



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ, ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ & ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Κατανομή των πεδογενετικών μορφών φωσφόρου σε ατελώς αποστραγγιζόμενα
εδάφη της τάξης των Alfisols**

Μιχαέλα Ε. Καραλή

Επιβλέπων καθηγητής:

Διονύσιος Γασπαράτος, Καθηγητής ΓΠΑ

**ΑΘΗΝΑ
2023**

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Κατανομή των πεδογενετικών μορφών του φωσφόρου σε ατελώς
αποστραγγιζόμενα εδάφη της τάξης των Alfisols

Distribution of the pedogenic forms of phosphorus in poorly drained Alfisols

Μιχαέλα Ε. Καραλή

Εξεταστική επιτροπή:

Διονύσιος Γασπαράτος, Καθηγητής ΓΠΑ (Επιβλέπων)

Ιωάννης Μάσσας, Καθηγητής ΓΠΑ

Ορέστης Καΐρης, Επίκουρος Καθηγητής ΓΠΑ

Κατανομή των πεδογενετικών μορφών του φωσφόρου σε ατελώς αποστραγγιζόμενα εδάφη της τάξης των Alfisols

*ΠΜΣ Φυσικοί Πόροι, Γεωπεριβάλλον, Γεωπληροφορική & Γεωργική Μηχανική
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής
Εργαστήριο Εδαφολογίας & Γεωργικής Μηχανικής*

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετά την κατανομή των διαφόρων μορφών του φωσφόρου σε ελληνικά εδάφη της τάξης των Alfisols, λαμβάνοντας υπόψιν τον παράγοντα της υδρομορφίας. Η οργανική ύλη, τα δευτερογενή οξυυδροξείδια του σιδήρου και του αργιλίου, τα αργιλοπυριτικά ορυκτά και ο παράγοντας της υδρομορφίας παίζουν καταλυτικό ρόλο στη διαμόρφωση των δεξαμενών του φωσφόρου στα υπό μελέτη εδάφη. Η διαδικασία της διαδοχικής κλασμάτωσης του φωσφόρου, όπως αυτή περιγράφεται από τους Tissen and Moir (1993), μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις διαθέσιμες και μη μορφές του ανόργανου κι οργανικού φωσφόρου στα εδάφη.

Η έρευνα αυτή αποδεικνύει ότι στα κακώς αποστραγγιζόμενα εδάφη, όπου επικρατούν έντονα αναγωγικές συνθήκες, παρατηρείται μείωση του ολικού φωσφόρου. Σημαντική ελάττωση σημειώνεται και στις δεξαμενές του ανόργανου φωσφόρου, όπως προκύπτει κυρίως από τη διαλυτοποίηση των οξυυδροξειδίων του σιδήρου και του αργιλίου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζει το γεγονός ότι ο οργανικός φώσφορος αυξάνεται στα κακώς αποστραγγιζόμενα εδάφη, συμβάλλοντας στον περιορισμό της συνολικής απώλειας φωσφόρου. Στα ατελώς αποστραγγιζόμενα εδάφη, όπου επικρατούν εναλλασσόμενες οξειδοαναγωγικές συνθήκες, η απώλεια του ανόργανου φωσφόρου δεν αντισταθμίζεται από τη συσσώρευση του οργανικού φωσφόρου.

Επιστημονική περιοχή: Εδαφολογία

Λέξεις κλειδιά: φώσφορος, κλασμάτωση φωσφόρου, ατελώς αποστραγγιζόμενα εδάφη, Alfisols

Distribution of the pedogenic forms of phosphorus in poorly drained Alfisols

*MSc Natural resources, Geoenvironment, Geoinformatics and Agricultural Engineering
Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering (NRD&AE)
Laboratory of Soil Science & Agricultural Engineering*

Abstract

The present thesis studies the distribution of different forms of phosphorus in Greek Alfisols, considering the soil hydromorphology. Organic matter, secondary iron and aluminium oxyhydroxides, clay minerals and the hydromorphology factor play a catalytic role in the formation of phosphorus pools in the under study soils. The process of sequential fractionation of phosphorus, as described by Tiessen and Moir (1993), provides information on the available and unavailable forms of inorganic and organic phosphorus.

This research demonstrates that in poorly drained soils, where strongly reducing conditions prevail, there is a decrease in total phosphorus. A significant reduction also occurs in the inorganic phosphorus pools, as it results from the dissolution of iron and aluminium oxyhydroxides.

On the other hand, organic phosphorus is increased in poorly drained soils, helping to limit overall phosphorus losses. In moderate drained soils, where alternating redox conditions prevail, the loss of inorganic phosphorus is not compensated by the accumulation of organic phosphorus.

Specific area: Soil Science

Keywords: phosphorus, phosphorus fractionation, poorly drained soils, Alfisols

Δήλωση Έργου

Η κάτωθι υπογεγραμμένη φοιτήτρια Μιχαέλα Καραλή, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα Πτυχιακή Εργασία με τίτλο «Κατανομή των πεδογενετικών μορφών του φωσφόρου σε ατελώς αποστραγγιζόμενα εδάφη της τάξης των Alfisols», οι πηγές και τα ηλεκτρονικά αρχεία που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή ΓΠΑ κ. Διονύσιου Γασπαράτου, αποτελεί αποκλειστικά δικό μου, μη υποβοηθούμενο πόνημα, δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής.

