτων νερού γίνεται είτε με τα ΚΤΕΛ είτε με εταιρία ταχυμεταφορών. Όπως ήδη αναφέρθηκε οι πλαστικές φιάλες, που προορίζονται για το εργαστήριο του Ι.Ε.Υ.Π., είτε αποστέλλονται, είτε μεταφέρονται από το συνεργείο κατά την επιστροφή του στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου.

- Το συνεργείο δειγματοληψίας παραδίδει στα ΚΤΕΛ ή στο παράρτημα της εταιρίας τα δείγματα. Σημειώνεται ότι η αποστολή των δειγμάτων γίνεται απευθείας στη διεύθυνση του αποδέκτη (Ι.Ε.Υ.Π) και όχι σε κάποιο γραφείο της εταιρίας ταχυμεταφορών, ώστε να εξασφαλίζεται ο μικρότερος δυνατός χρόνος αποστολής.

- Ο παραλήπτης των δειγμάτων, μόλις παραλάβει τα μονωμένα δοχεία πολυουρεθάνης, ελέγχει τα δείγματα (αρτιότητα, ακριβή αριθμό) και στη συνέχεια συμπληρώνει το «δελτίο συνοδείας (αποστολής-παραλαβής) δειγμάτων» με τα δικά του στοιχεία και την ημερομηνία παραλαβής στο κάτω μέρος αυτού, ως βεβαίωση άρτιας παραλαβής.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Πίνακας Π1.16. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων ξηρής περιόδου 2016 (Σεπτέμβριος 2016)

Κωδικός γεώτρησης	Κατηγορία δείγματος	Χ	Υ	pH	EC (μS/cm)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Ολική Σκληρότητα (mg CaCO ₃ /l)	Cl (mg/l)	Σύνθετη αλκαλικότητα (CO ₃) (mg/l)	Ολική αλκαλικότητα (HCO ₃) (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	SAR	B (mg/l)	Cu (μg/l)	Fe (μg/l)	Mn (μg/l)	Pb (μg/l)	Cd (μg/l)	TDS	Ion. Bal. Error
AD2	Υπόγειο	358859	4402741	7.20	643	1.40	14.80	87.55	19.65	300	11.16	0.000	343	35.58	20.25	0.47	0.01	0.37	0.04	1.26	77.15	0.85	4.70	0.00	533.91	-2.07
AD3	Υπόγειο	353899	4407524	7.53	389	1.81	10.47	57.10	13.50	198	8.92	0.000	205	2.00	17.32	0.07	0.01	0.32	0.05	0.84	51.30	1.95	10.32	0.00	316.65	6.48
ΕΛ55	Υπόγειο	354090	4400764	7.12	744	6.72	26.69	115.65	23.00	383	33.28	0.000	323	41.25	111.74	0.46	0.01	0.59	0.11	3.07	14.96	0.77	5.34	0.00	682.29	0.86
LB81	Υπόγειο	353969	4396916	7.66	452	1.71	9.77	68.65	15.80	236	11.44	0.000	222	22.00	23.64	0.27	0.01	0.28	0.04	9.69	90.50	0.49	3.25	0.00	375.31	4.30
LB279	Υπόγειο	351793	4399197	7.49	460	1.60	8.46	72.50	13.65	237	8.92	0.000	232	12.19	21.00	0.00	0.02	0.24	0.04	3.20	96.25	1.75	1.97	0.00	370.10	5.40
SR39	Υπόγειο	354354	4402470	7.63	477	2.81	12.69	70.25	14.55	235	13.27	0.000	229	12.75	30.26	0.02	0.02	0.36	0.03	2.56	36.29	0.96	1.80	0.00	385.29	4.63
SR114	Υπόγειο	351959	4394967	7.36	510	1.30	7.96	68.35	13.70	227	8.64	0.000	276	0.68	18.09	0.09	0.01	0.23	0.03	2.20	28.25	0.00	0.97	0.00	394.89	-1.31
Λ76	Υπόγειο	352200	4396326	7.15	701	1.91	13.90	94.35	22.30	327	11.58	0.000	316	24.83	63.59	0.00	0.01	0.33	0.04	1.90	48.86	0.06	1.49	0.00	548.71	1.23
Λ41	Υπόγειο	351755	4391310	7.61	625	6.02	9.27	94.10	22.40	327	10.74	0.000	339	33.32	40.43	0.03	0.01	0.22	0.01	4.24	11.62	0.00	2.17	0.00	555.41	-0.54
Λ43	Υπόγειο	353672	4392232	7.59	796	1.71	27.70	102.75	34.10	397	21.41	0.000	332	52.19	95.11	0.05	0.01	0.60	0.03	10.25	38.28	1.35	0.65	0.00	667.24	3.12
LB84	Υπόγειο	354933	4395815	7.95	411	1.40	9.06	58.45	13.40	201	9.48	0.000	211	4.64	18.87	0.06	0.01	0.28	0.03	5.97	13.74	0.00	0.81	0.00	326.14	4.06
LB90	Υπόγειο	355006	4391983	7.58	575	1.91	17.22	72.20	22.55	273	11.79	0.000	286	32.38	21.36	0.04	0.01	0.45	0.03	0.72	3.40	0.00	0.00	0.00	465.70	1.98
LB95	Υπόγειο	356485	4394250	7.61	413	1.50	13.29	57.70	14.65	204	9.27	0.000	241	1.06	16.93	0.04	0.01	0.40	0.02	2.91	8.41	0.00	0.00	0.00	355.41	2.36
LB98	Υπόγειο	359260	4392853	7.58	509	1.71	20.85	58.65	18.40	222	13.27	0.000	201	63.13	22.96	0.05	0.01	0.61	0.07	1.71	44.99	1.12	0.02	0.00	400.01	0.60
LB250	Υπόγειο	355414	4394568	7.55	492	1.60	10.57	73.55	17.75	257	9.48	0.000	254	26.91	40.66	0.04	0.01	0.29	0.03	0.53	11.32	0.19	0.98	0.00	434.13	0.18
LB251	Υπόγειο	357309	4392001	7.53	783	1.50	28.70	97.75	39.20	406	16.36	0.000	395	54.26	49.25	0.10	0.01	0.62	0.05	24.32	8.29	6.39	0.00	0.03	682.24	3.18
LB113	Υπόγειο	359020	4395607	7.99	305	1.20	10.31	31.73	11.30	126	6.08	0.000	180	0.11	5.82	0.06	0.01	0.40	0.00	2.78	18.65	0.73	0.00	0.00	246.63	-3.33
LB115	Υπόγειο	358525	4401597	7.87	382	1.10	12.10	42.35	15.10	168	8.20	0.000	204	1.06	14.91	0.03	0.01	0.40	0.00	0.98	7.95	0.87	0.00	0.00	298.52	1.28
LB128	Υπόγειο	357461	4395980	7.58	480	1.50	10.51	66.05	16.80	234	9.83	0.000	249	8.98	29.12	0.02	0.01	0.30	0.00	2.17	6.82	1.32	0.00	0.00	391.60	1.83
LB129	Υπόγειο	356659	4397751	7.77	466	1.40	9.52	64.25	15.15	223	12.51	0.000	219	22.19	35.74	0.11	0.01	0.28	0.00	1.17	18.34	0.32	0.47	0.00	379.41	-0.44
LB131	Υπόγειο	358735	4397078	7.61	457	1.50	10.51	64.20	15.55	224	8.41	0.000	254	1.62	21.61	0.06	0.01	0.30	0.00	0.44	8.62	0.09	0.00	0.00	377.04	2.33
LB134	Υπόγειο	360230	4397842	7.46	554	1.70	17.85	70.65	21.50	265	11.10	0.000	310	6.34	24.49	0.12	0.01	0.48	0.00	4.47	11.12	0.10	0.62	0.00	463.33	1.96
LB139	Υπόγειο	357480	4400418	7.57	590	1.70	14.28	84.65	19.15	290	18.45	0.000	273	39.17	43.03	0.06	0.01	0.36	0.00	1.08	29.33	1.47	0.00	0.00	493.49	-0.07
LB140	Υπόγειο	357050	4401475	7.79	452	1.30	10.91	58.60	16.70	215	13.43	0.000	226	8.42	32.31	0.05	0.01	0.32	0.00	0.64	7.15	0.89	0.00	0.00	367.62	0.56
LB148	Υπόγειο	361220	4396735	7.61	410	1.40	18.15	42.68	17.30	178	7.63	0.000	242	5.40	10.55	0.02	0.01	0.59	0.00	12.01	5.94	0.86	0.00	0.00	344.94	-0.68
LB152	Υπόγειο	360673	4394263	7.87	349	1.30	14.87	35.90	13.90	147	8.70	0.000	179	8.60	14.72	0.03	0.01	0.53	0.00	2.48	5.85	1.21	0.00	0.00	277.00	0.55
LB257	Υπόγειο	359563	4390273	7.83	512	1.70	45.61	31.33	25.35	183	9.76	0.000	280	42.00	5.17	0.02	0.02	1.46	0.07	0.77	30.35	1.11	0.00	0.00	441.19	-1.04
LB268	Υπόγειο	362778	4392712	7.72	680	2.10	35.70	58.10	42.00	318	27.43	0.000	300	70.30	9.28	0.04	0.01	0.87	0.00	2.23	49.97	0.86	0.00	0.00	544.61	4.66
Λ53	Υπόγειο	358618	4398711	7.73	431	1.80	10.51	57.50	15.05	206	9.76	0.000	230	5.96	21.44	0.06	0.01	0.32	0.00	7.88	44.70	0.42	0.00	0.00	352.55	1.23
LB260	Υπόγειο	361210	4391683	7.61	846	2.20	36.69	83.40	47.20	403	25.73	0.000	331	134.19	56.66	0.03	0.01	0.79	0.01	0.47	7.16	0.72	0.00	0.00	717.07	-0.53
Γ3	Υπόγειο	355878	4408351	7.12	774	3.10	26.77	75.90	39.50	352	40.51	0.000	251	39.55	126.48	0.00	0.01	0.62	0.00	0.65	11.40	0.87	0.00	0.00	602.76	1.28
75Λ	Υπόγειο	350825	4397045	7.59	471	2.51	11.88	67.80	16.40	237	11.30	0.000	232	16.53	13.47	0.00	0.01	0.34	0.05	1.05	76.95	0.00	2.86	0.00	372.37	6.46
LB110	Υπόγειο	348823	4396683	7.66	361	1.71	9.47	61.50	13.45	209	9.13	0.000	214	5.40	10.49	0.36	0.01	0.28	0.05	77.19	52.85	1.75	4.62	0.03	325.59	7.15
SR110	Υπόγειο	351672	4409854	7.53	499	1.81	9.97	68.45	21.30	259	11.09	0.000	255	20.30	27.97	0.09	0.01	0.27	0.04	2.26	44.66	0.31	2.66	0.00	415.82	2.89
SR111	Υπόγειο	353494	4403890	7.66	389	1.50	7.75	70.15	12.25	226	8.28	0.000	221	0.68	20.72	0.58	0.01	0.22	0.04	5.07	37.47	0.00	1.81	0.00	342.70	8.05
SR67	Υπόγειο	347597	4398964	7.62	445	1.10	16.06	67.75	10.35	212	6.72	0.000	260	0.11	42.51	0.47	0.03	0.48	0.00	16.31	57.60	3.67	2.46	0.00	405.16	-1.35
Msp	Πηγή/Υπόγειο	352168	4408065	7.53	405	2.00	6.45	61.90	13.30	209	5.87	0.000	238	0.11	12.06	0.64	0.03	0.19	0.00	1.04	37.65	5.09	0.00	0.00	340.57	3.43
Pout	Επιφανειακό	362064	4406006	8.17	493	2.70	12.30	62.90	22.25	249	9.69	0.000	293	2.19	8.53	0.26	0.15	0.34	0.00	1.83	61.60	4.08	0.17	0.00	414.42	3.23
Pgian	Επιφανειακό	364929	4391514	8.18	518	2.50	11.90	66.10	24.15	265	9.69	0.000	313	7.47	7.68	0.28	0.17	0.32	0.00	1.62	17.82	0.95	0.00	0.00	442.47	2.06
Tin	Επιφανειακό	346816	4395476	8.41	534	2.80	14.87	76.85	19.15	271	11.88	3.948	312	26.72	12.66	0.05	0.05	0.39	0.00	0.70	44.33	4.10	0.00	0.00	480.69	-1.42
Pin	Επιφανειακό	351237	4390927	8.10	544	2.30	12.89	69.45	26.45	282	9.69	0.000	367	30.30	8.40	0.64	0.18	0.33	0.00	1.36	85.45	2.66	0.00	0.00	527.47	-5.42
Pgyr	Επιφανειακό	365527	4400464	8.23	528	2.80	15.87	65.90	24.75	266	11.31	0.000	345	17.66	9.84	0.54	0.17	0.42	0.00	1.60	63.10	2.78	0.00	0.00	493.96	-2.79

Πίνακας Π1.17. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων υγρής περιόδου 2017 (Απρίλιος-Μάιος 2017)