Τα σημεία όπου έχουν χρησιμοποιηθεί ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή, ενώ η σχετική αναφορά συμπεριλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Δηλώνω επίσης, ότι η παρούσα εργασία, δεν έχει υποβληθεί ποτέ πριν για οποιονδήποτε λόγο ή για εξέταση σε οποιοδήποτε άλλο πανεπιστήμιο ή εκπαιδευτικό ίδρυμα της χώρας ή του εξωτερικού. Η εργασία αποτελεί προϊόν συνεργασίας μου με τον επιβλέποντα καθηγητή μου.

Συμπληρωματικά και με τη συναίνεσή μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή -από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ- για να διασταυρωθεί η πρωτοτυπία της.

Τα πνευματικά δικαιώματα της πτυχιακής εργασίας ανήκουν στην φοιτήτρια. Επιτρέπεται η δημοσίευση των αποτελεσμάτων της εργασίας σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια από την φοιτήτρια ή/και τον επιβλέποντα καθηγητή, υπό τον όρο της αναφοράς των ονομάτων και των δύο (φοιτητή και επιβλέποντα καθηγητή) και της προηγούμενης ενημέρωσης του μη συμμετέχοντος στη δημοσίευση. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα, όπως αυτά εκφράζονται με την ακόλουθη άδεια των Creative Commons.



Μιχαέλα Καραλή

29/10/2023

Ευχαριστίες

Αθήνα 2023

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε από τη μεταπτυχιακή φοιτήτρια Καραλή Μιχαέλα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κατά το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023 υπό την επίβλεψη του καθηγητή Γασπαράτου Διονύσιου.

Θα ήθελα λοιπόν να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου στον καθηγητή μου για την ανάθεση του θέματος, την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα, την υπομονή και το ενδιαφέρον που υπέδειξε, καθώς και το χρόνο που διέθεσε για την διεκπεραίωση της μεταπτυχιακής διατριβής. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής τον καθηγητή κύριο Ιωάννη Μάσα και τον καθηγητή Ορέστη Καΐρη για τις πολύτιμες διορθώσεις και τις παρατηρήσεις τους και τον χρόνο που αφιέρωσαν για να διορθώσουν την παρούσα διατριβή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στο Εργαστήριο Εδαφολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την υλοποίηση όλων των πειραματικών μετρήσεων και την άψογη συνεργασία με τους υπόλοιπους καθηγητές του εργαστηρίου. Η καθοδήγηση κι οι συμβουλές τους ήταν υψίστης σημασίας στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Το μεγαλύτερό μου όμως ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου: τους γονείς μου, Βαγγέλη και Νίκη και την αδερφή μου, Εύα. Κάθε μέρα μου αποδεικνύουν την εμπιστοσύνη τους και μου δίνουν κίνητρα για να συνεχίσω μέχρι να πραγματοποιήσω τους στόχους και τα όνειρά μου. Πέραν όμως από την πολύτιμη αυτή στήριξη, τους ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου γιατί μου δίδαξαν πρώτα να είμαι σωστός και τίμιος Άνθρωπος κι έπειτα καλή φοιτήτρια.

Η προσπάθεια, η επιμονή, ο ζήλος, η όρεξη κι η αγάπη για δουλειά αποτέλεσαν τον ακρογωνιαίο λίθο στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Με εκτίμηση,
Καραλή Μιχαέλα

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	1
1.1. Η τάξη των Alfisols	1
1.2. Η σημασία του φωσφόρου	2
1.2.1. Ο φώσφορος στα φυτά	2
1.2.2. Μορφές φωσφόρου στο έδαφος	2
1.2.3. Κύκλος του φωσφόρου	3
1.2.4. Κλασμάτωση του εδαφικού φωσφόρου	4
1.2.5. Κλασμάτωση του εδαφικού φωσφόρου σε εδάφη της τάξης των Alfisols	6
1.3. Υδρομορφία εδαφών	8
1.3.1. Συνθήκες υδρομορφίας των Alfisols	9
2. Περιβάλλον	10
2.1. Περιοχή Μελέτης	10
2.2. Κλίμα περιοχής μελέτης	11
2.3. Γεωλογία περιοχής μελέτης	12
3. Υλικά και Μέθοδοι	14
3.1. Φυσικές και χημικές ιδιότητες εδαφικών δειγμάτων	14
3.2. Διαδικασία κλασμάτωσης φωσφόρου εδαφικών δειγμάτων	14
4. Αποτελέσματα και Συζήτηση	15
4.1. Περιγραφές εδαφοτομών και αναλυτικά δεδομένα	15
4.1.1. Περιγραφή εδαφοτομής P1 και βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφικών οριζόντων	15
4.1.2. Περιγραφή εδαφοτομής P2 και βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφικών οριζόντων	16
4.1.3. Περιγραφή εδαφοτομής P3 και βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφικών οριζόντων	17
4.2. Αποτελέσματα της κατανομής του ολικού φωσφόρου και των διαφορετικών του μορφών στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3	19
4.2.1. Αποτελέσματα του ολικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3	19
4.2.2. Αποτελέσματα του κλάσματος Resin-P στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3	21

4.2.3. Αποτελέσματα των κλασμάτων NaHCO_{3i} και NaHCO_{3o} στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3	23
4.2.4. Αποτελέσματα των κλασμάτων NaOH_o και NaOH_i στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3	25
4.2.5. Αποτελέσματα του κλάσματος του υπολειμματικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3	27
4.2.6. Αποτελέσματα του γεωχημικού και βιολογικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3	29
4.2.7. Κατανομή των διαφόρων κλασμάτων του φωσφόρου σε σχέση με τη συνολική ποσότητα του φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3	31
5. Συμπεράσματα	33
6. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	34
7. Ελληνική Βιβλιογραφία	38

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Η κατανομή των εδαφών στην περιοχή μελέτης του νομού Καρδίτσας.

Διάγραμμα 2: Το ομβροθερμικό διάγραμμα της περιοχής του σταθμού Καρδίτσομαγούλας κατά την περίοδο 2015-2021.

Διάγραμμα 3: Κατανομή του ολικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Διάγραμμα 4: Κατανομή του κλάσματος Resin-P στις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Διάγραμμα 5: Κατανομή των κλασμάτων NaHCO_3i και NaHCO_3o στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Διάγραμμα 6: Κατανομή των κλασμάτων NaOH_o και NaOH_i στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Διάγραμμα 7: Κατανομή του κλάσματος του υπολειμματικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Διάγραμμα 8: Κατανομή του γεωχημικού και βιολογικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Διάγραμμα 9: Κατανομή των διαφόρων κλασμάτων του φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ο παγκόσμιος κύκλος του φωσφόρου (Ruttenberg, 2001).

Εικόνα 2: Γεωλογικός χάρτης της Δυτικής Θεσσαλίας (Apostolidis and Koukis, 2013).

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Μετρήσεις του σταθμού Καρδιτσομαγούλας για την περίοδο 2015-2021
(meteo.gr).

Πίνακας 2: Περιγραφή της εδαφοτομής P1.

Πίνακας 3: Περιγραφή της εδαφοτομής P2.

Πίνακας 4: Περιγραφή της εδαφοτομής P3.

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Η κλασμάτωση φωσφόρου με τη μέθοδο Tiessen and Moir (1993).

Πρόλογος

Ο φώσφορος αποτελεί απαραίτητο θρεπτικό συστατικό των φυτών και ταυτόχρονα συμβάλλει στην επίτευξη διαφόρων βιολογικών λειτουργιών και βιοχημικών αντιδράσεων των φυτών. Θεωρείται πολύ ευκίνητο στοιχείο μέσα στα φυτά, σε αντίθεση με το έδαφος όπου καθίσταται ιδιαίτερα δυσκίνητος. Οι συνθήκες αποστράγγισης ενός εδάφους σχετίζονται με τον συνεχή ή περιοδικό κορεσμό και τη μείωση του κορεσμού του εδάφους με νερό, ενώ παρουσιάζουν μεταβλητότητα σε σχέση με το βάθος του εδάφους (Keys to Soil Taxonomy, 2022).

Λαμβάνοντας υπόψιν τη μεγάλη πεδογενετική σημασία του φωσφόρου, η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετά την κατανομή των διαφόρων μορφών του σε ελληνικά εδάφη της τάξης των Alfisols, λαμβάνοντας υπόψιν τον παράγοντα της υδρομορφίας. Οι υπό μελέτη εδαφοτομές βρίσκονται στο νοτιοανατολικό τμήμα του νομού Καρδίτσας και περιλαμβάνουν τις θέσεις Γεφύρια και Καπαδοκικό. Επιλέχθηκαν τρεις εδαφοτομές της τάξης των Alfisols (P1, P2 και P3), οι οποίες διαφέρουν ως προς τον παράγοντα της υδρομορφίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας μελέτης γίνεται αναφορά στην τάξη των Alfisols και στον κύκλο του εδαφικού φωσφόρου. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στη διαδικασία της διαδοχικής κλασμάτωσης, όπως αυτή περιγράφεται από τους Tiessen and Moir (1993), καθώς και στην εφαρμογή της σε εδάφη της τάξης των Alfisols. Επιπρόσθετα, αναλύεται η σημασία των συνθηκών αποστράγγισης του εδάφους, καθώς επίσης η επίδρασή τους στη διαθεσιμότητα των διαφόρων μορφών του φωσφόρου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η περιοχή μελέτης, η γεωλογία της περιοχής και οι κλιματικοί παράγοντες όπως αναλύθηκαν το χρονικό διάστημα 2015-2021.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των εδαφικών δειγμάτων, ενώ δίνεται αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας της διαδοχικής κλασμάτωσης του φωσφόρου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι τρεις εδαφοτομές και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εδαφικών ιδιοτήτων τους. Στο ίδιο κεφάλαιο πραγματοποιείται συζήτηση των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω της διαδικασίας της διαδοχικής κλασμάτωσης του φωσφόρου των τριών εδαφοτομών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη, ενώ στο τέλος επισυνάπτεται τόσο η ξενόγλωσση όσο κι η ελληνική βιβλιογραφία, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή αυτής της έρευνας.

1. Εισαγωγή

1.1. Η τάξη των Alfisols

Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης εδαφών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, οι κύριες ομάδες εδαφών είναι οι παρακάτω: Oxisols, Ultisols, Alfisols, Mollisols, Entisols, Inceptisols, Vertisols, Aridisols, Andisols, Histosols, Gelisols και Spodosols (Sanchez and Logan, 1992). Τα Alfisols αποτελούν μια κατηγορία έντονα αποσαθρωμένων και ταυτόχρονα καλλιεργήσιμων εδαφών με επαρκή περιεκτικότητα σε νερό για τουλάχιστον τρεις μήνες της καλλιεργητικής περιόδου. Καταλαμβάνουν το 9.6% των εδαφών σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ απαντώνται σε ζεστές, υγρές περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου και σε ημίξηρες, τροπικές και μεσογειακές περιοχές των δυο ημισφαιρίων.