Κωδικός χειρής	Κατηγορία δείγματος	Χ	Υ	pH	EC (μS/cm)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Ολική Σκληρότητα (mg CaCO ₃ /l)	Cl (mg/l)	Σύνθετη αλκαλικότητα (CO ₃) (mg/l)	Ολική αλκαλικότητα (HCO ₃) (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	SAR	B (mg/l)	Cu (μg/l)	Fe (μg/l)	Mn (μg/l)	Pb (μg/l)	Cd (μg/l)	TDS	Ion. Bal. Error
AD2	Υπόγειο	358859	4402741	7.18	608	1.30	13.75	98.40	19.30	325	9.31	0.00	327	2.57	23.40	0.04	0.01	0.33	0.21	5.08	6.58	0.21	0.22	0.00	495	-8.23
AD3	Υπόγειο	353899	4407524	7.45	407	1.70	12.16	63.05	14.20	216	8.40	0.00	216	0.49	16.30	0.19	0.01	0.36	0.20	1.51	10.92	0.00	0.00	0.00	333	-9.44
LB84	Υπόγειο	354933	4395815	7.78	344	1.20	9.00	59.10	12.95	201	7.27	0.00	190	0.30	11.39	0.01	0.01	0.28	0.02	7.70	76.24	1.54	0.00	0.00	291	-9.74
LB90	Υπόγειο	355006	4391983	7.50	668	1.90	22.74	92.70	26.85	342	13.91	0.00	311	51.62	58.55	0.00	0.01	0.53	0.00	1.00	25.10	1.52	0.00	0.00	580	-2.33
LB95	Υπόγειο	356485	4394250	7.68	418	1.40	12.65	63.55	15.05	221	8.55	0.00	230	0.49	17.46	0.00	0.01	0.37	0.00	1.24	7.51	0.00	0.00	0.00	349	-7.49
LB98	Υπόγειο	359260	4392853	7.64	431	1.50	17.99	56.90	16.50	210	10.66	0.00	191	44.08	16.88	0.00	0.01	0.54	0.02	1.39	35.26	0.00	0.00	0.00	355	-4.14
LB251	Υπόγειο	357309	4392001	7.56	593	3.50	25.70	76.75	23.50	288	16.03	0.00	285	34.45	31.84	0.00	0.06	0.66	0.04	2.04	47.44	25.82	0.00	0.00	497	-4.63
L41	Υπόγειο	351755	4391310	7.48	681	6.40	9.59	105.50	27.00	375	10.95	0.00	338	23.70	51.62	0.34	0.01	0.21	0.02	4.49	52.60	1.62	0.00	0.00	573	-5.99
LB81	Υπόγειο	353969	4396916	7.71	452	1.60	9.54	68.05	16.30	237	11.19	0.00	242	26.04	23.56	0.20	0.01	0.27	0.00	1.13	33.70	0.39	0.51	0.00	398	-0.03
LB250	Υπόγειο	355414	4394568	7.81	537	1.70	10.24	79.75	18.70	276	9.26	0.00	260	12.00	42.32	0.39	0.01	0.27	0.00	10.91	5.04	0.77	0.00	0.00	434	-5.05
LB279	Υπόγειο	351793	4399197	7.68	450	1.70	8.45	74.45	14.20	244	8.91	0.00	246	18.79	21.16	0.45	0.01	0.23	0.00	7.18	21.98	0.95	0.29	0.00	394	-2.98
L43	Υπόγειο	353672	4392232	7.48	810	1.70	28.82	109.30	31.60	403	22.02	0.00	326	57.85	97.40	0.28	0.01	0.62	0.01	3.54	33.86	2.42	0.00	0.00	675	-3.47
L76	Υπόγειο	352200	4396326	7.06	763	1.90	15.21	121.00	25.15	406	12.33	0.00	284	42.75	82.66	0.16	0.01	0.33	0.00	2.31	19.75	0.10	0.00	0.00	585	-9.01
75A	Υπόγειο	350825	4397045	7.61	472	2.30	11.33	69.10	16.95	242	11.47	0.00	233	22.75	14.73	0.07	0.01	0.32	0.01	0.98	26.04	0.20	2.11	0.00	382	-5.23
SR39	Υπόγειο	354354	4402470	7.58	471	2.80	10.43	72.50	14.95	243	10.48	0.00	245	16.72	30.34	0.26	0.02	0.29	0.02	1.57	47.53	2.38	0.00	0.00	404	-2.21
SR114	Υπόγειο	351959	4394967	7.18	536	1.30	7.65	98.35	14.65	306	7.98	0.00	299	2.57	20.61	0.20	0.01	0.19	0.00	1.59	26.65	0.05	0.00	0.00	452	-8.19
EA55	Υπόγειο	354090	4400764	7.23	848	7.60	27.33	123.15	24.80	410	31.14	0.00	346	24.83	86.76	0.12	0.01	0.59	0.08	4.45	23.68	0.74	7.15	0.00	672	-6.14
LB260	Υπόγειο	361210	4391683	7.54	894	2.40	40.75	91.55	54.60	453	31.14	0.00	344	127.02	56.26	0.27	0.02	0.83	0.06	0.51	41.15	10.71	0.00	0.03	748	-4.02
LB139	Υπόγειο	357480	4400418	7.61	581	1.90	12.82	92.00	19.25	309	17.96	0.00	261	31.06	41.53	0.11	0.01	0.32	0.00	0.44	37.66	5.67	0.00	0.00	477	-5.38
LB268	Υπόγειο	362778	4392712	7.57	585	1.90	30.31	57.80	31.10	272	25.01	0.00	246	66.34	13.72	0.08	0.01	0.80	0.03	0.49	17.97	1.15	0.00	0.00	472	-3.61
LB148	Υπόγειο	361220	4396735	7.51	401	1.40	16.10	53.60	17.45	206	7.55	0.00	223	3.70	10.42	0.28	0.01	0.49	0.01	21.53	30.35	4.89	0.40	0.00	333	-8.39
LB129	Υπόγειο	356659	4397751	7.62	472	1.50	9.54	75.15	16.00	254	11.54	0.00	213	28.04	46.10	0.25	0.01	0.26	0.00	0.81	25.86	1.82	0.00	0.00	401	-3.70
LB134	Υπόγειο	360230	4397842	7.35	586	1.80	17.29	86.35	23.00	310	11.40	0.00	316	25.21	34.67	0.15	0.02	0.43	0.01	6.99	54.93	2.67	0.00	0.00	516	-3.17
LB113	Υπόγειο	359020	4395607	7.78	591	1.20	10.24	36.65	11.50	139	5.70	0.00	175	0.68	6.82	0.32	0.01	0.38	0.00	2.13	16.92	1.44	0.00	0.00	248	-1.92
LB115	Υπόγειο	358525	4401597	7.69	387	1.20	11.93	59.50	14.85	210	8.34	0.00	207	2.75	8.23	0.26	0.01	0.36	0.00	1.06	22.94	4.25	0.00	0.09	314	-9.98
LB131	Υπόγειο	358735	4397078	7.61	458	1.70	10.43	73.90	15.90	250	8.27	0.00	240	17.28	25.26	0.32	0.01	0.29	0.00	0.49	24.34	0.48	0.00	0.00	394	-5.45
Γ3	Υπόγειο	355878	4408351	6.78	912	3.40	24.75	100.65	46.20	442	52.24	0.00	282	48.04	161.94	0.27	0.01	0.51	0.01	0.40	19.55	1.39	0.00	0.00	720	-1.48
SR01	Υπόγειο	358648	4406749	7.59	401	2.60	14.91	55.10	14.75	198	14.25	0.00	177	21.43	31.52	0.08	0.01	0.46	0.00	7.82	50.33	2.00	0.00	0.00	331	-4.82
FAKAS-1	Υπόγειο	357694	4404073	7.20	749	1.80	19.38	82.25	52.35	421	8.12	0.00	481	43.70	6.38	0.93	0.13	0.41	0.03	0.63	36.47	170.00	0.00	0.00	697	-1.19
KARAIKOS-1	Υπόγειο	362992	4399220	7.70	329	1.00	22.06	23.84	15.40	123	4.49	0.00	204	4.83	2.29	1.00	0.03	0.86	0.02	4.22	113.25	181.00	0.00	0.00	279	1.46
MPAKRATSAS	Υπόγειο	364069	4397911	7.89	253	1.40	28.82	14.66	8.10	70.0	4.77	0.00	151	2.38	4.79	0.15	0.03	1.49	0.00	0.59	36.55	6.50	0.00	0.00	216	0.71
LB128	Υπόγειο	357461	4395980	7.74	453	1.50	10.09	69.85	16.30	242	10.18	0.00	239	3.70	23.21	0.02	0.01	0.28	0.04	8.38	23.99	1.59	0.46	0.00	374	-6.49
LB140	Υπόγειο	357050	4401475	7.88	480	1.40	12.54	68.25	18.55	247	16.40	0.00	215	2.19	36.45	0.09	0.01	0.35	0.04	0.30	6.25	2.85	0.00	0.00	371	-8.83
LB152	Υπόγειο	360673	4394263	7.94	343	1.50	19.10	39.98	12.85	153	9.12	0.00	167	16.15	14.55	0.04	0.01	0.67	0.05	0.30	8.97	1.99	0.00	0.00	280	-4.90
LB257	Υπόγειο	359563	4390273	7.66	516	1.70	42.12	37.85	28.40	211	10.18	0.00	260	46.91	4.84	0.09	0.01	1.25	0.15	0.36	42.90	1.82	0.00	0.00	433	-4.23
L53	Υπόγειο	358618	4398711	7.67	367	1.40	9.60	57.65	13.50	200	8.55	0.00	192	0.49	16.24	0.02	0.01	0.29	0.04	0.32	43.39	0.64	0.00	0.00	299	9.01
LB110	Υπόγειο	348823	4396683	7.52	473	2.10	10.34	67.45	15.85	234	10.55	0.00	245	5.02	13.43	0.30	0.01	0.29	0.00	1.34	0.00	0.47	0.00	0.00	370	-5.68
SR110	Υπόγειο	351672	4409854	7.57	513	1.60	9.67	75.50	22.45	281	10.58	0.00	270	1.06	26.20	0.03	0.01	0.25	0.20	1.67	16.12	1.24	0.00	0.02	417	-8.15
SR111	Υπόγειο	353494	4403890	7.27	474	1.50	7.65	84.30	12.85	263	9.34	0.00	237	20.68	22.62	0.14	0.01	0.20	0.01	0.88	17.26	3.58	0.00	0.00	396	-6.65
LB214	Υπόγειο	370643	4394774	8.10	698	1.80	112.12	20.26	16.30	118	18.98	0.00	415	0.49	0.80	4.76	0.03	4.48	0.65	1.79	22.97	39.80	0.00	0.00	590	-1.21
LB237	Υπόγειο	367422	4400628	7.50	1027	1.60	92.19	70.35	48.60	376	33.37	0.00	166	306.23	3.04	0.94	0.04	2.06	0.78	1.74	3.34	15.57	0.00	0.00	722	-7.06
LB271	Υπόγειο	367440	4400596	7.91	680	1.10	74.75	33.13	24.30	183	24.34	0.00	122	164.00	0.00	0.72	0.01	2.40	0.68	1.31	21.08	36.92	0.00	0.00	445	-6.62
SR112	Υπόγειο	349021	4399881	7.53	436	1.80	8.82	73.40	14.90	245	8.77	0.00	224	18.23	16.05	0.03	0.01	0.24	0.04	0.35	5.46	1.11	1.80	0.00	366	-7.65
MSp	Πηγή/Υπόγειο	352168	4408065	7.46	435	1.40	6.88	76.75	13.25	246	6.77	0.00	239	0.11	13.77	0.34	0.01	0.19	0.21	1.13	7.71	0.00	0.00	0.00	358	-9.89
Pin	Επιφανειακό	351237	4390927	7.90	561	1.60	12.56	83.85	25.05	313	10.37	0.00	318	2.75	8.34	0.82	0.08	0.31	0.23	1.33	9.64	3.94	0.00	0.00	463	-9.41
Pgian	Επιφανειακό	364929	4391514	7.92	568	2.00	14.35	83.50	25.45	313	12.14	0.00	311	19.55	7.68	1.82	0.14	0.35	0.22	1.44	29.24	0.57	0.00	0.00	478	-8.11
Pgyr	Επιφανειακό	365527	4400464	7.91	562	1.90	13.58	82.80	25.40	311	11.01	0.00	309	18.23	8.49</											

Πίνακας Π1.18. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων ξηρής περιόδου 2017 (Σεπτέμβριος 2017)

Κωδικός γεώτρησης	Κατηγορία δείγματος	X	Y	pH	EC (μS/cm)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Ολική Σκληρότητα (mg CaCO ₃ /L)	Cl (mg/l)	Σύνθετη αλκαλικότητα (CO ₃) (mg/l)	Ολική αλκαλικότητα (HCO ₃) (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	SAR	B (mg/l)	Cu (μg/l)	Fe (μg/l)	Mn (μg/l)	Pb (μg/l)	Cd (μg/l)	TDS	Ion. Bal. Error
LB113	Υπόγειο	359020	4395607	7.60	300	1.30	10.39	30.30	10.00	117	5.94	0.000	162	1.06	6.18	0.03	0.01	0.42	0.00	0.56	45.89	2.06	0.01	0.01	228	2.25
LB115	Υπόγειο	358525	4401597	7.72	395	1.20	12.96	42.10	14.45	165	9.06	0.000	198	1.25	15.78	0.03	0.01	0.44	0.00	0.50	24.37	6.94	0.00	0.06	295	-1.38
LB128	Υπόγειο	357461	4395980	7.45	484	1.50	10.49	71.70	16.20	246	10.47	0.000	239	1.62	29.79	0.00	0.01	0.29	0.00	0.96	27.70	0.56	0.06	0.02	381	-6.70
LB129	Υπόγειο	356659	4397751	7.59	477	1.60	9.46	69.60	15.00	236	12.45	0.000	210	2.19	38.77	0.02	0.01	0.27	0.00	0.35	8.61	0.17	0.00	0.01	360	-7.17
LB131	Υπόγειο	358735	4397078	7.56	415	1.40	10.08	59.60	13.45	204	7.50	0.000	215	0.11	16.62	0.05	0.01	0.31	0.00	0.00	12.26	0.24	0.00	0.00	324	-6.50
LB139	Υπόγειο	357480	4400418	7.79	573	1.70	13.17	85.30	17.90	287	19.46	0.000	250	31.25	39.32	0.03	0.01	0.34	0.00	0.00	9.16	0.01	0.00	0.03	458	-3.36
LB140	Υπόγειο	357050	4401475	7.57	478	1.40	12.55	62.75	17.00	227	16.06	0.000	215	1.25	39.64	0.02	0.01	0.36	0.00	0.00	6.55	0.00	0.00	0.02	365	-4.87
LB152	Υπόγειο	360673	4394263	7.88	310	1.30	25.61	25.13	9.35	101	5.94	0.000	170	0.68	6.94	0.02	0.01	1.10	0.04	2.83	12.43	0.10	0.02	0.01	245	-1.49
LB257	Υπόγειο	359563	4390273	7.95	599	1.70	72.01	24.22	27.00	172	13.30	0.000	284	12.19	8.09	0.38	0.07	2.38	0.21	0.00	5.88	0.25	0.00	0.01	443	-9.99
LB260	Υπόγειο	361210	4391683	7.46	891	2.20	37.55	86.80	57.15	452	28.66	0.000	324	155.32	58.16	0.30	0.01	0.77	0.05	0.00	12.69	0.80	0.00	0.05	750	-2.12
LB268	Υπόγειο	362778	4392712	7.70	703	2.20	36.52	62.85	50.80	366	29.58	0.000	283	105.40	10.47	0.00	0.01	0.83	0.02	6.69	11.27	2.57	0.00	0.02	581	-6.68
Λ53	Υπόγειο	358618	4398711	7.79	347	1.50	9.16	50.85	12.30	178	8.99	0.000	184	0.68	16.44	0.01	0.01	0.30	0.00	22.29	3.33	0.01	0.00	0.01	284	-5.76
LB134	Υπόγειο	360230	4397842	7.59	541	1.70	16.97	72.45	20.15	264	11.11	0.000	291	0.68	25.18	0.02	0.01	0.45	0.00	1.89	17.99	0.27	0.00	0.01	440	-4.74
FAKAS-1	Υπόγειο	357694	4404073	7.51	833	3.50	21.29	88.40	46.50	412	8.92	0.000	540	2.57	2.15	15.57	0.04	0.45	0.08	0.00	126.35	99.09	0.00	0.00	729	-4.77
KARAIΣKOS-1	Υπόγειο	362992	4399220	7.59	400	0.60	25.31	28.58	20.55	156	4.67	0.000	253	0.30	0.87	2.99	0.02	0.88	0.06	0.00	37.76	165.90	0.00	0.01	337	-1.09
LB84	Υπόγειο	354933	4395815	7.66	405	1.30	8.80	60.20	12.80	203	9.73	0.000	215	2.38	17.02	0.05	0.01	0.27	0.03	0.00	22.52	1.72	0.00	0.00	327	-4.15
LB90	Υπόγειο	355006	4391983	7.75	570	1.80	17.79	77.40	22.00	284	11.62	0.000	292	45.77	22.89	0.03	0.01	0.46	0.03	0.12	17.90	0.99	0.00	0.02	491	-0.45
LB95	Υπόγειο	356485	4394250	7.64	434	1.40	13.35	60.40	14.30	210	8.82	0.000	232	0.68	20.72	0.01	0.01	0.40	0.04	0.01	18.63	0.36	0.00	0.03	352	-4.41
LB98	Υπόγειο	359260	4392853	7.58	483	1.60	21.06	61.15	17.40	224	12.39	0.000	197	57.28	26.32	0.07	0.01	0.61	0.06	0.02	16.09	0.09	0.00	0.00	395	-2.28
LB251	Υπόγειο	357309	4392001	7.72	582	1.70	25.70	73.05	21.55	271	15.40	0.000	279	45.40	27.34	0.03	0.01	0.68	0.06	0.00	10.03	0.04	0.00	0.01	489	-1.46
Λ41	Υπόγειο	351755	4391310	7.39	643	5.80	8.90	99.20	21.75	337	10.43	0.000	332	29.17	39.48	0.17	0.01	0.21	0.02	53.70	27.55	0.27	0.00	0.01	547	-2.08
Γ3	Υπόγειο	355878	4408351	7.06	870	3.40	24.02	81.50	44.25	386	46.83	0.000	268	52.38	150.04	0.00	0.01	0.53	0.05	6.85	24.42	2.55	0.00	0.02	670	2.10
SR01	Υπόγειο	358648	4406749	7.54	313	2.20	14.83	28.60	10.90	116	10.36	0.000	150	0.49	12.88	0.03	0.01	0.60	0.01	0.37	9.98	0.19	0.12	0.02	230	-0.99
AD3	Υπόγειο	353899	4407524	7.41	351	3.10	10.08	38.48	12.20	146	9.94	0.000	193	1.25	1.32	0.25	0.07	0.36	0.04	0.00	23.25	300.40	0.00	0.00	270	0.62
LB81	Υπόγειο	353969	4396916	7.69	471	1.60	9.80	68.30	15.60	235	10.98	0.000	244	4.08	26.60	0.00	0.01	0.28	0.00	0.19	29.54	1.36	0.00	0.01	381	-3.35
LB110	Υπόγειο	348823	4396683	7.53	465	2.00	10.20	68.10	15.15	232	10.14	0.000	238	20.87	14.13	0.00	0.01	0.29	0.00	12.25	18.58	1.76	0.01	0.03	378	-2.96
LB250	Υπόγειο	355414	4394568	7.49	549	1.70	13.64	80.30	18.05	275	9.72	0.000	263	32.00	43.18	0.03	0.01	0.36	0.00	0.04	19.90	0.29	0.00	0.02	461	-1.57
LB279	Υπόγειο	351793	4399197	7.39	467	1.70	8.69	71.95	13.30	234	8.74	0.000	245	5.96	22.72	0.00	0.01	0.25	0.00	15.75	19.78	1.67	0.38	0.03	378	-3.63
SR39	Υπόγειο	354354	4402470	7.39	500	2.70	13.13	71.70	14.85	240	14.27	0.000	243	11.62	34.32	0.00	0.01	0.37	0.02	14.28	124.40	4.39	2.65	0.04	406	-2.43
SR114	Υπόγειο	351959	4394967	7.33	518	1.30	7.88	86.80	13.30	272	7.62	0.000	290	3.32	18.77	0.00	0.01	0.21	0.00	1.54	14.68	1.28	0.00	0.00	429	-4.21
AD2	Υπόγειο	358859	4402741	7.19	622	1.40	13.33	97.90	19.00	323	10.35	0.000	337	2.19	16.97	0.00	0.01	0.32	0.05	0.03	18.51	0.84	0.00	0.02	499	-7.00
ΕΛ55	Υπόγειο	354090	4400764	7.23	868	6.80	29.29	120.05	24.00	399	32.31	0.000	351	45.02	114.11	0.02	0.01	0.64	0.09	4.21	25.53	0.76	0.00	0.02	723	0.15
75Λ	Υπόγειο	350825	4397045	7.63	474	3.30	11.82	67.00	16.00	233	11.54	0.000	236	30.87	15.01	0.00	0.01	0.34	0.00	0.09	20.76	0.15	0.16	0.02	392	-1.69
Λ76	Υπόγειο	352200	4396326	6.82	648	1.80	13.64	96.85	20.20	325	10.49	0.000	315	36.53	55.56	0.00	0.01	0.33	0.00	0.18	10.69	0.03	0.00	0.02	550	-0.10
SR110	Υπόγειο	351672	4409854	7.58	495	1.80	9.59	64.10	21.40	248	10.78	0.000	269	0.68	28.64	0.00	0.01	0.26	0.02	2.17	15.59	0.32	0.30	0.04	406	-2.21
SR111	Υπόγειο	353494	4403890	7.53	439	1.60	7.71	68.65	12.30	222	9.03	0.000	232	2.57	22.14	0.07	0.03	0.22	0.04	1.72	15.45	6.00	0.00	0.02	356	-3.84
LB213	Υπόγειο	370643	4394774	7.94	1821	1.90	286.69	62.20	44.30	338	88.62	0.000	285	604.34	1.43	0.04	0.02	6.76	1.25	0.50	100.85	55.30	0.00	0.00	1375	1.30
ΕΛ47	Υπόγειο	368206	4391323	7.77	743	0.40	103.80	22.41	26.85	167	37.10	0.000	369	45.77	3.49	0.14	0.04	3.48	0.16	0.47	9.82	22.12	0.00	0.00	609	1.48
SR112	Υπόγειο	349021	4399881	7.63	444	1.80	8.99	65.15	14.15	221	8.74	0.000	238	6.72	17.10	0.02	0.01	0.26	0.00	1.73	11.62	0.00	0.11	0.01	361	-3.12
LB271	Υπόγειο	367440	4400596	7.94	665	1.20	70.98	32.20	21.95	171	23.21	0.000	118	229.53	0.65	0.68	0.08	2.35	0.52	0.41	8.36	41.77	0.00	0.00	499	5.82
MSp	Πηγή/Υπόγειο	352168	4408065	7.67	401	1.80	7.22	58.35	15.80	211	6.37	0.000	243	0.49	6.90	0.11	0.16	0.22	0.06	0.24	54.70	10.18	0.00	0.01	340	-3.27
Pin	Επιφανειακό	351237	4390927	8.04	483	2.20	16.91	62.15	20.65	240	13.30	0.000	266	4.08	2.78	0.02	0.03	0.47	0.06	2.95	97.35	8.68	0.00	0.01	388	-6.99
Pout	Επιφανειακό	362064	4406006	8.20	610	6.60	40.53	41.35	30.50	229	36.47	0.000	270	59.92	1.38	0.07	0.02	1.16	0.11	0.92	21.88	3.10	0.00	0.01	487	1.65
Pgian	Επιφανειακό	364929	4391514	8.16	475	2.80	16.61	59.00	21.40	235	13.37	0.000	266	24.83	1.82	0.25	0.04	0.47	0.05	1.05	11.85	0.63	0.00	0.02	406	-2.14
Pgyr	Επιφανειακό	365527	4400464	8.15	389	3.40	15.42	33.80	19.25	164	12.74	0.000	202	24.83	1.14	0.03	0.02	0.52	0.06	1.12	34.16	0.52	0.00	0.00	313	2.20

Πίνακας Π1.19. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων υγρής περιόδου 2018 (Μάιος 2018)

Κωδικός γεώτρησης	Κατηγορία δείγματος	X	Y	pH	EC (μS/cm)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Ολική Σκληρότητα (mg CaCO ₃ /L)	Cl (mg/l)	Σύνθετη αλκαλικότητα (CO ₃) (mg/l)	Ολική αλκαλικότητα (HCO ₃) (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	SAR	B (mg/l)	Cu (μg/l)	Fe (μg/l)	Mn (μg/l)	Pb (μg/l)	Cd (μg/l)	TDS	Ion. Bal. Error	As (μg/l)	Zn (mg/l)
AD2	Υπόγειο	358859	4402741	7.01	623	1.30	12.32	97.85	19.35	324	13.39	0.00	316	12.75	22.86	0.27	0.01	0.30	0.00	0.07	11.27	0.83	0.27	0.14	496	-6.52	1.30	0.00
AD3	Υπόγειο	353899	4407524	7.34	409	1.80	10.42	57.00	13.30	197	9.16	0.00	208	0.11	16.55	0.20	0.01	0.32	0.00	0.00	18.89	4.42	0.10	0.14	317	-6.10	3.03	0.00
Γ3	Υπόγειο	355878	4408351	6.71	906	3.50	24.04	92.90	48.20	430	48.14	0.00	258	44.83	143.03	0.46	0.01	0.50	0.00	0.90	26.66	0.99	0.09	0.17	663	-5.07	0.86	0.00
SR01	Υπόγειο	358648	4406749	7.61	300	2.10	12.92	25.50	10.15	105	9.73	0.00	143	1.43	10.01	0.10	0.01	0.55	0.00	4.24	5.62	0.18	0.14	0.13	215	1.53	0.00	0.00
LB81	Υπόγειο	353969	4396916	7.62	485	1.80	9.86	71.05	15.90	243	11.49	0.00	239	23.22	22.46	0.06	0.01	0.27	1.03	0.00	3.41	0.02	0.00	0.14	395	-2.28	0.46	0.00
LB110	Υπόγειο	348823	4396683	7.49	437	2.00	9.96	63.40	13.90	216	9.87	0.00	228	22.67	11.76	0.07	0.01	0.29	0.00	6.10	2.27	1.20	0.13	0.24	362	-1.18	1.64	0.00
LB279	Υπόγειο	351793	4399197	7.44	479	1.70	8.85	75.20	13.70	244	9.30	0.00	248	3.40	14.40	0.12	0.01	0.25	0.00	0.25	8.24	0.88	0.00	0.16	375	-6.89	1.92	0.00
SR39	Υπόγειο	354354	4402470	7.74	475	2.80	11.47	70.55	14.30	235	10.92	0.00	236	3.40	28.09	0.04	0.02	0.32	0.00	30.54	17.23	2.14	0.45	0.13	378	-5.64	3.17	0.00
SR114	Υπόγειο	351959	4394967	7.73	543	1.30	8.05	83.80	13.60	265	8.11	0.00	311	3.58	20.65	0.02	0.01	0.21	0.00	1.84	32.69	0.16	0.00	0.13	450	0.39	0.72	0.00
75Λ	Υπόγειο	350825	4397045	7.52	478	2.40	12.07	66.65	16.05	233	12.05	0.00	251	16.67	14.41	0.06	0.01	0.34	0.00	2.79	3.74	0.03	0.07	0.15	392	-1.94	1.70	0.00
Λ76	Υπόγειο	352200	4396326	7.19	716	2.00	14.48	108.20	22.30	362	11.98	0.00	337	39.58	64.70	0.06	0.01	0.33	0.00	1.42	5.64	0.10	0.00	0.14	601	-1.17	0.04	0.00
EA55	Υπόγειο	354090	4400764	7.38	855	7.70	25.95	121.75	23.55	401	31.36	0.00	304	37.95	101.97	0.09	0.01	0.56	0.07	2.37	9.64	2.40	0.00	0.20	655	-5.86	0.95	0.00
FAKAS-1	Υπόγειο	357694	4404073	7.19	558	1.60	20.52	64.25	30.80	287	9.30	0.00	340	29.04	7.15	0.78	0.13	0.52	0.02	6.42	33.51	0.00	0.00	0.19	504	-1.20	2.37	0.00
Λ41	Υπόγειο	351755	4391310	7.34	616	5.70	9.40	97.75	18.05	318	9.59	0.00	351	25.22	30.73	0.05	0.01	0.23	0.05	0.21	2.42	0.76	0.00	0.17	548	0.91	1.98	0.00
Λ43	Υπόγειο	353672	4392232	7.75	794	1.70	27.51	105.15	30.50	388	20.93	0.00	343	53.04	95.19	0.03	0.01	0.61	0.05	7.81	15.53	1.24	0.00	0.16	677	-0.79	1.02	0.00
LB84	Υπόγειο	354933	4395815	7.69	389	1.40	9.40	56.80	12.65	194	8.05	0.00	218	5.22	13.37	0.00	0.01	0.29	0.04	1.05	6.71	0.29	0.00	0.20	325	-2.36	0.74	0.00
LB90	Υπόγειο	355006	4391983	7.65	616	1.90	18.91	81.90	23.80	303	12.32	0.00	316	46.67	32.86	0.09	0.01	0.47	0.04	0.16	15.18	0.15	0.00	0.20	535	0.79	1.52	0.00
LB98	Υπόγειο	359260	4392853	7.61	454	1.60	20.41	54.35	16.30	203	11.13	0.00	211	43.76	21.12	0.02	0.01	0.62	0.07	0.57	7.30	0.18	0.00	0.16	379	0.33	0.23	0.00
LB250	Υπόγειο	355414	4394568	7.54	592	1.80	12.31	88.35	20.20	304	10.29	0.00	302	28.67	47.52	0.00	0.01	0.31	0.05	1.54	12.24	0.23	0.00	0.19	511	-0.33	0.00	0.00
LB251	Υπόγειο	357309	4392001	7.51	514	1.70	20.41	63.05	19.05	236	13.58	0.00	256	37.76	24.19	0.00	0.01	0.58	0.06	0.38	7.71	0.26	0.00	0.19	436	0.95	2.46	0.00
LB113	Υπόγειο	359020	4395607	7.78	304	1.30	11.86	37.65	10.60	138	5.90	0.00	167	2.85	6.32	0.11	0.00	0.44	0.01	1.30	36.39	1.37	0.72	0.14	244	-3.66	2.06	0.00
LB115	Υπόγειο	358525	4401597	7.74	420	1.30	12.75	54.90	15.00	199	8.89	0.00	223	2.85	13.05	0.18	0.00	0.39	0.02	1.19	19.27	1.98	0.30	0.13	332	-4.57	3.18	0.00
LB129	Υπόγειο	356659	4397751	7.70	447	1.50	9.79	63.80	14.60	219	12.08	0.00	206	2.85	36.49	0.04	0.01	0.29	0.00	0.22	7.79	0.00	0.00	0.25	347	-5.36	1.20	0.00
LB131	Υπόγειο	358735	4397078	7.71	451	1.60	11.57	63.20	14.85	219	8.47	0.00	237	3.95	21.75	0.02	0.01	0.34	0.00	0.00	13.76	0.00	0.00	0.09	362	-3.87	2.60	0.00
LB134	Υπόγειο	360230	4397842	7.55	516	1.70	16.61	66.80	20.00	249	10.14	0.00	274	3.40	23.52	0.04	0.01	0.46	0.01	0.00	6.11	0.00	0.00	0.04	416	-4.72	2.47	0.00
LB139	Υπόγειο	357480	4400418	7.50	579	1.80	14.33	82.20	18.25	280	20.00	0.00	255	3.04	37.04	0.14	0.01	0.37	0.00	0.10	7.49	0.00	0.00	0.05	431	-7.56	2.41	0.00
LB152	Υπόγειο	360673	4394263	7.96	305	1.40	27.68	24.85	8.65	98	6.04	0.00	158	3.22	7.20	0.17	0.01	1.21	0.04	0.00	5.28	0.00	0.00	0.07	238	-4.11	4.22	0.00
Λ53	Υπόγειο	358618	4398711	7.71	393	1.60	11.57	53.00	13.15	186	9.24	0.00	205	2.85	19.24	0.06	0.01	0.37	0.01	0.00	9.11	0.00	0.00	0.02	316	-3.45	1.08	0.00
KARAIKOS-1	Υπόγειο	362992	4399220	7.67	372	0.90	23.73	35.05	14.75	148	5.21	0.00	232	3.04	0.32	1.04	0.01	0.84	0.03	0.28	37.22	105.60	0.00	0.04	316	-0.66	1.76	0.00
LB214	Υπόγειο	370643	4394774	7.83	528	0.80	82.12	13.56	12.25	84	7.61	0.00	335	1.81	0.47	2.53	0.02	3.87	0.21	0.50	37.87	37.92	0.00	0.14	456	3.00	2.98	0.00
LB271	Υπόγειο	367440	4400596	7.79	668	1.10	66.10	29.90	22.00	165	24.32	0.00	116	212.55	0.00	1.18	0.02	2.23	0.48	0.00	33.93	53.35	0.00	0.14	473	5.60	2.52	0.00
SR112	Υπόγειο	349021	4399881	7.54	444	1.90	9.30	65.50	14.35	223	8.75	0.00	245	24.31	15.19	0.00	0.01	0.27	0.06	0.01	2.61	0.70	0.00	0.16	384	1.12	1.61	0.00
SR110	Υπόγειο	351672	4409854	7.33	523	1.80	9.81	67.20	20.70	253	10.36	0.00	257	0.30	28.82	0.45	0.01	0.27	0.00	6.28	25.41	1.97	0.96	0.43	397	-5.50	1.49	0.00
SR111	Υπόγειο	353494	4403890	7.31	471	1.60	7.81	75.40	12.40	239	9.94	0.00	224	20.68	26.04	0.13	0.01	0.22	0.00	3.59	6.28	0.54	0.00	0.15	378	-3.74	0.55	0.00
MSp	Πηγή/Υπόγειο	352168	4408065	7.27	444	1.50	6.91	70.95	11.95	226	6.84	0.00	226	0.11	15.00	0.12	0.01	0.20	0.00	0.00	13.49	0.19	0.00	0.13	340	-8.05	0.20	0.00
Ag,Anna	Πηγή/Υπόγειο	354598	4403924	7.40	442	1.70	7.91	66.50	12.95	219	8.95	0.00	226	0.68	18.63	0.12	0.01	0.23	0.00	0.00	0.81	0.36	0.00	0.13	343	-5.60	2.71	0.00
Pin	Επιφανειακό	351237	4390927	7.82	564	1.80	10.22	77.05	24.25	292	9.73	0.00	296	15.77	8.77	0.42	0.14	0.26	0.07	0.27	14.49	0.79	0.00	0.13	444	-6.31	0.28	0.00
Pout	Επιφανειακό	362064	4406006	7.99	557	2.00	10.22	77.10	23.40	289	10.15	0.00	295	4.83	9.76	0.27	0.08	0.26	0.00	2.05	7.51	0.30	0.00	0.13	433	-7.77	0.68	0.00
Tout	Επιφανειακό	360578	4404963	8.25	455	2.90	15.02	51.60	20.45	213	14.17	0.00	230	4.83	1.15	0.23	0.02	0.45	0.02	10.58	40.85	27.26	0.00	0.15	340	-7.65	1.63	0.00
Tin	Επιφανειακό	350794	4397164	8.60	466	2.90	12.32	64.45	17.50	233	12.83	10.53	230	2.00	9.11	0.15	0.07	0.35	0.01	0.35	8.23	1.32	0.00	0.13	362	-9.00	0.00	0.00
Pgian	Επιφανειακό	364929	4391514	7.85	564	2.00	12.42	71.85	22.40	272	10.57	0.00	315	18.79	8.61	0.69	0.13	0.33	0.00	0.11	5.21	1.15	0.00	0.13	462	-0.54	2.16	0.00
Pgyr	Επιφανειακό	365527	4400464	7.87	558	1.90	10.22	77.55	24.00	292	9.87	0.00	321	1.62	8.65	0.42	0.09	0.26	0.00	0.35	7.60	0.34	0.00	0.14	455	-5.42	0.00	0.00

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΡοS

Πίνακας Π1.20. Παράμετροι υπολογισμού του δείκτη ΡοS και υπολογισμός Q_f αναφοράς

Τάξη τοξικότητας	Παράμετρος	Βαθμός	P-class	ps	w	Τιμή αναφοράς (μg/L)	Δείγμα αναφοράς	Q _f αναφοράς
1	As	1	VI	10	0.1942	10	0	0.0
2	Pb	10	V	8	0.1553	20	0	0.0
	Cd	10	V	8	0.1553	5	0	0.0
3	NH ₄	100	IV	5	0.0971	5000	0	0.0
	NO ₂	100	IV	5	0.0971	5000	0	0.0
4	NO ₃	1000.00	III	3	0.0583	50000	25000	29.1
	B	5000	II	1.5	0.0291	1000	500	14.6
	Cu	5000	II	1.5	0.0291	2000	1000	14.6
	Mn	5000	II	1.5	0.0291	50	25	14.6
	Ca	50000	I	1	0.0194	200000	100000	9.7
	Cl	50000	I	1	0.0194	250000	125000	9.7
	Fe	50000	I	1	0.0194	300	150	9.7
	K	50000	I	1	0.0194	12000	6000	9.7
	Mg	50000	I	1	0.0194	50000	25000	9.7
	Na	50000	I	1	0.0194	200000	100000	9.7
	SO ₄	50000	I	1	0.0194	250000	125000	9.7
EC	50000	I	1	0.0194	2500	1250	9.7	
			Σ	51.5			Σ	150.5
							t	150

Πίνακας Π1.21. Υπολογισμός δείκτη PoS για τα δείγματα του υπόγειου νερού της ξηρής περιόδου (μέσος όρος των 2 ξηρών περιόδων)

Παράμετρος	75Λ	Qf	%	AD2	Qf	%	AD3	Qf	%	FAKAS-1	Qf	%	KARAISKOS-1	Qf	%	LB110	Qf	%	
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	1.51	11.73	20.29	2.35	18.25	23.62	5.16	40.08	24.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	17.97	28.81	
Cd	0.01	0.28	0.48	0.01	0.30	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.22	0.12	0.03	0.98	1.57	
NH4	0.00	0.00	0.00	236.63	4.59	5.95	157.96	3.07	1.86	15569.39	302.32	72.73	2989.59	58.05	32.58	181.53	3.52	5.65	
NO2	8.44	0.16	0.28	8.44	0.16	0.21	39.33	0.76	0.46	39.92	0.78	0.19	19.72	0.38	0.21	7.84	0.15	0.24	
NO3	14239.56	16.59	28.70	18609.14	21.68	28.06	9318.36	10.86	6.59	2151.30	2.51	0.60	866.82	1.01	0.57	12308.90	14.34	22.99	
B	25.75	0.75	1.30	45.25	1.32	1.71	43.50	1.27	0.77	82.75	2.41	0.58	59.75	1.74	0.98	22.50	0.66	1.05	
Cu	0.57	0.01	0.01	0.64	0.01	0.01	0.42	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.72	0.65	1.04	
Mn	0.08	0.04	0.08	0.85	0.49	0.64	151.18	88.06	53.42	99.09	57.72	13.89	165.90	96.64	54.24	1.76	1.02	1.64	
Ca	67400.00	6.54	11.32	92725.00	9.00	11.65	47787.50	4.64	2.81	88400.00	8.58	2.06	28580.00	2.77	1.56	64800.00	6.29	10.08	
Cl	11420.40	0.89	1.53	10755.81	0.84	1.08	9427.67	0.73	0.44	8916.32	0.69	0.17	4670.46	0.36	0.20	9632.97	0.75	1.20	
Fe	48.86	3.16	5.47	47.83	3.10	4.01	37.28	2.41	1.46	126.35	8.18	1.97	37.76	2.44	1.37	35.72	2.31	3.71	
K	2903.75	4.70	8.13	1402.10	2.27	2.94	2452.70	3.97	2.41	3500.00	5.66	1.36	600.00	0.97	0.54	1852.55	3.00	4.81	
Mg	16200.00	6.29	10.88	19325.00	7.50	9.71	12850.00	4.99	3.03	46500.00	18.06	4.34	20550.00	7.98	4.48	14300.00	5.55	8.90	
Na	11850.98	1.15	1.99	14068.85	1.37	1.77	10278.78	1.00	0.61	21294.09	2.07	0.50	25306.02	2.46	1.38	9834.38	0.95	1.53	
SO4	23698.11	1.84	3.18	18886.79	1.47	1.90	1622.64	0.13	0.08	2566.04	0.20	0.05	301.89	0.02	0.01	13132.08	1.02	1.63	
EC	472.50	3.67	6.35	632.50	4.91	6.36	370.00	2.87	1.74	833.00	6.47	1.56	400.00	3.11	1.74	413.00	3.21	5.14	
PoS	57.81		100		77.26	100		164.84	100		415.64	100		178.16	100		62.38	100	
Τάξη	1				1			2			3			2			1		
Υποκατηγορία	-				-			a			b			a			-		
Κυρίαρχη Παράμετρος	NO3, Pb				NO3, Pb			Mn, Pb			NH4			Mn, NH4			Pb, NO3		
Χαρακτηρισμός	1/NO3,Pb				1/NO3,Pb			2a/Mn,Pb			3b/NH4			2a/Mn,NH4			1/Pb,NO3		