Οι υποτάξεις των Alfisols είναι οι παρακάτω: i. Aqualfs, ii. Cryalfs, iii. Udalfs, iv. Ustalfs και v. Xeralfs. Στην Παγκόσμια Βάση Αναφοράς για Εδαφικούς Πόρους ("WRB"), τα περισσότερα Alfisols ταξινομούνται ως Luvisols ή Lixisols, αλλά μερικά ταξινομούνται ως Retisols ή Nitisols. Τα Aqualfs είναι κυρίως Stagnosols ή Planosols. Κυριαρχούν σε πολλές περιοχές, όπως στη Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών, στη περιοχή της Βαλτικής και στη κεντρική ευρωπαϊκή Ρωσία, στα ξηρότερα μέρη της χερσονήσου της Ινδίας, στο Σουδάν, στην Αφρική και σε πολλά μέρη της Νότιας Αμερικής.

Χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο στη γεωργία όσο και στη δασοκομία και είναι πιο εύκολο να διατηρηθούν γόνιμα σε σύγκριση με άλλα εδάφη που έχουν υγρό κλίμα. Τα Alfisols αντιπροσωπεύουν μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες εδαφών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τροφίμων και φυτικών ινών. Έχουν συχνά καλά ανεπτυγμένους εδαφικούς ορίζοντες που είναι πλούσιοι σε ορυκτά που περιέχουν αργίλιο και σίδηρο αλλά με χαμηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο.

Τα Alfisols έχουν μικρούς σε πάχος O και A ορίζοντες, διότι γενικά σχηματίζονται κυρίως από δασική βλάστηση. Έχουν έντονα διακριτό ελουβιακό E ορίζοντα λόγω της απομάκρυνσης του αργιλίου και του σιδήρου που αιωρούνται με τη μορφή κολλοειδών, ενώ αποτελούν εκείνα τα εδάφη που καθορίζονται από την παρουσία του αργιλικού ορίζοντα Bt. Μπορεί επίσης να έχουν fragipan, duripan, kandic, natric ορίζοντα ή άλλα χαρακτηριστικά, προκειμένου να καθοριστούν οι μεγάλες ομάδες της τάξης (Baillie, 2001). Ο βαθμός κορεσμού με βάσεις και το pH μειώνονται με το βάθος στα Alfisols, φθάνουν σε ελάχιστο στους E ορίζοντες και στη συνέχεια αυξάνονται πάλι με το βάθος. Τα Alfisols σχηματίζονται από ελουβίωση πυριτικής αργίλου από τους A και E στους Bt ορίζοντες. Η κίνηση της αργίλου στους προαναφερθέντες ορίζοντες είναι το αποτέλεσμα τριών διεργασιών: i) διασποράς, ii) μεταφοράς και iii) εναπόθεσης (Jenny, 1980).

Χαρακτηρίζονται από έναν υποεπιφανειακό ορίζοντα εμπλουτισμένο με πυριτική άργιλο και υψηλή γονιμότητα, που αντιστοιχεί σε αργιλικό (argillic), kandic ή natric ορίζοντα ("Natural Resources Conservation Service USDA.: Alfisols"). Αυτός ο ορίζοντας έχει υποστεί μέτρια έκπλυση και ο βαθμός κορεσμού σε βάσεις βρίσκεται σε ποσοστό μεγαλύτερο από 35%, που σημαίνει ότι το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το κάλιο βρίσκονται σε σχετική αφθονία. Ο ορίζοντας καλείται natric εάν, πέραν της συσσώρευσης της αργίλου, είναι κορεσμένος με νάτριο σε ποσοστό μεγαλύτερο από 15% και έχει πρισματική ή σπηλοειδή δομή, ενώ χαρακτηρίζεται

kandic στην περίπτωση που τα αργιλικά ορυκτά εμφανίζουν χαμηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων.

Στην παρούσα μελέτη τα εξεταζόμενα εδάφη ανήκουν στην υπόταξη των Xeralsfs, στην οποία ανήκουν τα Alfisols που συναντώνται σε περιοχές με πολύ ξηρά καλοκαίρια και υγρούς χειμώνες (μεσογειακές συνθήκες).

1.2. Η σημασία του φωσφόρου

1.2.1. Ο φώσφορος στα φυτά

Ο φώσφορος είναι ένα από τα 17 απαραίτητα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται τα φυτά για την αύξηση και την ανάπτυξή τους και θεωρείται ένα από τα κύρια θρεπτικά στοιχεία μαζί με το άζωτο (N) και το κάλιο (K). Συμμετέχει σε πολλές βιολογικές λειτουργίες και βιοχημικές αντιδράσεις των φυτών, ενώ η σπουδαιότερη συνεισφορά του είναι στην αποθήκευση και μεταφορά της ενέργειας μέσω της οργανικής ένωσης αδενοσίνου τριφωσφορικού οξύ (ATP) (Brady and Weil, 1996). Αποτελεί βασικό συστατικό της γενετικής βάσης όλων των οργανισμών, του δεσοξυριβονουκλεϊνικού οξέος (DNA) και του ριβονουκλεϊνικού οξέος (RNA) και μερικές από τις κυριότερες διεργασίες στις οποίες συμμετέχει είναι η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, η διαίρεση των κυττάρων και η καρποφορία.

Ο φώσφορος είναι ένα από τα πιο σημαντικά μακροθρεπτικά συστατικά στη φύση, καθώς σχεδόν όλες οι βιοχημικές διεργασίες, τόσο στη πανίδα όσο και τη χλωρίδα, απαιτούν φώσφορο για την επιτυχή πραγματοποίησή τους (Bate et al., 2008). Ο φώσφορος είναι πολύ ευκίνητο στοιχείο μέσα στα φυτά και σε περιπτώσεις μειωμένης διαθεσιμότητας μετακινείται από παλαιούς σε νεότερους ιστούς. Επομένως, τα συμπτώματα έλλειψής του εμφανίζονται πρώτα στα παλαιότερα τμήματα των φυτών (Παναγιωτόπουλος Κ., 2008). Φυτά με έλλειψη φωσφόρου παρουσιάζουν μειωμένη ανάπτυξη κι ένα κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η εμφάνιση σκοτεινού κυανοπράσινου χρωματισμού στους βλαστούς και τα φύλλα τους.

1.2.2. Μορφές φωσφόρου στο έδαφος

Ο φώσφορος απαντάται τόσο σε ανόργανες όσο και σε οργανικές μορφές στο έδαφος κι αυτές οι δυο μορφές απαρτίζουν τον συνολικό φώσφορο του εδάφους. Παρότι η συγκέντρωση του συνολικού φωσφόρου στο έδαφος είναι υψηλή, το 80% αυτού του φωσφόρου είναι ακινητοποιημένο και δεν μπορεί να προσληφθεί από τα φυτά. Το 30-65% του συνολικού φωσφόρου του εδάφους βρίσκεται σε οργανικές μορφές (Harrison, 1987), οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες στα φυτά, ενώ το υπόλοιπο 35-70% βρίσκεται σε ανόργανες μορφές (Rishid, 2019). Η δυναμική του φωσφόρου στη ριζόσφαιρα ελέγχεται κυρίως από την ανάπτυξη και τη λειτουργία των ριζών των φυτών, και επίσης σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους (Neumann και Römheld, 2002).

Η μορφή του φωσφόρου που βρίσκεται εγκλωβισμένη στην οργανική ουσία αποκαλείται ως οργανικός φώσφορος (P_o). Τις οργανικές μορφές του φωσφόρου απαρτίζουν τα νεκρά φυτικά και ζωικά υπολείμματα καθώς και οι μικροοργανισμοί του εδάφους. Ο οργανικός

φώσφορος μπορεί να απελευθερωθεί μέσω διεργασιών ανοργανοποίησης όπου πραγματοποιείται μέσω των οργανισμών του εδάφους καθώς και των ριζών των φυτών με την έκκριση της φωσφατάσης (Shen et al., 2011). Ποσοστό 15% έως 80% του φωσφόρου στα εδάφη εμφανίζεται σε οργανικές μορφές, η ακριβής ποσότητα του οποίου εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία, τις φυσικοχημικές ιδιότητες, το pH και το Eh του εδάφους, επιδρώντας στη συνολική βιοδιαθεσιμότητα του φωσφόρου στο έδαφος (Turner et al., 2007).

Οι ανόργανες μορφές του φωσφόρου ταξινομούνται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες:

- i. **στον δεσμευμένο P σε δυσδιάλυτες ανόργανες ενώσεις:** πρόκειται για πρωτογενή και δευτερογενή φωσφορικά ορυκτά του εδάφους. Στην κατηγορία των πρωτογενών ορυκτών του φωσφόρου ανήκουν ο απατίτης, ο στρενγκίτης και ο βαρισίτης. Στα δευτερογενή ορυκτά του φωσφόρου περιλαμβάνονται τα φωσφορικά άλατα του σιδήρου (Fe), του αργιλίου (Al) και του ασβεστίου (Ca),
- ii. **στον προσροφημένο P στην άργιλο:** πρόκειται για ανόργανο φώσφορο προσροφημένο σε επιφάνειες των αργιλικών ορυκτών, των οξειδίων του σιδήρου (Fe) και του αργιλίου (Al) του εδάφους,
- iii. **στον διαθέσιμο P του εδαφικού διαλύματος:** πρόκειται για ανόργανο φώσφορο που είναι άμεσα διαθέσιμος για πρόσληψη από τα φυτά.

Ο φώσφορος προσροφάται από τις ρίζες των φυτών κυρίως ως αρνητικά φορτισμένα ορθοφωσφορικά ιόντα (H_2PO_4^- και HPO_4^{2-}) που υπάρχουν στο εδαφικό διάλυμα (Shen et al., 2011). Να σημειωθεί πως στο εδαφικό διάλυμα υφίστανται μικρές ποσότητες διαλυτών οργανικών ενώσεων φωσφόρου. Τα φωσφορικά ιόντα του εδαφικού διαλύματος τείνουν να μετατρέπονται σε λιγότερο διαλυτές μορφές με το χρόνο, με αποτέλεσμα τα φυτά να μην μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους σε φώσφορο.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η έλλειψη σε φώσφορο απαιτείται η προσθήκη στο έδαφος φωσφόρου με τη μορφή λιπασμάτων. Οι κύριες μορφές φωσφορικών λιπασμάτων περιλαμβάνουν το φωσφορικό μονοασβέστιο (MCP) και το φωσφορικό μονοκάλιο (Shen et al., 2011). Η εφαρμογή του φωσφορικού λιπάσματος θα πρέπει να γίνεται σε βάθος στο οποίο βρίσκεται ο μεγαλύτερος όγκος του ριζικού συστήματος. Από αυτή την ποσότητα του φωσφόρου μόνο ένα ποσοστό 10-20% χρησιμοποιείται από τα φυτά κατά το πρώτο έτος, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό μετατρέπεται σε λιγότερο διαλυτές μορφές ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά κατά τα επόμενα έτη (Παναγιωτόπουλος Κ., 2008).