Παράμετρος	LB113	Qf	%	LB115	Qf	%	LB128	Qf	%	LB129	Qf	%	LB131	Qf	%
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.03	0.11	0.00	0.00	0.00	0.03	0.23	0.40	0.24	1.84	2.66	0.00	0.00	0.00
Cd	0.01	0.20	0.83	0.03	0.85	2.16	0.01	0.26	0.45	0.01	0.19	0.27	0.00	0.03	0.07
NH4	47.76	0.93	3.80	29.39	0.57	1.44	10.10	0.20	0.34	63.06	1.22	1.77	53.88	1.05	2.41
NO2	10.22	0.20	0.81	10.81	0.21	0.53	8.44	0.16	0.28	10.22	0.20	0.29	9.03	0.18	0.40
NO3	5996.85	6.99	28.67	15342.79	17.88	45.17	29452.32	34.31	58.81	37253.74	43.40	62.76	19113.48	22.27	51.37
B	2.25	0.07	0.27	1.25	0.04	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	1.67	0.02	0.10	0.74	0.01	0.03	1.56	0.02	0.04	0.76	0.01	0.02	0.22	0.00	0.01
Mn	1.40	0.81	3.34	3.90	2.27	5.75	0.94	0.55	0.94	0.25	0.14	0.21	0.16	0.09	0.22
Ca	31012.50	3.01	12.35	42225.00	4.10	10.36	68875.00	6.69	11.46	66925.00	6.50	9.40	61900.00	6.01	13.86
Cl	6011.95	0.47	1.92	8629.17	0.67	1.69	10149.80	0.79	1.35	12483.69	0.97	1.40	7956.81	0.62	1.43
Fe	32.27	2.09	8.57	16.16	1.05	2.64	17.26	1.12	1.91	13.48	0.87	1.26	10.44	0.68	1.56
K	1250.00	2.02	8.30	1150.00	1.86	4.70	1500.00	2.43	4.16	1500.00	2.43	3.51	1450.00	2.35	5.41
Mg	10650.00	4.14	16.97	14775.00	5.74	14.50	16500.00	6.41	10.98	15075.00	5.85	8.47	14500.00	5.63	12.99
Na	10351.26	1.00	4.12	12529.57	1.22	3.07	10501.85	1.02	1.75	9491.70	0.92	1.33	10296.11	1.00	2.31
SO4	584.91	0.05	0.19	1150.94	0.09	0.23	5301.89	0.41	0.71	12188.68	0.95	1.37	867.92	0.07	0.16
EC	302.50	2.35	9.64	388.50	3.02	7.63	482.00	3.74	6.42	471.50	3.66	5.30	436.00	3.39	7.81
PoS		24.37	100		39.57	100		58.34	100		69.16	100		43.35	100
Τάξη		1			1			1			1			1	
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-	
Κυρίαρχη Παράμετρος		NO3			NO3			NO3			NO3			NO3	
Χαρακτηρισμός		1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3	

Πίνακας Π1.21. (συνέχεια)

	LB134	Qf	%	LB139	Qf	%	LB140	Qf	%	LB148	Qf	%	LB152	Qf	%
Παράμετρος															
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.31	2.41	4.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.23
Cd	0.00	0.09	0.16	0.01	0.43	0.55	0.01	0.33	0.50	0.00	0.00	0.00	0.01	0.19	0.62
NH4	72.24	1.40	2.38	44.69	0.87	1.09	35.51	0.69	1.07	20.20	0.39	1.19	26.33	0.51	1.69
NO2	9.62	0.19	0.32	9.62	0.19	0.24	8.44	0.16	0.25	9.03	0.18	0.53	10.81	0.21	0.70
NO3	24834.52	28.93	49.05	41174.15	47.97	60.42	35973.21	41.91	64.79	10551.62	12.29	37.25	10831.36	12.62	41.83
B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.88	0.52	1.73
Cu	3.18	0.05	0.08	0.54	0.01	0.01	0.32	0.00	0.01	12.01	0.17	0.53	2.66	0.04	0.13
Mn	0.18	0.11	0.18	0.74	0.43	0.54	0.44	0.26	0.40	0.86	0.50	1.51	0.66	0.38	1.27
Ca	71550.00	6.95	11.78	84975.00	8.25	10.39	60675.00	5.89	9.11	42675.00	4.14	12.55	30515.00	2.96	9.82
Cl	11104.48	0.86	1.46	18955.67	1.47	1.85	14747.69	1.15	1.77	7634.94	0.59	1.80	7319.78	0.57	1.88
Fe	14.56	0.94	1.60	19.24	1.25	1.57	6.85	0.44	0.69	5.94	0.38	1.16	9.14	0.59	1.96
K	1700.00	2.75	4.66	1700.00	2.75	3.46	1350.00	2.18	3.38	1400.00	2.27	6.86	1300.00	2.10	6.97
Mg	20825.00	8.09	13.71	18525.00	7.19	9.06	16850.00	6.54	10.12	17300.00	6.72	20.36	11625.00	4.51	14.97
Na	17411.18	1.69	2.87	13723.20	1.33	1.68	11728.87	1.14	1.76	18146.28	1.76	5.34	20244.32	1.97	6.52
SO4	3509.43	0.27	0.46	35207.55	2.73	3.44	4830.19	0.38	0.58	5396.23	0.42	1.27	4641.51	0.36	1.20
EC	547.50	4.25	7.21	581.50	4.52	5.69	465.00	3.61	5.58	410.00	3.18	9.65	329.50	2.56	8.48
			100			100			100			100			100
PoS		58.99			79.39			64.69			33.01			30.17	
Τάξη		1			1			1			1			1	
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-	
Κυρίαρχη Παράμετρος		NO3			NO3			NO3			NO3, Mg			NO3	
Χαρακτηρισμός		1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3, Mg			1/NO3	

	LB213	Qf	%	LB250	Qf	%	LB251	Qf	%	LB257	Qf	%	LB260	Qf	%
Παράμετρος															
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.49	3.80	4.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.00	0.00	0.00	0.01	0.37	0.46	0.02	0.64	0.73	0.01	0.20	0.43	0.02	0.73	0.57
NH4	38.57	0.75	0.37	35.51	0.69	0.85	63.06	1.22	1.41	200.82	3.90	8.28	164.08	3.19	2.48
NO2	18.54	0.36	0.18	9.03	0.18	0.22	8.44	0.16	0.19	46.46	0.90	1.92	8.44	0.16	0.13
NO3	1434.20	1.67	0.84	41922.77	48.84	60.45	38297.87	44.62	51.48	6627.27	7.72	16.40	57407.41	66.88	51.97
B	1246.00	36.29	18.15	14.50	0.42	0.52	57.25	1.67	1.92	142.00	4.14	8.79	29.00	0.84	0.66
Cu	0.50	0.01	0.00	0.28	0.00	0.01	12.16	0.18	0.20	0.39	0.01	0.01	0.24	0.00	0.00
Mn	55.30	32.21	16.11	0.24	0.14	0.17	3.21	1.87	2.16	0.68	0.40	0.84	0.76	0.44	0.34
Ca	62200.00	6.04	3.02	76925.00	7.47	9.24	85400.00	8.29	9.57	27772.50	2.70	5.73	85100.00	8.26	6.42
Cl	88615.00	6.88	3.44	9598.70	0.75	0.92	15878.33	1.23	1.42	11529.74	0.90	1.90	27196.10	2.11	1.64
Fe	100.85	6.53	3.26	15.61	1.01	1.25	9.16	0.59	0.68	18.12	1.17	2.49	9.92	0.64	0.50
K	1900.00	3.07	1.54	1652.40	2.67	3.31	1602.25	2.59	2.99	1700.00	2.75	5.84	2200.00	3.56	2.77
Mg	44300.00	17.20	8.60	17900.00	6.95	8.60	30375.00	11.80	13.61	26175.00	10.17	21.60	52175.00	20.26	15.75
Na	286694.00	27.83	13.92	12105.45	1.18	1.45	27202.98	2.64	3.05	58811.30	5.71	12.13	37118.38	3.60	2.80
SO4	604339.62	46.94	23.48	29452.83	2.29	2.83	49830.19	3.87	4.47	27094.34	2.10	4.47	144754.72	11.24	8.74
EC	1821.00	14.14	7.07	520.50	4.04	5.00	682.50	5.30	6.12	555.50	4.31	9.17	868.50	6.75	5.24
			100			100			100			100			100
PoS		199.94			80.80			86.68			47.07			128.68	
Τάξη		2			1			1			1			1	
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-	
Κυρίαρχη Παράμετρος		SO4			NO3			NO3			Mg			NO3	
Χαρακτηρισμός		1/SO4			1/NO3			1/NO3			1/Mg			1/NO3	

Πίνακας Π1.21. (συνέχεια)

Παράμετρος	LB268	Qf	%	LB271	Qf	%	LB279	Qf	%	LB81	Qf	%	LB84	Qf	%
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.17	9.12	14.80	1.62	12.61	17.57	0.41	3.16	6.87
Cd	0.01	0.37	0.61	0.00	0.03	0.03	0.02	0.50	0.81	0.01	0.20	0.28	0.00	0.00	0.00
NH4	19.29	0.37	0.61	675.31	13.11	13.03	0.00	0.00	0.00	132.55	2.57	3.58	53.88	1.05	2.28
NO2	10.81	0.21	0.34	79.14	1.54	1.53	12.60	0.24	0.40	9.03	0.18	0.24	7.84	0.15	0.33
NO3	9877.86	11.51	18.85	654.06	0.76	0.76	21859.73	25.47	41.34	25118.20	29.26	40.75	17947.20	20.91	45.51
B	9.25	0.27	0.44	515.25	15.01	14.92	22.13	0.64	1.05	22.25	0.65	0.90	29.88	0.87	1.89
Cu	4.46	0.06	0.11	0.41	0.01	0.01	9.47	0.14	0.22	4.94	0.07	0.10	2.98	0.04	0.09
Mn	1.71	1.00	1.64	41.77	24.33	24.18	1.71	1.00	1.62	0.92	0.54	0.75	0.86	0.50	1.09
Ca	60475.00	5.87	9.62	32200.00	3.13	3.11	72225.00	7.01	11.38	68475.00	6.65	9.26	59325.00	5.76	12.54
Cl	28504.39	2.21	3.63	23210.75	1.80	1.79	8828.39	0.69	1.11	11210.89	0.87	1.21	9603.49	0.75	1.62
Fe	30.62	1.98	3.25	8.36	0.54	0.54	58.02	3.76	6.10	60.02	3.88	5.41	18.13	1.17	2.55
K	2150.00	3.48	5.70	1200.00	1.94	1.93	1652.40	2.67	4.34	1652.55	2.67	3.72	1352.10	2.19	4.76
Mg	46400.00	18.02	29.51	21950.00	8.52	8.47	13475.00	5.23	8.49	15700.00	6.10	8.49	13100.00	5.09	11.07
Na	36108.23	3.51	5.74	70980.30	6.89	6.85	8573.25	0.83	1.35	9783.42	0.95	1.32	8931.22	0.87	1.89
SO4	87849.06	6.82	11.17	229528.30	17.83	17.72	9075.47	0.70	1.14	13037.74	1.01	1.41	3509.43	0.27	0.59
EC	691.50	5.37	8.80	665.00	5.17	5.13	463.50	3.60	5.84	461.50	3.58	4.99	408.00	3.17	6.90
			100			100			100			100			100
PoS		61.06			100.60			61.60			71.81			45.94	
Τάξη		1			1			1			1			1	
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-	
Κυρίαρχη Παράμετρος		Mg			Mn			NO3			NO3			NO3	
Χαρακτηρισμός		1/Mg			1/Mn			1/NO3			1/NO3			1/NO3	

Παράμετρος	LB90	Qf	%	LB95	Qf	%	LB98	Qf	%	Msp	Qf	%	SR01	Qf	%
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.09	0.00	0.00	0.00	0.12	0.91	2.70
Cd	0.01	0.30	0.51	0.02	0.50	1.13	0.00	0.06	0.10	0.01	0.17	0.36	0.02	0.68	2.03
NH4	32.45	0.63	1.09	23.27	0.45	1.03	60.00	1.17	1.90	375.31	7.29	15.36	26.33	0.51	1.52
NO2	7.25	0.14	0.24	7.84	0.15	0.35	8.44	0.16	0.27	93.40	1.81	3.82	6.65	0.13	0.38
NO3	22123.72	25.78	44.60	18825.85	21.93	49.95	24641.45	28.71	46.78	9475.97	11.04	23.27	12884.16	15.01	44.56
B	33.00	0.96	1.66	28.13	0.82	1.87	64.13	1.87	3.04	28.38	0.83	1.74	13.75	0.40	1.19
Cu	0.42	0.01	0.01	1.46	0.02	0.05	0.86	0.01	0.02	0.64	0.01	0.02	0.37	0.01	0.02
Mn	0.49	0.29	0.50	0.18	0.10	0.24	0.60	0.35	0.57	7.63	4.45	9.37	0.19	0.11	0.32
Ca	74800.00	7.26	12.57	59050.00	5.73	13.06	59900.00	5.82	9.48	60125.00	5.84	12.31	28600.00	2.78	8.24
Cl	11706.80	0.91	1.57	9043.21	0.70	1.60	12828.92	1.00	1.62	6118.62	0.48	1.00	10359.42	0.80	2.39
Fe	10.65	0.69	1.19	13.52	0.88	1.99	30.54	1.98	3.22	46.17	2.99	6.30	9.98	0.65	1.92
K	1852.85	3.00	5.19	1452.25	2.35	5.35	1652.55	2.67	4.36	1900.00	3.07	6.48	2200.00	3.56	10.57
Mg	22275.00	8.65	14.97	14475.00	5.62	12.80	17900.00	6.95	11.33	14550.00	5.65	11.91	10900.00	4.23	12.57
Na	17508.11	1.70	2.94	13319.91	1.29	2.95	20952.08	2.03	3.31	6831.09	0.66	1.40	14829.00	1.44	4.27
SO4	39075.47	3.03	5.25	867.92	0.07	0.15	60207.55	4.68	7.62	301.89	0.02	0.05	490.57	0.04	0.11
EC	572.50	4.45	7.69	423.50	3.29	7.49	496.00	3.85	6.28	403.00	3.13	6.60	313.00	2.43	7.22
			100			100			100			100			100
PoS		57.79			43.91			61.37			47.44			33.69	
Τάξη		1			1			1			1			1	
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-	
Κυρίαρχη Παράμετρος		NO3			NO3			NO3			NO3			NO3	
Χαρακτηρισμός		1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3	

Πίνακας Π1.21. (συνέχεια)

	SR110	Qf	%	SR111	Qf	%	SR112	Qf	%	SR114	Qf	%	SR39	Qf	%
Παράμετρος															
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	1.48	11.50	15.67	0.90	7.01	11.25	0.11	0.89	2.07	0.49	3.77	7.71	2.22	17.26	19.70
Cd	0.02	0.59	0.80	0.01	0.23	0.37	0.01	0.31	0.73	0.00	0.00	0.00	0.02	0.57	0.66
NH4	47.76	0.93	1.26	326.33	6.34	10.17	20.20	0.39	0.92	43.78	0.85	1.74	10.10	0.20	0.22
NO2	7.84	0.15	0.21	18.54	0.36	0.58	6.65	0.13	0.30	9.62	0.19	0.38	14.38	0.28	0.32
NO3	28309.69	32.98	44.93	21434.20	24.97	40.06	17100.08	19.92	46.69	18427.90	21.47	43.83	32289.20	37.62	42.92
B	33.38	0.97	1.32	38.75	1.13	1.81	0.00	0.00	0.00	16.50	0.48	0.98	24.38	0.71	0.81
Cu	2.22	0.03	0.04	3.39	0.05	0.08	1.73	0.03	0.06	1.87	0.03	0.06	8.42	0.12	0.14
Mn	0.32	0.18	0.25	3.00	1.75	2.81	0.00	0.00	0.00	0.64	0.37	0.76	2.68	1.56	1.78
Ca	66275.00	6.43	8.77	69400.00	6.74	10.81	65150.00	6.33	14.82	77575.00	7.53	15.38	70975.00	6.89	7.86
Cl	10935.81	0.85	1.16	8656.78	0.67	1.08	8740.88	0.68	1.59	8128.57	0.63	1.29	13766.83	1.07	1.22
Fe	30.13	1.95	2.66	26.46	1.71	2.75	11.62	0.75	1.76	21.47	1.39	2.84	80.35	5.20	5.93
K	1802.70	2.92	3.97	1552.25	2.51	4.03	1800.00	2.91	6.83	1301.95	2.11	4.30	2754.20	4.46	5.09
Mg	21350.00	8.29	11.29	12275.00	4.77	7.65	14150.00	5.50	12.88	13500.00	5.24	10.70	14700.00	5.71	6.51
Na	9779.86	0.95	1.29	7732.88	0.75	1.20	8989.89	0.87	2.05	7917.44	0.77	1.57	12910.38	1.25	1.43
SO4	10490.57	0.81	1.11	1622.64	0.13	0.20	6716.98	0.52	1.22	2000.00	0.16	0.32	12188.68	0.95	1.08
EC	497.00	3.86	5.26	414.00	3.22	5.16	444.00	3.45	8.08	514.00	3.99	8.15	488.50	3.79	4.33
			100			100			100			100			100
PoS		73.41			62.34			42.67			48.98			87.64	
Τάξη		1			1			1			1			1	
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-	
Κυρίαρχη Παράμετρος		NO3			NO3			NO3			NO3			NO3	
Χαρακτηρισμός		1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3	