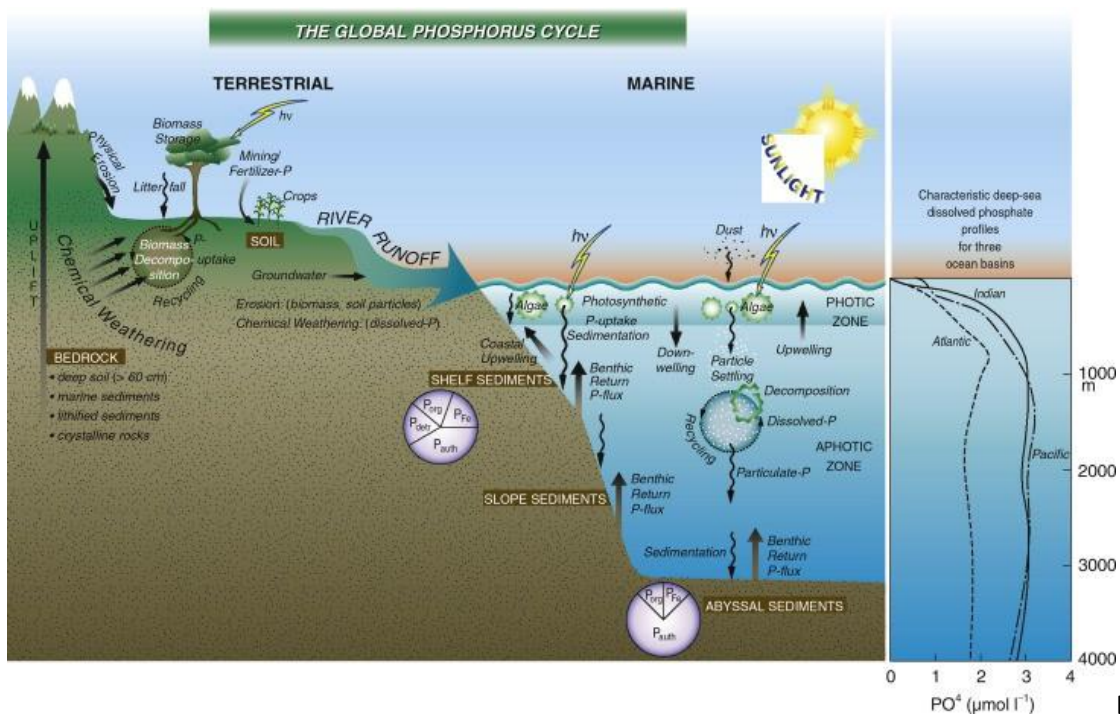
Ο οργανικός φώσφορος στα εδάφη διακρίνεται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τα φωσφολιπίδια, τη φυτίνη και τα νουκλεϊκά οξέα. Τα φωσφολιπίδια και τα νουκλεϊκά οξέα υδρολύονται εύκολα κι ως εκ τούτου αποτελούν διαθέσιμη πηγή φωσφόρου για τα φυτά, ενώ η φυτίνη αποτελεί άλας της φωσφορικής ινοσιτόλης με το Ca και το Mg. Μερικές από αυτές τις μορφές φωσφόρου σε ποσοστά αναφέρονται παρακάτω: φωσφορικές ινοσιτόλες: 2-50%, φωσφολιπίδια: 1-5%, νουκλεϊκά οξέα: 0,2-0,5%, φωσφοπρωτεΐνες: ίχνη.

1.2.3. Κύκλος του φωσφόρου

Το μεγαλύτερο μέρος του φωσφόρου στα εδάφη προέρχεται από την αποσάθρωση των φυσικών φωσφορικών πετρωμάτων. Τα πρωτογενή φωσφορικά ορυκτά είναι ιδιαίτερα σταθερά και η απελευθέρωση του διαθέσιμου φωσφόρου από αυτά τα ορυκτά λόγω της αποσάθρωσης είναι γενικά πολύ αργή για να καλύψει τις ανάγκες των φυτών. Εν αντιθέσει, τα δευτερογενή φωσφορικά ορυκτά, συμπεριλαμβανομένων των φωσφορικών αλάτων ασβεστίου (Ca), σιδήρου

(Fe) και αργιλίου (Al) ποικίλλουν ως προς τους ρυθμούς διάλυσής τους, ανάλογα με το μέγεθος των τεμαχιδίων και το pH του εδάφους (Pierzynski et al., 2005; Oelkers and Valsami-Jones, 2008). Ο κύκλος του φωσφόρου στο έδαφος είναι πολύπλοκος και περιλαμβάνει μια σειρά χημικών και βιοχημικών διεργασιών όπως προσρόφηση και εκρόφηση, καθίζηση και διάλυση, ανοργανοποίηση και ακινητοποίηση.

Ο βιοδιαθέσιμος φώσφορος μπορεί να παραχθεί με υδρόλυση οργανικού φωσφόρου και διάλυση ανόργανων φωσφορικών. Η βιοδιαθεσιμότητα του φωσφόρου πραγματοποιείται από τη δράση των μικροοργανισμών και των ριζών των φυτών που παράγουν υδρολυτικά ένζυμα και οργανικά οξέα. Η περίσσεια διαλυτού φωσφόρου στο έδαφος εισέρχεται στο επιφανειακό ή υπόγειο νερό μέσω επιφανειακής απορροής ή έκπλυσης αντίστοιχα, που είναι επίσης ένας από τους κύριους παράγοντες που προκαλούν ευτροφισμό. Ως εκ τούτου, η ανακύκλωση του φωσφόρου μέσω διαφόρων διαδικασιών μετασχηματισμού στο έδαφος είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ισορροπίας του οικοσυστήματος.

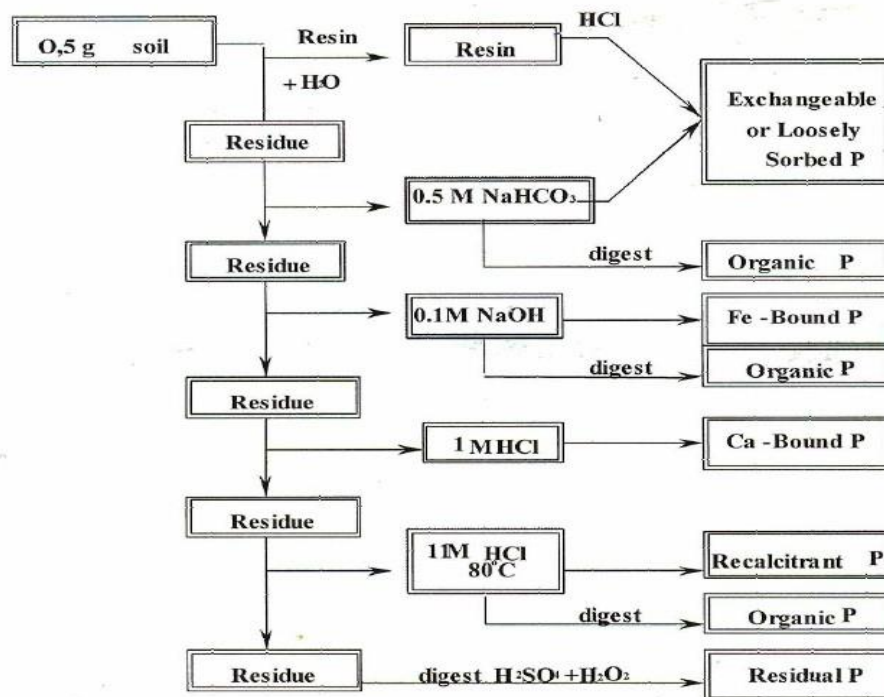


1 Ο παγκόσμιος κύκλος του φωσφόρου
 Πηγή: Ruttenberg, 2001

1.2.4. Κλασμάτωση του εδαφικού φωσφόρου

Για τη μελέτη των μορφών και της δυναμικής του φωσφόρου έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς αρκετές μέθοδοι (Chang and Jackson, 1957). Η διαδικασία της κλασμάτωσης του εδαφικού φωσφόρου που ακολουθήθηκε βασίστηκε στη μέθοδο που ανέπτυξαν οι Tiessen and Moir (1993). Τα βήματα αυτής της διαδικασίας περιγράφονται αναλυτικά στο 3^ο κεφάλαιο και στο Σχήμα 1.

Η μέθοδος της κλασμάτωσης του εδαφικού φωσφόρου βασίζεται στις διαφορετικές διαλυτότητες των μορφών του φωσφόρου και χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της διαθεσιμότητάς του στα εδάφη. Μέσω της διαδικασίας αυτής γίνεται διάκριση των διαθέσιμων, αλλά και των μη διαθέσιμων – σταθερών, οργανικών κι ανόργανων μορφών του φωσφόρου. Η πρώτη κλασμάτωση του φωσφόρου πραγματοποιήθηκε από τους Chang and Jackson (1957) με σκοπό την εξαγωγή των διαφόρων μορφών του φωσφόρου. Ο διαθέσιμος φώσφορος αντιπροσωπεύει τον φώσφορο που είναι άμεσα ανταλλάξιμος με τον διαλυτό ανόργανο φώσφορο στο εδαφικό διάλυμα, ή τον οργανικό φώσφορο που είναι άμεσα ανοργανοποιήσιμος ή που εύκολα υδρολύεται από ένζυμα των ριζικών εκκρίσεων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από τα φυτά. Εν αντιθέσει, ο μη διαθέσιμος φώσφορος είναι προσροφημένος στα εδαφικά συστατικά και γίνεται διαθέσιμος για τα φυτά μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 1 Η κλασμάτωση φωσφόρου με τη μέθοδο Tiessen and Moir (1993).
 Πηγή: Tiessen and Moir, 1993