	SR67	Qf	%	Γ3	Qf	%	ΕΛ47	Qf	%	ΕΛ55	Qf	%	Λ41	Qf	%
Παράμετρος															
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	2.46	19.12	18.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.67	20.73	9.94	1.08	8.41	8.75
Cd	0.00	0.00	0.00	0.01	0.25	0.12	0.00	0.00	0.00	0.01	0.23	0.11	0.01	0.16	0.16
NH4	473.27	9.19	8.97	0.00	0.00	0.00	142.65	2.77	4.51	240.61	4.67	2.24	99.80	1.94	2.02
NO2	28.04	0.54	0.53	10.22	0.20	0.09	37.55	0.73	1.19	7.25	0.14	0.07	7.25	0.14	0.15
NO3	42513.79	49.53	48.36	138258.47	161.08	76.89	3490.94	4.07	6.63	112923.56	131.56	63.11	39952.72	46.55	48.46
B	0.00	0.00	0.00	26.75	0.78	0.37	163.25	4.75	7.75	101.13	2.95	1.41	17.75	0.52	0.54
Cu	16.31	0.24	0.23	3.75	0.05	0.03	0.47	0.01	0.01	3.64	0.05	0.03	28.97	0.42	0.44
Mn	3.67	2.13	2.08	1.71	1.00	0.48	22.12	12.89	20.99	0.77	0.45	0.21	0.14	0.08	0.08
Ca	67750.00	6.58	6.42	78700.00	7.64	3.65	22412.50	2.18	3.54	117850.00	11.44	5.49	96650.00	9.38	9.77
Cl	6715.92	0.52	0.51	43667.49	3.39	1.62	37097.91	2.88	4.69	32791.48	2.55	1.22	10585.31	0.82	0.86
Fe	57.60	3.73	3.64	17.91	1.16	0.55	9.82	0.64	1.04	20.25	1.31	0.63	19.59	1.27	1.32
K	1100.00	1.78	1.74	3250.00	5.26	2.51	400.00	0.65	1.05	6760.05	10.94	5.25	5909.00	9.56	9.96
Mg	10350.00	4.02	3.92	41875.00	16.26	7.76	26850.00	10.43	16.99	23500.00	9.13	4.38	22075.00	8.57	8.93
Na	16063.92	1.56	1.52	25398.09	2.47	1.18	103803.00	10.08	16.42	27990.53	2.72	1.30	9081.36	0.88	0.92
SO4	113.21	0.01	0.01	45962.26	3.57	1.70	45773.58	3.56	5.79	43132.08	3.35	1.61	31245.28	2.43	2.53
EC	445.00	3.46	3.37	822.00	6.38	3.05	743.00	5.77	9.40	806.00	6.26	3.00	634.00	4.92	5.13
			100			100			100			100			100
PoS		102.41			209.49			61.38			208.47			96.05	
Τάξη		1			2			1			2			1	
Υποκατηγορία		-			b			-			b			-	
Κυρίαρχη Παράμετρος		NO3			NO3			Mn			NO3			NO3	
Χαρακτηρισμός		1/NO3			2b/NO3			1/Mn			2b/NO3			1/NO3	

Πίνακας Π1.21. (συνέχεια)

Παράμετρος	Λ43	Qf	%	Λ53	Qf	%	Λ76	Qf	%
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.65	5.04	3.11	0.00	0.00	0.00	0.75	5.80	5.34
Cd	0.00	0.00	0.00	0.01	0.19	0.43	0.01	0.26	0.24
NH4	50.82	0.99	0.61	32.45	0.63	1.46	0.00	0.00	0.00
NO2	7.84	0.15	0.09	10.22	0.20	0.46	8.44	0.16	0.15
NO3	95114.26	110.81	68.46	18940.11	22.07	51.10	59574.47	69.41	63.95
B	31.00	0.90	0.56	0.00	0.00	0.00	20.25	0.59	0.54
Cu	10.25	0.15	0.09	15.08	0.22	0.51	1.04	0.02	0.01
Mn	1.35	0.79	0.49	0.22	0.13	0.29	0.04	0.03	0.02
Ca	102750.00	9.98	6.16	54175.00	5.26	12.18	95600.00	9.28	8.55
Cl	21412.21	1.66	1.03	9371.42	0.73	1.69	11036.35	0.86	0.79
Fe	38.28	2.48	1.53	24.02	1.55	3.60	29.78	1.93	1.78
K	1705.10	2.76	1.70	1650.00	2.67	6.18	1852.85	3.00	2.76
Mg	34100.00	13.24	8.18	13675.00	5.31	12.30	21250.00	8.25	7.60
Na	27695.25	2.69	1.66	9833.20	0.95	2.21	13767.17	1.34	1.23
SO4	52188.68	4.05	2.50	3320.75	0.26	0.60	30679.25	2.38	2.20
EC	796.00	6.18	3.82	389.00	3.02	7.00	674.50	5.24	4.83
			100			100			100
ΡοS		161.88			43.18			108.54	
Τάξη		2			1			1	
Υποκατηγορία		a			-			-	
Κυρίαρχη Παράμετρος		NO3			NO3			NO3	
Χαρακτηρισμός		2a/NO3			1/NO3			1/NO3	

Πίνακας Π1.22. Υπολογισμός δείκτη PoS για τα δείγματα του υπόγειου νερού της υγρής περιόδου (μέσος όρος των 2 υγρών περιόδων)

Παράμετρος	75Λ	Qf	%	AD2	Qf	%	AD3	Qf	%	Ag,Anna	Qf	%	FAKAS-1	Qf	%	KARAIKOS-1	Qf	%
As	1.70	32.91	37.73	1.30	25.24	28.04	3.03	58.89	54.17	2.71	52.70	52.53	2.37	46.02	27.89	1.76	34.08	21.11
Pb	1.09	8.49	9.73	0.25	1.91	2.12	0.05	0.40	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.07	2.25	2.58	0.07	2.10	2.33	0.07	2.11	1.94	0.13	3.88	3.87	0.09	2.92	1.77	0.02	0.59	0.37
NH4	63.06	1.22	1.40	154.90	3.01	3.34	194.69	3.78	3.48	124.29	2.41	2.41	855.92	16.62	10.07	1021.22	19.83	12.28
NO2	7.25	0.14	0.16	9.03	0.18	0.19	10.81	0.21	0.19	9.03	0.18	0.17	129.64	2.52	1.53	23.29	0.45	0.28
NO3	14570.53	16.98	19.46	23132.39	26.95	29.93	16422.38	19.13	17.60	18628.84	21.70	21.63	6765.17	7.88	4.78	1304.18	1.52	0.94
B	3.75	0.11	0.13	105.75	3.08	3.42	101.63	2.96	2.72	0.00	0.00	0.00	23.50	0.68	0.41	25.25	0.74	0.46
Cu	1.89	0.03	0.03	2.58	0.04	0.04	0.76	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	3.52	0.05	0.03	2.25	0.03	0.02
Mn	0.12	0.07	0.08	0.52	0.30	0.34	2.21	1.29	1.18	0.36	0.21	0.21	85.00	49.51	30.01	143.30	83.48	51.70
Ca	67875.00	6.59	7.55	98125.00	9.53	10.58	60025.00	5.83	5.36	66500.00	6.46	6.44	73250.00	7.11	4.31	29445.00	2.86	1.77
Cl	11762.92	0.91	1.05	11352.41	0.88	0.98	8779.32	0.68	0.63	8951.35	0.70	0.69	8713.84	0.68	0.41	4849.05	0.38	0.23
Fe	14.89	0.96	1.10	8.93	0.58	0.64	14.91	0.96	0.89	0.81	0.05	0.05	34.99	2.26	1.37	75.24	4.87	3.02
K	2350.00	3.80	4.36	1300.00	2.10	2.34	1750.00	2.83	2.60	1700.00	2.75	2.74	1700.00	2.75	1.67	950.00	1.54	0.95
Mg	16500.00	6.41	7.35	19325.00	7.50	8.34	13750.00	5.34	4.91	12950.00	5.03	5.01	41575.00	16.15	9.79	15075.00	5.85	3.63
Na	11699.46	1.14	1.30	13035.77	1.27	1.41	11287.06	1.10	1.01	7911.85	0.77	0.77	19948.71	1.94	1.17	22894.38	2.22	1.38
SO4	19713.72	1.53	1.76	7660.38	0.59	0.66	301.89	0.02	0.02	679.25	0.05	0.05	36367.24	2.82	1.71	3933.28	0.31	0.19
EC	475.00	3.69	4.23	615.50	4.78	5.31	408.00	3.17	2.91	442.00	3.43	3.42	653.50	5.08	3.08	350.50	2.72	1.69
PoS		87.23	100		90.04	100		108.72	100		100.32	100		165.00	100		161.46	100
Τάξη		1			1			1			1			2			2	
Υποκατηγορία		-			-			-			-			a			a	
Υπάρχουσα παράμετρος		As			NO3, As			As			As, NO3			Mn, As			Mn, As	
Χαρακτηρισμός		1/As			1/NO3,As			1/As			1/As,NO3			2a/Mn,As			2a/Mn,As	

Παράμετρος	LB110	Qf	%	LB113	Qf	%	LB115	Qf	%	LB128	Qf	%	LB129	Qf	%	LB131	Qf	%
As	1.64	31.83	41.39	2.06	40.00	53.62	3.18	61.81	58.78		0.00	0.00	1.20	23.24	22.89	2.60	50.56	47.89
Pb	0.06	0.49	0.63	0.36	2.80	3.75	0.15	1.15	1.10	0.46	3.58	6.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.12	3.73	4.85	0.07	2.21	2.96	0.11	3.37	3.21	0.00	0.00	0.00	0.12	3.84	3.78	0.04	1.38	1.31
NH4	182.45	3.54	4.61	213.06	4.14	5.55	219.18	4.26	4.05	20.20	0.39	0.70	145.71	2.83	2.79	170.20	3.30	3.13
NO2	7.25	0.14	0.18	3.92	0.08	0.10	5.11	0.10	0.09	6.65	0.13	0.23	9.03	0.18	0.17	10.22	0.20	0.19
NO3	12592.59	14.67	19.08	6568.16	7.65	10.26	10638.30	12.39	11.79	23207.25	27.04	48.16	41292.36	48.11	47.37	23502.76	27.38	25.94
B	2.00	0.06	0.08	3.38	0.10	0.13	9.75	0.28	0.27	44.00	1.28	2.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	3.72	0.05	0.07	1.71	0.02	0.03	1.13	0.02	0.02	8.38	0.12	0.22	0.51	0.01	0.01	0.25	0.00	0.00
Mn	0.84	0.49	0.63	1.41	0.82	1.10	3.12	1.82	1.73	1.59	0.93	1.65	0.91	0.53	0.52	0.24	0.14	0.13
Ca	65425.00	6.35	8.26	37150.00	3.61	4.84	57200.00	5.55	5.28	69850.00	6.78	12.08	69475.00	6.75	6.64	68550.00	6.66	6.30
Cl	10207.23	0.79	1.03	5802.02	0.45	0.60	8613.49	0.67	0.64	10179.92	0.79	1.41	11814.19	0.92	0.90	8369.52	0.65	0.62
Fe	1.14	0.07	0.10	26.66	1.73	2.31	21.11	1.37	1.30	23.99	1.55	2.77	16.83	1.09	1.07	19.05	1.23	1.17
K	2050.00	3.32	4.31	1250.00	2.02	2.71	1250.00	2.02	1.92	1500.00	2.43	4.32	1500.00	2.43	2.39	1650.00	2.67	2.53
Mg	14875.00	5.78	7.51	11050.00	4.29	5.75	14925.00	5.80	5.51	16300.00	6.33	11.28	15300.00	5.94	5.85	15375.00	5.97	5.66
Na	10146.47	0.99	1.28	11049.67	1.07	1.44	12339.27	1.20	1.14	10088.85	0.98	1.74	9663.81	0.94	0.92	11000.76	1.07	1.01
SO4	13845.80	1.08	1.40	1766.90	0.14	0.18	2804.63	0.22	0.21	3698.11	0.29	0.51	15446.14	1.20	1.18	10614.24	0.82	0.78
EC	455.00	3.53	4.60	447.50	3.48	4.66	403.50	3.13	2.98	453.00	3.52	6.27	459.50	3.57	3.51	454.50	3.53	3.34
PoS		76.90	100		74.60	100		105.15	100		56.14	100		101.56	100		105.58	100
Τάξη		1			1			1			1			1			1	
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-			-	
Υπάρχουσα παράμετρος		As			As			As			NO3			NO3, As			As, NO3	
Χαρακτηρισμός		1/As			1/As			1/As			1/NO3			1/NO3,As			1/As,NO3	

Π1.22. (συνέχεια)

	LB134	Qf	%	LB139	Qf	%	LB140	Qf	%	LB148	Qf	%	LB152	Qf	%	LB214	Qf	%
Παράμετρος																		
As	2.47	48.00	42.02	2.41	46.83	37.01		0.00	0.00		0.00	0.00	4.22	82.00	70.63	2.98	57.79	29.86
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	3.08	6.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.02	0.57	0.50	0.03	0.85	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	1.03	0.88	0.07	2.10	1.08
NH4	96.73	1.88	1.64	124.29	2.41	1.91	87.55	1.70	2.43	283.47	5.50	11.92	108.98	2.12	1.82	3644.69	70.77	36.56
NO2	14.97	0.29	0.25	10.22	0.20	0.16	6.65	0.13	0.18	10.22	0.20	0.43	9.62	0.19	0.16	22.70	0.44	0.23
NO3	29097.71	33.90	29.67	39282.90	45.77	36.17	36446.02	42.46	60.73	10417.65	12.14	26.29	10874.70	12.67	10.91	634.36	0.74	0.38
B	10.50	0.31	0.27	0.00	0.00	0.00	37.00	1.08	1.54	11.00	0.32	0.69	43.38	1.26	1.09	428.88	12.49	6.45
Cu	3.49	0.05	0.04	0.27	0.00	0.00	0.30	0.00	0.01	21.53	0.31	0.68	0.15	0.00	0.00	1.14	0.02	0.01
Mn	1.33	0.78	0.68	2.84	1.65	1.31	2.85	1.66	2.37	4.89	2.85	6.17	1.00	0.58	0.50	38.86	22.64	11.70
Ca	76575.00	7.43	6.51	87100.00	8.46	6.68	68250.00	6.63	9.48	53600.00	5.20	11.27	32412.50	3.15	2.71	16912.50	1.64	0.85
Cl	10770.66	0.84	0.73	18979.51	1.47	1.16	16400.99	1.27	1.82	7553.81	0.59	1.27	7580.73	0.59	0.51	13295.50	1.03	0.53
Fe	30.52	1.98	1.73	22.58	1.46	1.15	6.25	0.40	0.58	30.35	1.96	4.25	7.12	0.46	0.40	30.42	1.97	1.02
K	1750.00	2.83	2.48	1850.00	2.99	2.37	1400.00	2.27	3.24	1400.00	2.27	4.91	1450.00	2.35	2.02	1300.00	2.10	1.09
Mg	21500.00	8.35	7.31	18750.00	7.28	5.75	18550.00	7.20	10.30	17450.00	6.78	14.68	10750.00	4.17	3.60	14275.00	5.54	2.86
Na	16950.30	1.65	1.44	13577.36	1.32	1.04	12537.60	1.22	1.74	16099.56	1.56	3.39	23390.53	2.27	1.96	97120.25	9.43	4.87
SO4	14303.77	1.11	0.97	17046.48	1.32	1.05	2188.68	0.17	0.24	3698.11	0.29	0.62	9684.56	0.75	0.65	1150.94	0.09	0.05
EC	551.00	4.28	3.75	580.00	4.50	3.56	480.00	3.73	5.33	401.00	3.11	6.75	324.00	2.52	2.17	613.00	4.76	2.46
			100			100			100			100			100			100
PoS		114.24			126.54			69.92			46.17			116.10				193.55
Τάξη		1			1			1			1			1				2
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-				a
Υπέρβαρη παράμετρος		As, NO3			As, NO3			NO3			NO3			As				NH4, As
Χαρακτηρισμός		1/As,NO3			1/As,NO3			1/NO3			1/NO3			1/As				2a/NH4,As

	LB237	Qf	%	LB250	Qf	%	LB251	Qf	%	LB257	Qf	%	LB260	Qf	%	LB268	Qf	%
Παράμετρος																		
As		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.46	47.77	38.36		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.00	0.00	0.00	0.09	2.90	3.33	0.09	2.89	2.32	0.00	0.00	0.00	0.03	1.03	0.73	0.00	0.00	0.00
NH4	944.69	18.34	14.52	193.78	3.76	4.31	0.00	0.00	0.00	93.67	1.82	3.96	271.22	5.27	3.76	75.31	1.46	2.63
NO2	42.30	0.82	0.65	9.62	0.19	0.21	35.77	0.69	0.56	7.84	0.15	0.33	17.35	0.34	0.24	6.65	0.13	0.23
NO3	3041.77	3.54	2.81	44917.26	52.33	59.98	28014.18	32.64	26.21	4838.46	5.64	12.28	56264.78	65.55	46.84	13719.46	15.98	28.80
B	779.00	22.69	17.96	26.13	0.76	0.87	47.25	1.38	1.11	153.75	4.48	9.75	58.75	1.71	1.22	25.50	0.74	1.34
Cu	1.74	0.03	0.02	6.22	0.09	0.10	1.21	0.02	0.01	0.36	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.49	0.01	0.01
Mn	15.57	9.07	7.18	0.50	0.29	0.33	13.04	7.60	6.10	1.82	1.06	2.31	10.71	6.24	4.46	1.15	0.67	1.21
Ca	70350.00	6.83	5.41	84050.00	8.16	9.35	69900.00	6.79	5.45	37850.00	3.67	8.00	91550.00	8.89	6.35	57800.00	5.61	10.11
Cl	33371.68	2.59	2.05	9776.76	0.76	0.87	14805.38	1.15	0.92	10179.92	0.79	1.72	31141.63	2.42	1.73	25013.07	1.94	3.50
Fe	3.34	0.22	0.17	8.64	0.56	0.64	27.58	1.78	1.43	42.90	2.78	6.05	41.15	2.66	1.90	17.97	1.16	2.10
K	1600.00	2.59	2.05	1750.00	2.83	3.25	2600.00	4.21	3.38	1700.00	2.75	5.99	2400.00	3.88	2.77	1900.00	3.07	5.54
Mg	48600.00	18.87	14.94	19450.00	7.55	8.66	21275.00	8.26	6.64	28400.00	11.03	24.02	54600.00	21.20	15.15	31100.00	12.08	21.76
Na	92185.50	8.95	7.09	11271.15	1.09	1.25	23056.90	2.24	1.80	42118.50	4.09	8.91	40745.80	3.96	2.83	30310.90	2.94	5.30
SO4	306226.42	23.78	18.83	20336.36	1.58	1.81	36108.23	2.80	2.25	46905.66	3.64	7.93	127018.87	9.87	7.05	66339.62	5.15	9.28
EC	1027.00	7.98	6.32	564.50	4.38	5.03	553.50	4.30	3.45	516.00	4.01	8.73	894.00	6.94	4.96	585.00	4.54	8.19
			100			100			100			100			100			100
PoS		126.31			87.25			124.51			45.91			139.96				55.51
Τάξη		1			1			1			1			1				1
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-				-
Υπέρβαρη παράμετρος		SO4			NO3			As, NO3			Mg			NO3				NO3, Mg
Χαρακτηρισμός		1/SO4			1/NO3			1/As,NO3			1/Mg			1/NO3				1/NO3,Mg

Π1.22. (συνέχεια)

	LB271	Qf	%	LB279	Qf	%	LB81	Qf	%	LB84	Qf	%	LB90	Qf	%	LB95	Qf	%
Παράμετρος																		
As	2.52	48.93	31.11	1.92	37.26	41.29	0.46	8.89	10.84	0.74	14.41	26.86	1.52	29.48	24.05		0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.14	1.12	1.24	0.26	2.00	2.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.07	2.16	1.37	0.08	2.45	2.72	0.07	2.16	2.63	0.10	3.11	5.79	0.10	3.06	2.50	0.00	0.00	0.00
NH4	950.82	18.46	11.74	283.47	5.50	6.10	130.41	2.53	3.09	3.98	0.08	0.14	44.69	0.87	0.71	0.00	0.00	0.00
NO2	13.78	0.27	0.17	9.03	0.18	0.19	7.25	0.14	0.17	10.22	0.20	0.37	10.22	0.20	0.16	11.41	0.22	0.55
NO3	0.00	0.00	0.00	17777.78	20.71	22.95	23010.24	26.81	32.69	12379.83	14.42	26.89	45705.28	53.25	43.45	17462.57	20.34	50.15
B	582.13	16.96	10.78	0.00	0.00	0.00	515.63	15.02	18.31	30.50	0.89	1.66	22.63	0.66	0.54	1.50	0.04	0.11
Cu	0.66	0.01	0.01	3.71	0.05	0.06	0.57	0.01	0.01	4.37	0.06	0.12	0.58	0.01	0.01	1.24	0.02	0.04
Mn	45.14	26.29	16.72	0.91	0.53	0.59	0.21	0.12	0.15	0.91	0.53	0.99	0.84	0.49	0.40	0.00	0.00	0.00
Ca	31512.50	3.06	1.95	74825.00	7.26	8.05	69550.00	6.75	8.23	57950.00	5.63	10.49	87300.00	8.48	6.92	63550.00	6.17	15.21
Cl	24328.77	1.89	1.20	9105.78	0.71	0.78	11338.46	0.88	1.07	7661.88	0.60	1.11	13116.07	1.02	0.83	8545.44	0.66	1.64
Fe	27.51	1.78	1.13	15.11	0.98	1.08	18.55	1.20	1.46	41.48	2.68	5.01	20.14	1.30	1.06	7.51	0.49	1.20
K	1100.00	1.78	1.13	1700.00	2.75	3.05	1700.00	2.75	3.35	1300.00	2.10	3.92	1900.00	3.07	2.51	1400.00	2.27	5.58
Mg	23150.00	8.99	5.72	13950.00	5.42	6.00	16100.00	6.25	7.62	12800.00	4.97	9.27	25325.00	9.83	8.03	15050.00	5.84	14.41
Na	70422.00	6.84	4.35	8649.17	0.84	0.93	9698.66	0.94	1.15	9200.48	0.89	1.67	20823.63	2.02	1.65	12654.08	1.23	3.03
SO4	188273.58	14.62	9.30	11096.23	0.86	0.96	24627.96	1.91	2.33	2760.03	0.21	0.40	49147.68	3.82	3.12	490.57	0.04	0.09
EC	674.00	5.23	3.33	464.50	3.61	4.00	468.50	3.64	4.44	366.50	2.85	5.31	642.00	4.99	4.07	418.00	3.25	8.00
			100			100			100			100			100			100
PoS		157.27			90.24			82.01			53.63			122.54				40.57
Τάξη		2			1			1			1			1				1
Υποκατηγορία		a			-			-			-			-				-
Υπάρχουσα παράμετρος		As			As, NO3			NO3			NO3, As			NO3, As				NO3
Χαρακτηρισμός		2a/As			1/As,NO3			1/NO3			1/NO3,As			1/NO3,As				1/NO3

	LB98	Qf	%	MPAKRATSAS	Qf	%	Msp	Qf	%	SR01	Qf	%	SR110	Qf	%	SR111	Qf	%
Παράμετρος																		
As	0.23	4.43	7.91		0.00	0.00	0.20	3.92	7.81	0.00	0.00	0.00	1.49	28.95	27.40	0.55	10.66	15.63
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.53	1.07	0.48	3.73	3.53	0.00	0.00	0.00
Cd	0.08	2.45	4.39	0.00	0.00	0.00	0.07	2.08	4.14	0.06	1.94	3.92	0.23	6.99	6.62	0.07	2.30	3.37
NH4	11.02	0.21	0.38	154.90	3.01	10.88	231.43	4.49	8.94	90.61	1.76	3.55	240.61	4.67	4.42	133.47	2.59	3.80
NO2	10.22	0.20	0.35	33.98	0.66	2.39	10.81	0.21	0.42	9.03	0.18	0.35	9.62	0.19	0.18	11.41	0.22	0.32
NO3	18999.21	22.14	39.55	4791.17	5.58	20.19	14389.28	16.76	33.37	20764.38	24.19	48.80	27509.85	32.05	30.34	24332.15	28.35	41.55
B	43.38	1.26	2.26	2.75	0.08	0.29	102.75	2.99	5.96	0.00	0.00	0.00	97.75	2.85	2.69	5.88	0.17	0.25
Cu	0.98	0.01	0.03	0.59	0.01	0.03	0.56	0.01	0.02	6.03	0.09	0.18	3.97	0.06	0.05	2.23	0.03	0.05
Mn	0.09	0.05	0.09	6.50	3.79	13.70	0.10	0.06	0.11	1.09	0.63	1.28	1.60	0.93	0.88	2.06	1.20	1.76
Ca	55625.00	5.40	9.65	14660.00	1.42	5.15	73850.00	7.17	14.27	40300.00	3.91	7.89	71350.00	6.93	6.56	79850.00	7.75	11.36
Cl	10896.76	0.85	1.51	4774.57	0.37	1.34	6804.99	0.53	1.05	11989.57	0.93	1.88	10472.00	0.81	0.77	9636.74	0.75	1.10
Fe	21.28	1.38	2.46	36.55	2.37	8.56	10.60	0.69	1.37	27.98	1.81	3.65	20.77	1.34	1.27	11.77	0.76	1.12
K	1550.00	2.51	4.48	1400.00	2.27	8.19	1450.00	2.35	4.67	2350.00	3.80	7.67	1700.00	2.75	2.60	1550.00	2.51	3.68
Mg	16400.00	6.37	11.38	8100.00	3.15	11.38	12600.00	4.89	9.74	12450.00	4.83	9.75	21575.00	8.38	7.93	12625.00	4.90	7.19
Na	19201.36	1.86	3.33	28820.20	2.80	10.12	6893.45	0.67	1.33	13913.18	1.35	2.72	9740.86	0.95	0.90	7731.98	0.75	1.10
SO4	43919.55	3.41	6.09	2377.36	0.18	0.67	113.21	0.01	0.02	11433.96	0.89	1.79	679.25	0.05	0.05	20679.25	1.61	2.35
EC	442.50	3.44	6.14	253.00	1.97	7.11	439.50	3.41	6.79	350.50	2.72	5.49	518.00	4.02	3.81	472.50	3.67	5.38
			100			100			100			100			100			100
PoS		55.97			27.65			50.24			49.58			105.65				68.22
Τάξη		1			1			1			1			1				1
Υποκατηγορία		-			-			-			-			-				-
Υπάρχουσα παράμετρος		NO3			NO3			NO3			NO3			NO3, As				NO3
Χαρακτηρισμός		1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3			1/NO3,As				1/NO3

Π1.22. (συνέχεια)

	SR112	Qf	%	SR114	Qf	%	SR39	Qf	%	Γ3	Qf	%	EA55	Qf	%	Λ41	Qf	%
Παράμετρος																		
As	1.61	31.20	37.39	0.72	14.04	21.09	3.17	61.57	47.32	0.86	16.66	6.48	0.95	18.49	8.66	1.98	38.41	28.76
Pb	0.90	6.98	8.37	0.00	0.00	0.00	0.23	1.76	1.35	0.04	0.34	0.13	3.57	27.76	13.01	0.00	0.00	0.00
Cd	0.08	2.45	2.94	0.06	1.99	2.99	0.07	2.05	1.58	0.09	2.64	1.03	0.10	3.04	1.43	0.09	2.64	1.98
NH4	13.16	0.26	0.31	108.98	2.12	3.18	151.84	2.95	2.27	366.12	7.11	2.76	105.92	2.06	0.96	194.69	3.78	2.83
NO2	8.44	0.16	0.20	7.25	0.14	0.21	19.13	0.37	0.29	13.19	0.26	0.10	9.03	0.18	0.08	11.41	0.22	0.17
NO3	15622.54	18.20	21.81	20626.48	24.03	36.10	29215.92	34.04	26.16	152482.27	177.65	69.07	94365.64	109.94	51.52	41174.15	47.97	35.92
B	46.38	1.35	1.62	0.00	0.00	0.00	7.63	0.22	0.17	4.13	0.12	0.05	74.88	2.18	1.02	33.50	0.98	0.73
Cu	0.18	0.00	0.00	1.71	0.02	0.04	16.06	0.23	0.18	0.65	0.01	0.00	3.41	0.05	0.02	2.35	0.03	0.03
Mn	0.90	0.53	0.63	0.10	0.06	0.09	2.26	1.32	1.01	1.19	0.69	0.27	1.57	0.91	0.43	1.19	0.69	0.52
Ca	69450.00	6.74	8.08	91075.00	8.84	13.28	71525.00	6.94	5.34	96775.00	9.40	3.65	122450.00	11.89	5.57	101625.00	9.87	7.39
Cl	8757.78	0.68	0.82	8043.47	0.62	0.94	10700.22	0.83	0.64	50187.62	3.90	1.52	31253.31	2.43	1.14	10268.05	0.80	0.60
Fe	4.04	0.26	0.31	29.67	1.92	2.88	32.38	2.10	1.61	23.11	1.50	0.58	16.66	1.08	0.51	27.51	1.78	1.33
K	1850.00	2.99	3.59	1300.00	2.10	3.16	2800.00	4.53	3.48	3450.00	5.58	2.17	7650.00	12.38	5.80	6050.00	9.79	7.33
Mg	14625.00	5.68	6.81	14125.00	5.49	8.24	14625.00	5.68	4.37	47200.00	18.33	7.13	24175.00	9.39	4.40	22525.00	8.75	6.55
Na	9060.08	0.88	1.05	7849.33	0.76	1.14	10950.51	1.06	0.82	24390.81	2.37	0.92	26639.57	2.59	1.21	9497.06	0.92	0.69
SO4	21267.75	1.65	1.98	3073.93	0.24	0.36	10058.49	0.78	0.60	46433.96	3.61	1.40	31387.82	2.44	1.14	24458.15	1.90	1.42
EC	440.00	3.42	4.10	539.50	4.19	6.29	473.00	3.67	2.82	909.00	7.06	2.74	851.50	6.61	3.10	648.50	5.04	3.77
			100			100			100			100			100			100
PoS		83.45			66.57			130.11			257.21			213.40			133.56	
Τάξη		1			1			1			2			2			1	
Υποκατηγορία		-			-			-			c			b			-	
υρίαρχη παράμετρος		As, NO3			NO3, As			As, NO3			NO3			NO3			NO3, As	
Χαρακτηρισμός		1/As,NO3			1/NO3,As			1/As,NO3			2c/NO3			2b/NO3			1/NO3,As	

	Λ43	Qf	%	Λ53	Qf	%	Λ76	Qf	%
Παράμετρος									
As	1.02	19.73	10.88	1.08	20.91	33.14	0.04	0.78	0.61
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.08	2.55	1.40	0.01	0.23	0.37	0.07	2.17	1.71
NH4	154.90	3.01	1.66	41.63	0.81	1.28	112.04	2.18	1.72
NO2	11.41	0.22	0.12	10.81	0.21	0.33	7.25	0.14	0.11
NO3	96296.30	112.19	61.84	17740.74	20.67	32.75	73680.06	85.84	67.68
B	27.75	0.81	0.45	21.25	0.62	0.98	0.00	0.00	0.00
Cu	5.68	0.08	0.05	0.16	0.00	0.00	1.86	0.03	0.02
Mn	1.83	1.07	0.59	0.32	0.19	0.30	0.10	0.06	0.05
Ca	107225.00	10.41	5.74	55325.00	5.37	8.51	114600.00	11.13	8.77
Cl	21474.44	1.67	0.92	8895.25	0.69	1.09	12155.25	0.94	0.74
Fe	24.70	1.60	0.88	26.25	1.70	2.69	12.70	0.82	0.65
K	1700.00	2.75	1.52	1500.00	2.43	3.85	1950.00	3.16	2.49
Mg	31050.00	12.06	6.65	13325.00	5.17	8.20	23725.00	9.21	7.26
Na	28166.98	2.73	1.51	10582.86	1.03	1.63	14844.33	1.44	1.14
SO4	55442.71	4.31	2.37	1672.56	0.13	0.21	41168.27	3.20	2.52
EC	802.00	6.23	3.43	380.00	2.95	4.68	739.50	5.74	4.53
			100			100			
PoS		181.41			63.11			126.84	
Τάξη		2			1			1	
Υποκατηγορία		a			-			-	
υρίαρχη παράμετρος		NO3			As, NO3			NO3	
Χαρακτηρισμός		2a/NO3			1/As, NO3			1/NO3	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13ο

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ 2017

Πίνακας Π2.23. Υπολογισμός αρδευτικών αναγκών ανά καλλιέργεια και ανά στρέμμα για το 2017 με βάση την Κ.Υ.Α. Φ 16/6631/89

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ (Κ.Υ.Α)	ΕΤ _{c2017}	A	B	ΕΤ _{tot} =ΕΤ _c +A+B (m ³ /στρ)
Σιτάρι	-	0	0	0	0
Ζωοτροφές	II	583.5	58.35	87.53	729
Πυρηνόκαρπα	III	632.0	63.20	103.55	799
Μηλοειδή	III	632.0	63.20	104.28	799
Αμπελώνες	I	534.0	53.40	89.58	677
Αραβόσιτος	V	545.0	54.50	89.76	689
Βαμβάκι	III	472.5	47.25	79.05	599
Ελαιώνες	I	534.0	53.40	87.19	675
Καρποί με	III	632.0	63.20	102.81	798
Τεύτλα	IV	680.0	68.00	111.48	859
Όσπρια	III	632.0	63.20	105.00	800
Κηπευτικά	IV	680.0	68.00	111.48	859
Λοιπά	-	596.1	59.61	97.42	753

Πίνακας Π2.2. Υπολογισμός αποτελεσματικής βροχόπτωσης P_e (FAO, 1978)

	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	Άθροισμα
P	51.3	36.6	76.7	14.5	17.8	196.9
P_e	20.8	11.9	36.4	0.0	0.7	69.8

$P_e = 0.8 * P - 25$ αν $P > 75 \text{mm}$ / μήνα

$P_e = 0.6 * P - 10$ αν $P < 75 \text{mm}$ / μήνα

Πίνακας Π2.3. Υπολογισμός αρδευτικών αναγκών 2017 για το σύνολο των καλλιεργειών του ΤΟΕΒ Τυρνάβου

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΕΚΤΑΣΗ (στρ.)	ΕΤ _{crop} +A=B (m ³ /στρ)	Υπολογισμένες αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)	Προσφορά βροχόπτωσης ανά έκταση (m ³ /περίοδο)	Πραγματικές αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)
ΣΙΤΑΡΙ	24.00	6,734.24	0	0	0	0
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	9.20	2,581.284	729	1,882,724	180,070	1,702,654
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	21.28	5,969.49	799	4,768,145	416,432	4,351,713
ΜΗΛΟΕΙΔΗ	11.77	3,301.889	799	2,639,794	230,340	2,409,454
ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ	20.67	5,798.583	677	3,925,525	404,509	3,521,016
ΛΟΙΠΑ	13.08	3,668.347	753	2,762,719	255,904	2,506,815
Άθροισμα	100.00	28,053.83		15,978,907	1,487,255	14,491,652

Πίνακας Π2.4. Υπολογισμός αρδευτικών αναγκών 2017 για το σύνολο των καλλιεργειών του ΤΟΕΒ Αγίας Σοφίας

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΕΚΤΑΣΗ (στρ.)	ΕΤ _{crop} +A=B (m ³ /στρ)	Υπολογισμένες αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)	Προσφορά βροχόπτωσης ανά έκταση (m ³ /περίοδο)	Πραγματικές αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)
ΜΗΛΟΕΙΔΗ	20.87	7,147.67	799	5,714,416	498,621	5,215,795
ΣΙΤΑΡΙ	33.46	11,461.12	0	0	0	0
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	13.60	4,656.91	799	3,719,720	324,866	3,394,854
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	7.03	2,407.47	729	1,755,951	167,945	1,588,006
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ	6.58	2,252.18	689	1,552,340	157,112	1,395,227
ΛΟΙΠΑ	18.47	6,327.33	753	4,765,260	441,394	4,323,866
Άθροισμα	100.00	34252.68		17,507,687	1,589,939	15,917,748

Πίνακας Π2.5. Υπολογισμός αρδευτικών αναγκών 2017 για το σύνολο των καλλιεργειών του ΤΟΕΒ Αμπελώνα

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΕΚΤΑΣΗ (στρ.)	ΕΤ _{crop} +A=B (m ³ /στρ)	Υπολογισμένες αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)	Προσφορά βροχόπτωσης ανά έκταση (m ³ /περίοδο)	Πραγματικές αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	18.24	13,107.62	729	9,560,373	914,388	8,645,985

ΒΑΜΒΑΚΙ	17.60	12,647.43	599	7,573,279	882,285	6,690,995
ΣΙΤΑΡΙ	32.29	23,200.14	0	0	0	0
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ	8.80	6,322.39	689	4,357,767	441,050	3,916,718
ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ	4.89	3,516.62	677	2,380,682	245,319	2,135,363
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	5.73	4,117.23	799	3,288,650	287,218	3,001,432
ΛΟΙΠΑ	12.43	8,932.08	753	6,726,958	623,102	6,103,856
Άθροισμα	100.00	71,843.51		33,887,709	3,393,361	30,494,348

Πίνακας Π2.6. Υπολογισμός αρδευτικών αναγκών 2017 για το σύνολο των καλλιεργειών εκτός ΤΟΕΒ και εντός της κύριας περιοχής έρευνας

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΕΚΤΑΣΗ (στρ.)	ΕΤ _{crop} +A=B (m ³ /στρ)	Υπολογισμένες αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)	Προσφορά βροχόπτωσης ανά έκταση (m ³ /περίοδο)	Πραγματικές αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)
ΣΙΤΗΡΑ	31.68	9,581.58	0	0	0	0
ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ	7.75	2,344.16	677	1,586,947	163,528	1,423,419
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	10.43	3,154.30	729	2,300,665	220,044	2,080,621
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	11.12	3,364.49	799	2,687,392	234,707	2,452,685
ΒΑΜΒΑΚΙ	8.91	2,696.23	599	1,614,504	188,089	1,426,415
ΕΛΑΙΩΝΕΣ	8.58	2,593.71	675	1,749,681	180,937	1,568,744
ΚΑΡΠΟΙ ΜΕ	6.63	2,006.57	798	1,601,261	139,978	1,461,282
ΛΟΙΠΑ	14.89	4,505.04	753	3,392,852	314,272	3,078,581
Άθροισμα	100.00	30,246.06		14,933,301	1,441,554	13,491,747

Πίνακας Π2.7. Υπολογισμός αρδευτικών αναγκών 2017 για το σύνολο των καλλιεργειών της επιπλέον έκτασης της περιοχής προσομοίωσης

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΕΚΤΑΣΗ (στρ.)	ΕΤ _{crop} +A=B (m ³ /στρ)	Υπολογισμένες αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)	Προσφορά βροχόπτωσης ανά έκταση (m ³ /περίοδο)	Πραγματικές αρδ. ανάγκες (m ³ /περίοδο)
ΣΙΤΗΡΑ	49.77	76,756.62	0	0	0	0
ΒΑΜΒΑΚΙ	24.02	37,042.67	599	22,181,152	3,979,297	30,177,855
ΖΩΟΤΡΟΦΕΣ	8.34	12,869.77	729	9,386,888	897,795	8,489,093
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ	4.38	6,758.12	689	4,658,105	471,447	4,186,658

ΑΓΡΑΝΑΠΑΥΣΗ	3.89	6,000.70	0	0	0	0
ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΑ	1.02	1,571.59	859	1,350,749	109,634	1,241,115
ΟΣΠΡΙΑ	1.06	1,629.79	800	1,304,158	113,694	1,190,463
ΚΗΠΕΥΤΙΚΑ	1.06	1,641.36	859	1,410,714	114,501	1,296,212
ΕΛΑΙΩΝΕΣ	3.30	5,094.78	675	3,436,875	349,518	3,087,357
ΛΟΙΠΑ	3.16	4,869.94	650	3,165,458	345,526	3,162,316
Άθροισμα	100.00	154,235.34		58,870,097	6,035,886	52,834,211

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΑΝΤΛΗΣΕΩΝ (ΕΚΡΟΣΣ) ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΕ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

Πίνακας Π2.8. Κύμανση των φυτικών συντελεστών ανά μήνα άρδευσης και ανά καλλιέργεια στην περιοχή έρευνας (σύμφωνα με Παπαμιχαήλ & Μπαμπατζιμόπουλο, 2015)

	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Άθροισμα
ΒΑΜΒΑΚΙ	0.45	0.70	1.05	0.60	-	2.80
ΖΩΤΡΟΦΕΣ	0.40	0.95	0.95	0.95	0.95	4.20
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ	0.50	0.80	1.05	0.60	-	2.95
ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΑ	0.45	0.65	1.00	0.50	-	2.60
ΟΣΠΡΙΑ	0.40	0.80	1.15	1.00	0.40	3.75
ΚΗΠΕΥΤΙΚΑ	0.60	0.80	1.00	1.00	0.70	4.10
ΕΛΑΙΩΝΕΣ	0.40	0.45	0.50	0.50	0.40	2.25
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	0.50	0.90	1.15	0.90	0.80	4.25
ΜΗΛΟΕΙΔΗ	0.60	0.85	1.00	0.85	0.80	4.10
ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ	0.40	0.45	0.60	0.60	0.45	2.50
ΚΑΡΠΟΙ ΜΕ	0.50	0.80	1.10	0.85	0.65	3.90
ΛΟΙΠΑ	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	3.00

Πίνακας Π2.9. Υπολογισμός αρδευτικών αναγκών ανά καλλιέργεια (παράδειγμα για τον Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου, έτος 2000)

Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου	Έκταση (m ²)	Ποσοστό έκτασης	Ποσοστιαίος αριθμός γεωτρήσεων	Αρδευτικές ανάγκες ανά περίοδο (m ³ /period)
ΖΩΤΡΟΦΕΣ	2,581,284.00	0.12	4	1,832,875.76
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	5,969,490.00	0.28	8	4,238,717.44
ΜΗΛΟΕΙΔΗ	3,301,889.00	0.15	5	2,344,551.12
ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ	5,798,583.00	0.27	8	4,117,362.60
ΛΟΙΠΑ	3,668,347.00	0.17	5	2,604,759.60
ΣΥΝΟΛΟ	21,319,593.00	1.00	30	15,138,266.53

Πίνακας Π2.10. Καταμερισμός των αρδευτικών αναγκών ανά καλλιέργεια (Πίνακας Π2.9) στους μήνες άρδευσης, με βάση τους φυτικούς συντελεστές του πίνακα (Π2.8)

	Μηνιαίες αρδευτικές ανάγκες (m ³)					ΑΘΡΟΙΣΜΑ
	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	
ΖΩΤΡΟΦΕΣ	-174,560	-414,579	-414,579	-414,579	-414,579	-1,832,876
ΠΥΡΗΝΟΚΑΡΠΑ	-498,673	-897,611	-1,146,947	-897,611	-797,876	-4,238,717
ΜΗΛΟΕΙΔΗ	-343,105	-486,065	-571,842	-486,065	-457,473	-2,344,551
ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ	-658,778	-741,125	-988,167	-988,167	-741,125	-4,117,363
ΛΟΙΠΑ	-520,952	-520,952	-520,952	-520,952	-520,952	-2,604,760

Πίνακας Π2.11. Υπολογισμός ημερήσιων καταναλώσεων ανά γεώτρηση για τον Τ.Ο.Ε.Β. Τυρνάβου (2000)

Γεωτρήσεις ανά	Ημερήσιες καταναλώσεις γεωτρήσεων βάσει των αρδευτικών αναγκών (m ³ /day)				
	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος
4	-1,408	-3,455	-3,343	-3,343	-3,455
8	-2,011	-3,740	-4,625	-3,619	-3,324
5	-2,214	-3,240	-3,689	-3,136	-3,050
8	-2,656	-3,088	-3,985	-3,985	-3,088
5	-3,361	-3,473	-3,361	-3,361	-3,473

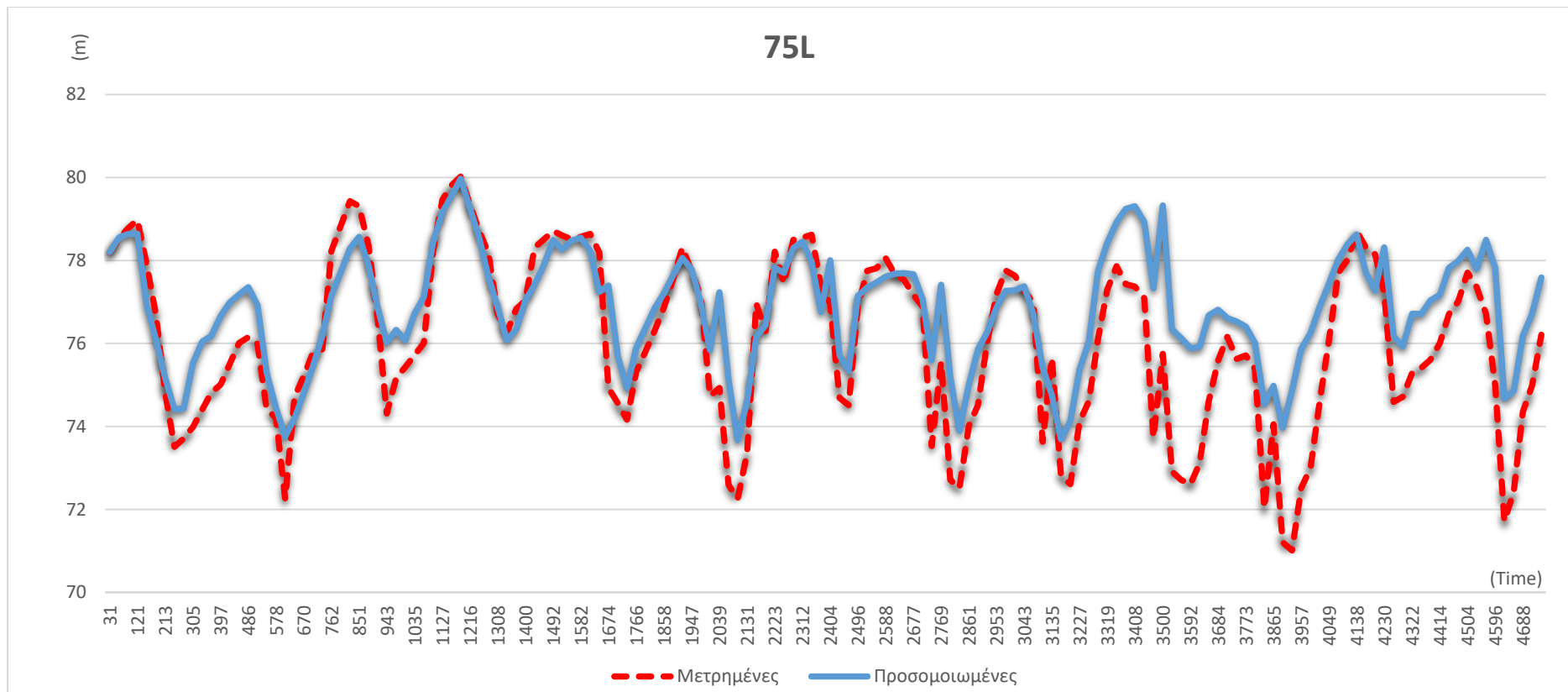
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΕΙΣΡΟΕΣ) ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΕ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ (ΒΑΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟ ΕΤΟΣ 2017)

Πίνακας Π2.12. Υπολογισμός ετήσιας τροφοδοσίας από τις γεωτρήσεις εισροής

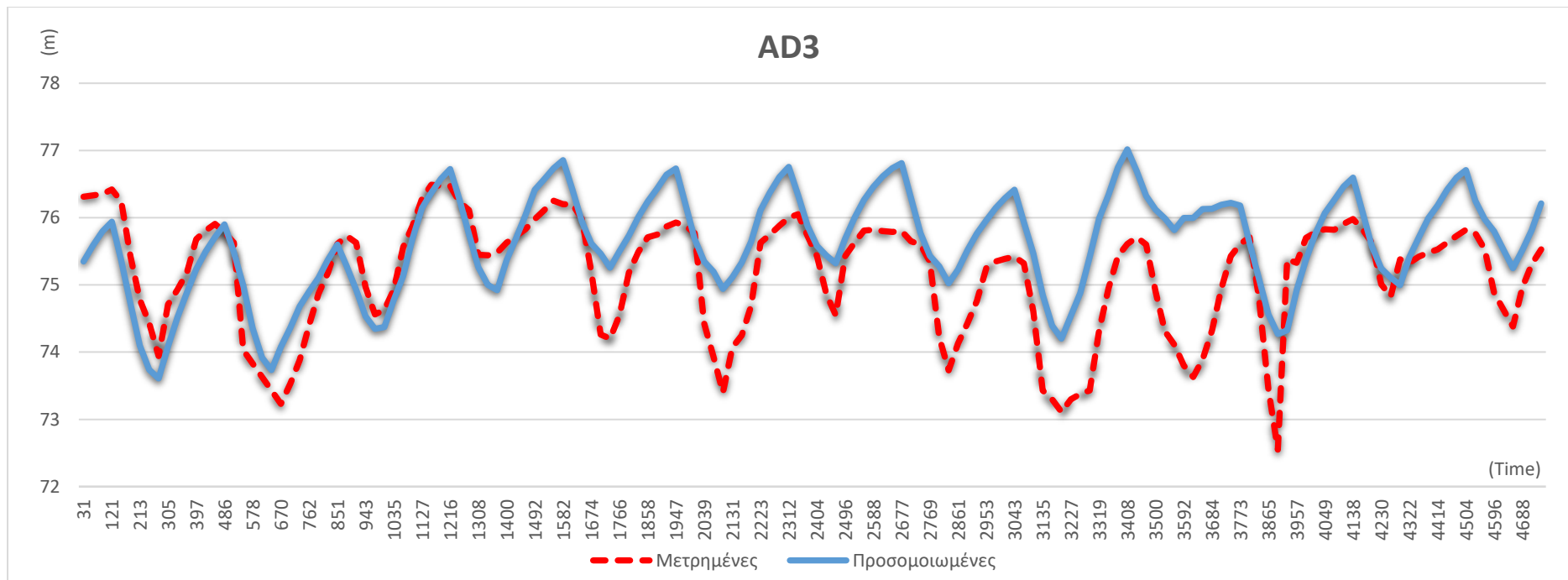
ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	SUM	Ετήσια τροφοδοσία από τις γεωτρήσεις εισροής
2000	14.1	38.0	24.7	13.0	25.7	16.0	0.8	3.6	9.6	40.8	25.6	16.0	227.9	9,320,353
2001	32.8	20.8	8.9	49.2	66.8	11.4	61.1	18.9	0.9	2.0	14.0	44.0	330.8	13,528,621
2002	13.0	15.0	45.0	58.0	6.0	0.0	35.0	36.0	122.0	88.0	31.0	130.0	579.0	23,679,176
2003	89.0	17.0	21.0	26.0	44.0	34.0	29.0	4.0	21.0	75.0	7.0	50.0	417.0	17,053,914
2004	87.0	7.0	31.0	42.0	56.0	92.0	6.0	0.0	18.0	52.0	25.0	32.0	448.0	18,321,711
2005	24.0	34.0	59.0	5.0	25.0	4.0	15.0	16.0	44.0	9.0	56.0	62.0	353.0	14,436,527
2006	121.6	37.8	42.2	36.1	1.5	9.1	28.2	10.4	108.7	116.3	11.4	13.0	536.3	21,932,888
2007	14.0	28.2	26.4	24.4	36.1	26.2	0.0	24.9	21.8	103.4	98.0	19.6	423.0	17,299,294
2008	3.3	18.3	12.2	41.7	3.6	12.7	29.2	2.8	64.8	18.5	20.6	61.7	289.4	11,835,498
2009	82.8	28.7	63.0	13.7	44.7	6.9	31.5	1.8	30.0	117.3	32.5	87.4	540.3	22,096,475
2010	20.0	58.0	48.0	9.0	51.0	10.0	45.0	14.0	62.0	127.0	36.0	19.0	499.0	20,407,442
2011	23.0	18.0	34.0	19.0	11.0	6.0	0.0	47.0	5.0	37.0	2.0	34.0	236.0	9,651,616
2012	14.0	60.0	40.0	47.0	87.0	0.0	0.0	3.0	42.0	40.0	73.0	85.0	491.0	20,080,268
2017	63.0	26.4	24.9	12.7	51.3	36.6	76.7	14.5	17.8	12.4	85.3	59.9	481.5	19,691,750

Πίνακας Π2.13. Υπολογισμός ημερήσιας τροφοδοσίας για κάθε γεώτρηση ανά ομάδα, για κάθε μήνα τους έτους 2017

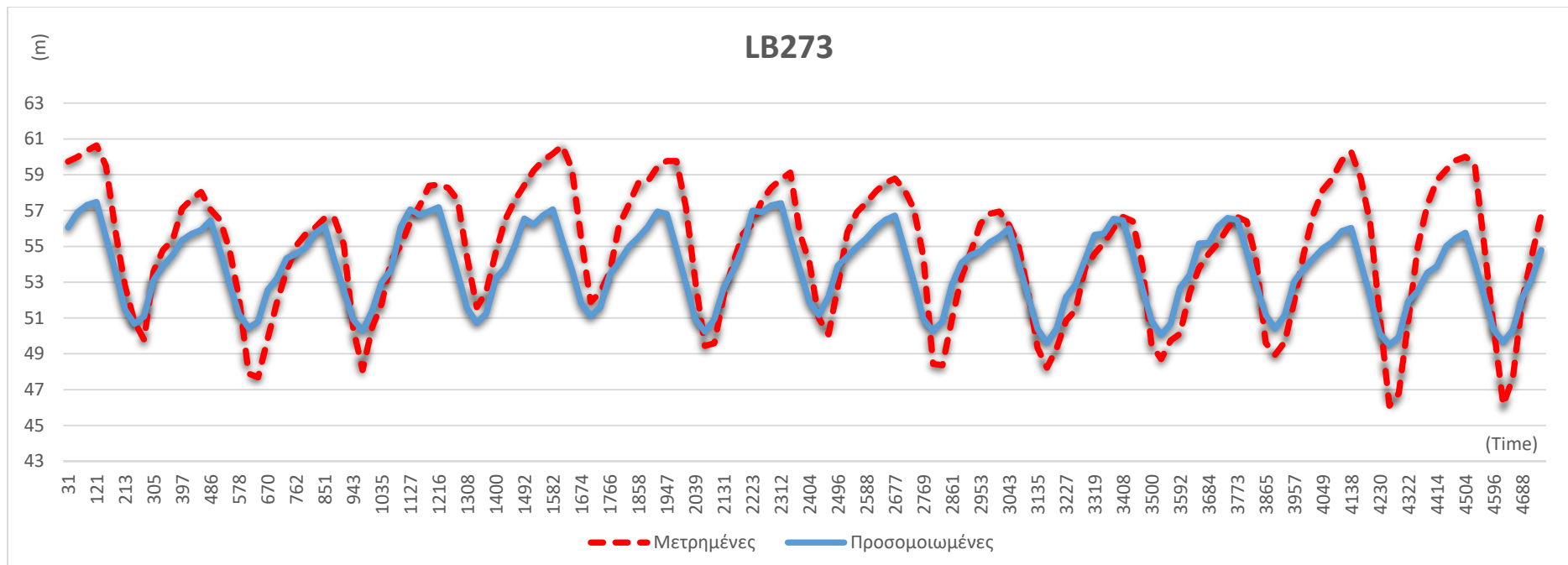
				Βροχόπτωση 2017											
				ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
				63.0	26.4	24.9	12.7	51.3	36.6	76.7	14.5	17.8	12.4	85.3	59.9
				Ημερήσια τροφοδοσία κάθε γεώτρησης της κάθε ομάδας, για κάθε μήνα τους έτους 2017											
	m ³ /day	Αριθμός γεωτρήσεων ομάδας	m ³ /year/ γεώτρηση												
Ομάδα γεωτρήσεων	350	8	127,750	539.2	250.2	213.1	112.3	439.1	323.7	656.4	124.1	157.4	106.1	754.4	512.7
Ομάδα γεωτρήσεων	400	50	146,000	616.2	285.9	243.6	128.4	501.8	369.9	750.2	141.8	179.9	121.3	862.2	585.9
Ομάδα γεωτρήσεων	450	7	164,250	693.2	321.6	274.0	144.4	564.5	416.2	844.0	159.6	202.4	136.4	969.9	659.1
Ομάδα γεωτρήσεων	1000	28	365,000	1540.5	714.7	608.9	320.9	1254.4	924.8	1875.6	354.6	449.8	303.2	2155.4	1464.7



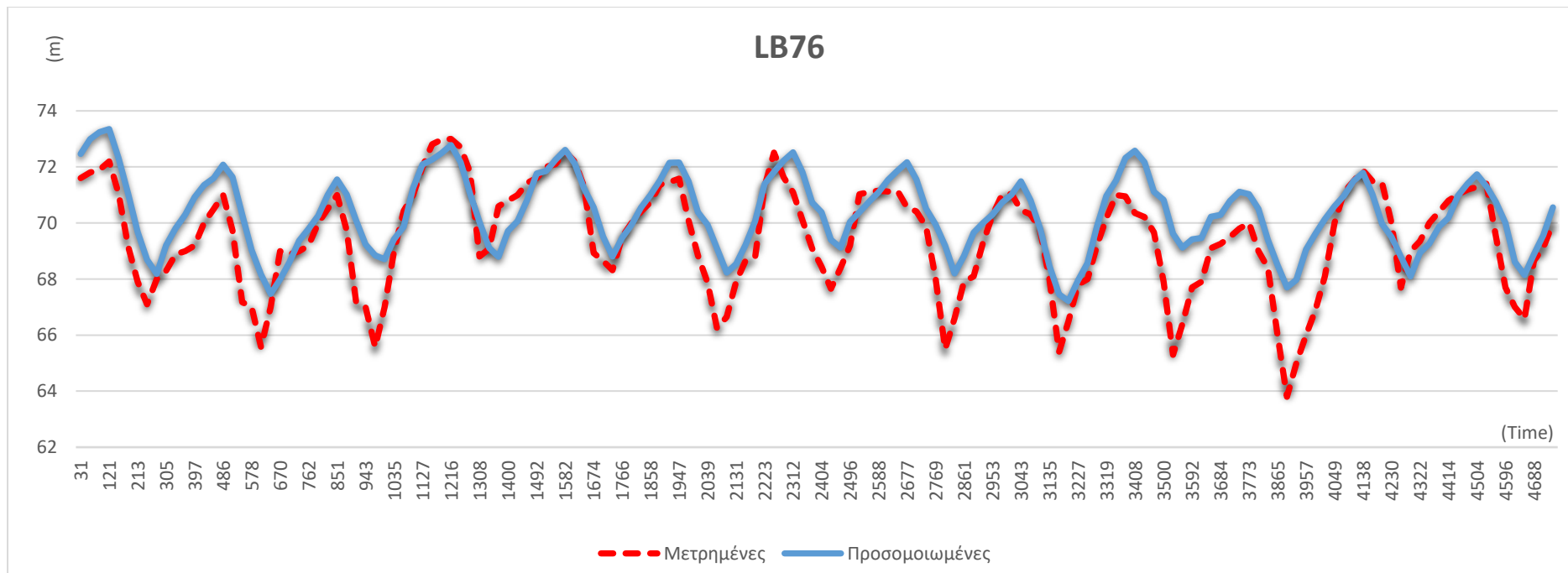
Διάγραμμα Π2.1. Υδρογράφημα γεώτρησης 75Λ (υπό-πίεση υδροφόρος), όπου συγκρίνονται η καταγεγραμμένη χρονοσειρά παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης με την παραγόμενη από το μοντέλο, κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής



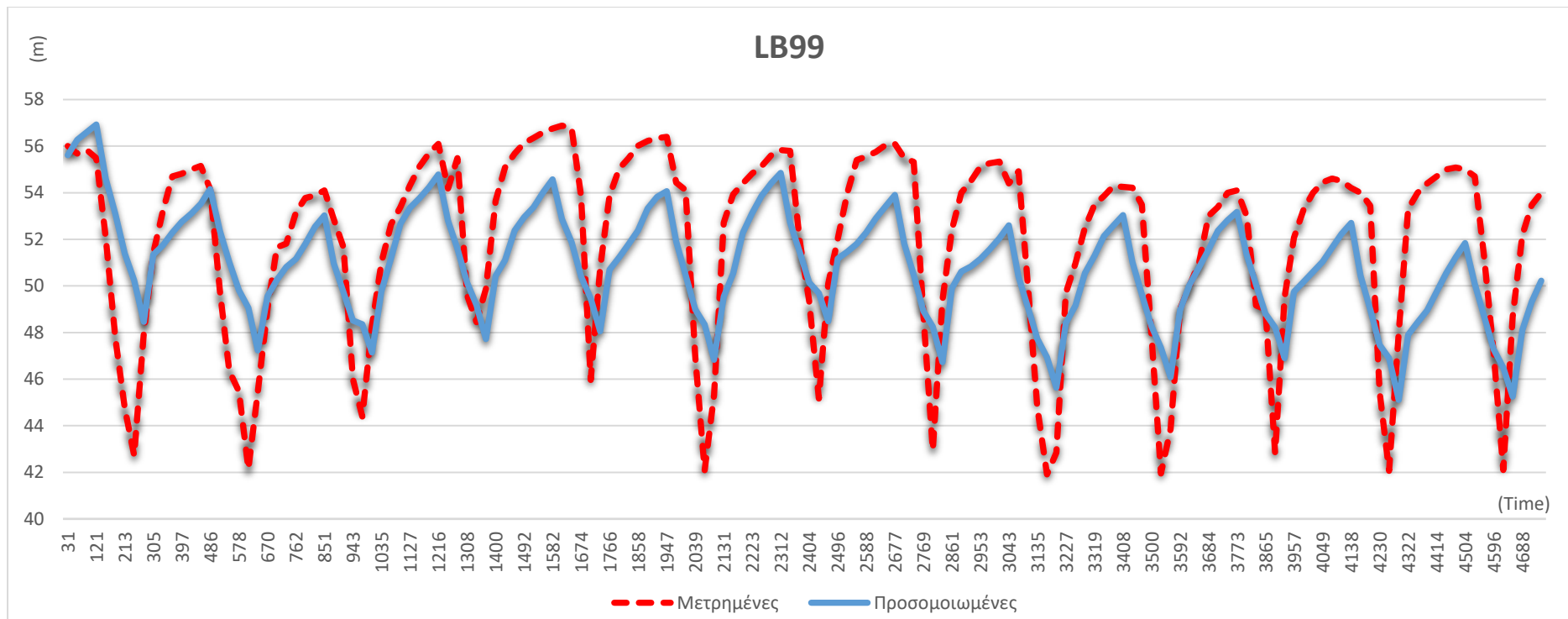
Διάγραμμα Π2.2 Υδρογράφημα πιεζομέτρου AD3 (υπό-πίεση υδροφόρος), όπου συγκρίνονται η καταγεγραμμένη χρονοσειρά παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης με την παραγόμενη από το μοντέλο, κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής



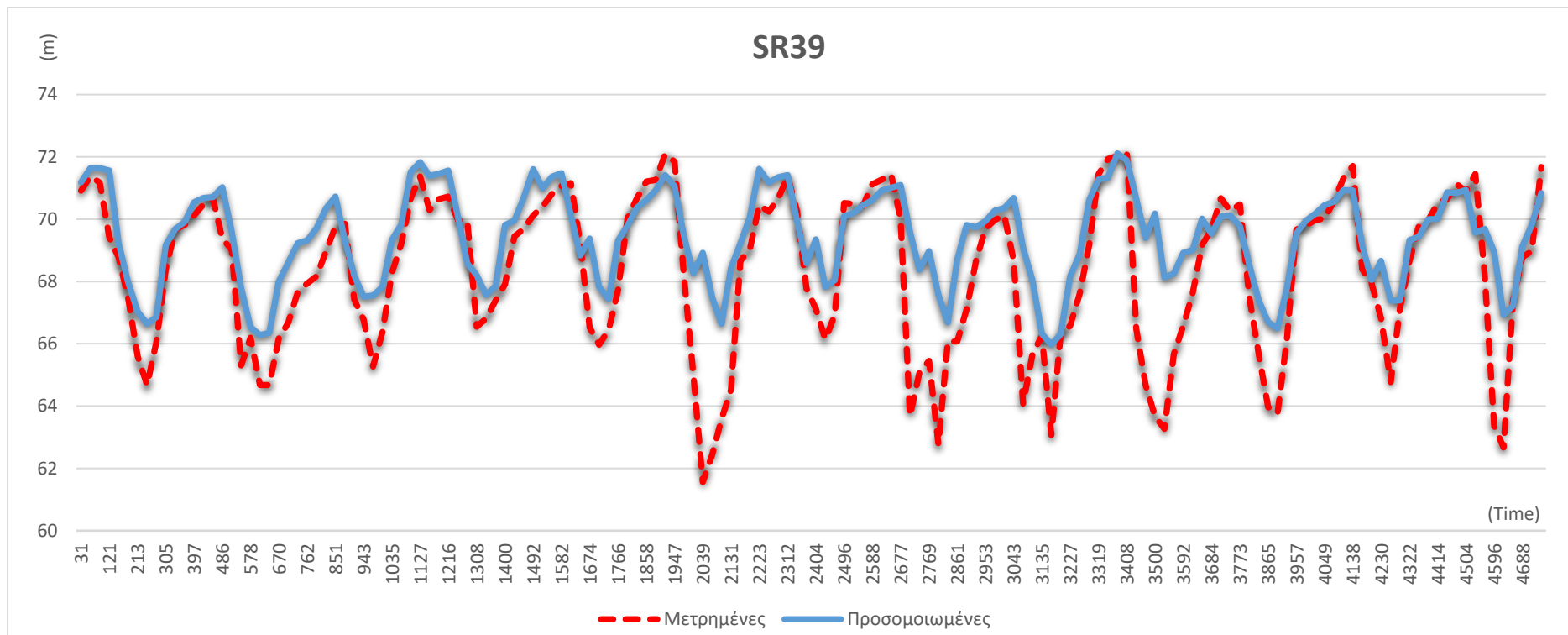
Διάγραμμα Π2.3. Υδρογράφημα πιεζομέτρου LB273 (υπό-πίεση υδροφόρος), όπου συγκρίνονται η καταγεγραμμένη χρονοσειρά παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης με την παραγόμενη από το μοντέλο, κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής



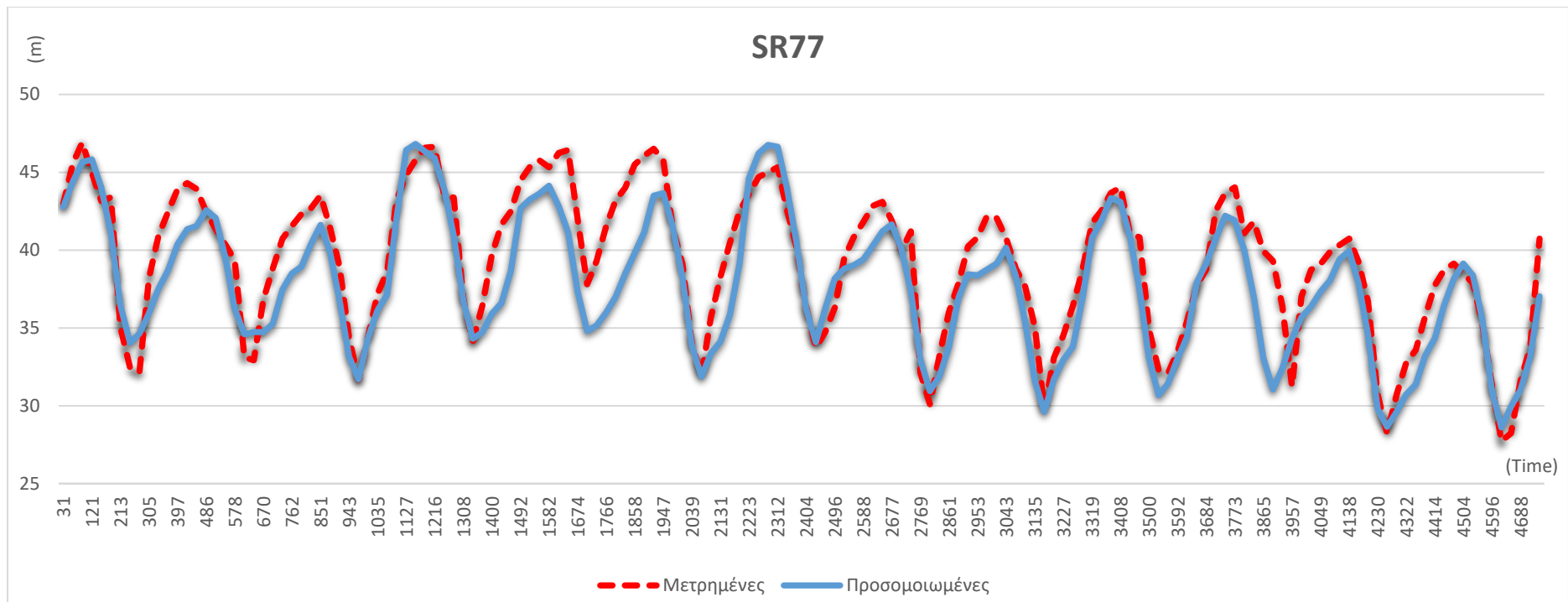
Διάγραμμα Π2.4. Υδρογράφημα γεώτρησης LB76 (υπό-πίεση υδροφόρος), όπου συγκρίνονται η καταγεγραμμένη χρονοσειρά παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης με την παραγόμενη από το μοντέλο, κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής



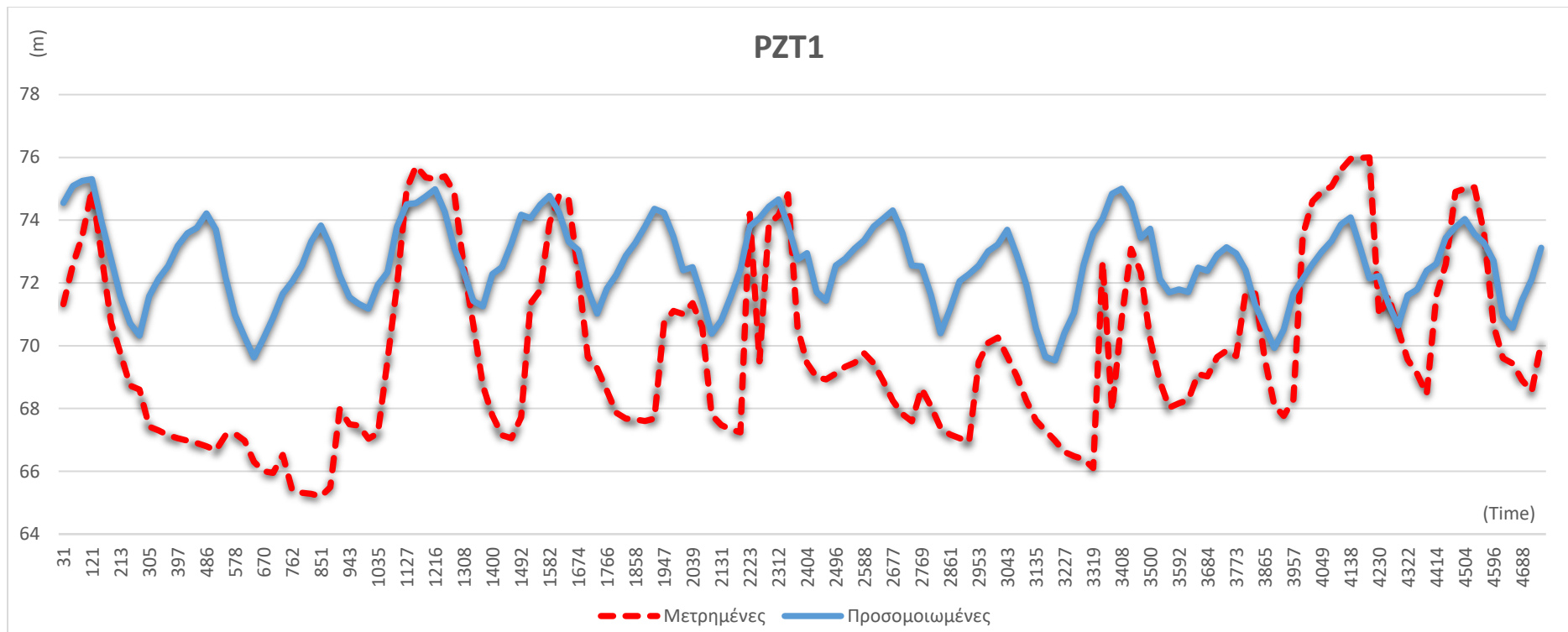
Διάγραμμα Π2.5. Υδρογράφημα γεώτρησης LB99 (υπό-πίεση υδροφόρος), όπου συγκρίνονται η καταγεγραμμένη χρονοσειρά παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης με την παραγόμενη από το μοντέλο, κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής



Διάγραμμα Π2.6. Υδρογράφημα γεώτρησης SR39 (υπό-πίεση υδροφόρος), όπου συγκρίνονται η καταγεγραμμένη χρονοσειρά παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης με την παραγόμενη από το μοντέλο, κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής



Διάγραμμα Π2.7. Υδρογράφημα γεώτρησης SR77 (υπό-πίεση υδροφόρος), όπου συγκρίνονται η καταγεγραμμένη χρονοσειρά παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης με την παραγόμενη από το μοντέλο, κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής



Διάγραμμα Π2.8. Υδρογράφημα πιεζομέτρου PzT1 (ελεύθερος υδροφόρος), όπου συγκρίνονται η καταγεγραμμένη χρονοσειρά παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης με την παραγόμενη από το μοντέλο, κατά τη διαδικασία ρύθμισης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής