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε μέσω της διαδοχικής εκχύλισης με τη χρήση των αντιδραστηρίων ρητίνης, NaHCO_3 , NaOH , αραιού HCl , πυκνού HCl , πυκνού $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ για τον προσδιορισμό των γεωχημικών (P_i) και βιολογικών μορφών (P_o) του φωσφόρου διαφορετικής διαθεσιμότητας. Πιο συγκεκριμένα, το κλάσμα του φωσφόρου που εκχυλίζεται με την ανιοντική ρητίνη περιλαμβάνει μορφές του φωσφόρου που είναι προσροφημένες σε επιφάνειες των κρυσταλλικών ενώσεων, είναι διαθέσιμες για τα φυτά και άμεσα ανταλλάξιμες με το εδαφικό διάλυμα. Το NaHCO_3 εκχυλίζει τον φώσφορο που είναι ασθενώς προσροφημένος στις επιφάνειες των κρυσταλλικών ενώσεων και των εδαφικών κolloειδών κι είναι άμεσα διαθέσιμος για τα φυτά (Μπαστουνοπούλου, 2006).

Τα κλάσματα του φωσφόρου που μπορούν να εξαχθούν με χρήση ρητίνης και διττανθρακικών θεωρούνται ότι είναι εύκολα διαθέσιμα στα φυτά (Cross and Schlesinger, 1995; Guo and Yost, 1998) και βρίσκονται σε σχετικά μικρές ποσότητες σε σύγκριση με τον συνολικό φώσφορο του εδάφους. Τα κλάσματα ρητίνης και διττανθρακικών αποτελούν τα σύνθετα ανόργανα και οργανικά κλάσματα γνωστά ως ασταθές κλάσμα ανόργανου φωσφόρου (P_i) και ασταθές κλάσμα οργανικού φωσφόρου (P_o), αντίστοιχα. Σχεδόν όλο το σύνολο του ασταθούς φωσφόρου αποτελείται από διττανθρακικά εκχυλίσιμα κλάσματα.

Το αντιδραστήριο NaOH εκχυλίζει τον ανόργανο φώσφορο (P_i) που είναι προσροφημένος στις επιφάνειες των άμορφων και κατά ένα μέρος κρυσταλλικών οξειδίων του Fe και Al καθώς και τον οργανικό φώσφορο (P_o) των χουμικών και φουλβικών οξέων. Η εκχύλιση με NaOH εξάγει το φώσφορο από τις επιφάνειες των ανόργανων ορυκτών και της οργανικής ύλης όπως αναφέρθηκε, αλλά δεν προσβάλλει τον φώσφορο που προστατεύεται φυσικά εντός των εδαφικών συσσωματωμάτων. Έχει αναφερθεί ότι οι τιμές για το οργανικό κλάσμα NaOH P_o είναι χαμηλότερες στις ξηρότερες περιοχές από ό,τι στις πιο υγρές ενώ ταυτόχρονα το άθροισμα των δυο κλασμάτων δείχνει μια προοδευτική απώλεια του φωσφόρου στις περιοχές που παρατηρούνται αυξημένες βροχοπτώσεις. Στις πιο ξηρές περιοχές, ο φώσφορος που προστατεύεται εντός των εδαφικών συσσωματωμάτων είναι μεγαλύτερος στο ανόργανο κλάσμα σε σχέση με το οργανικό κλάσμα, ενώ στις πιο υγρές περιοχές αυτή η τάση αντιστρέφεται (Miller et al., 2000).

Το αντιδραστήριο του αραιού HCl εκχυλίζει τον ανόργανο φώσφορο που βρίσκεται δεσμευμένος στις επιφάνειες των ασβεστούχων ορυκτών, ενώ σε όξινα εδάφη το κλάσμα αυτό του φωσφόρου παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές ή απουσιάζει πλήρως.

Επιπρόσθετα, το αντιδραστήριο του πυκνού HCl χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των δύσκολα αποδομήσιμων μορφών ανόργανου και οργανικού φωσφόρου που δεσμεύονται στο εσωτερικό των οξειδίων του Fe και Al.

Οι πλέον σταθερές ανόργανες και οργανικές μορφές του φωσφόρου αποτελούν τον υπολειμματικό φώσφορο, η εκχύλιση του οποίου πραγματοποιείται μέσω πυκνού H_2SO_4/H_2O_2 . Το κλάσμα αυτό θεωρείται περιορισμένης διαθεσιμότητας από τα φυτά, διότι περιλαμβάνει σταθερές, δύσκολα αποδομήσιμες και χαμηλής διαθεσιμότητας μορφές φωσφόρου (Tiessen and Moir, 1993). Σύμφωνα με τους Miller et al., (2000) ο υπολειμματικός φώσφορος στα ορεινά δασικά εδάφη Alfisols της Χαβάης μειώθηκε ως συνάρτηση της αυξημένης βροχόπτωσης.

Το σαφές πλεονέκτημα αυτής της κλασμάτωσης σε σχέση με άλλες μεθόδους προσδιορισμού των διαφόρων μορφών του φωσφόρου είναι το γεγονός ότι το εδαφικό δείγμα υπόκειται σε μια διαδοχική μεταχείριση με διάφορα αντιδραστήρια σε κάθε στάδιο. Μέσω αυτής της διαδικασίας παρέχεται η πληροφορία για τα ποσοστά του διαθέσιμου, μη διαθέσιμου, δεσμευμένου και μη δεσμευμένου εδαφικού φωσφόρου κι αντικατοπτρίζεται η σημασία τόσο των γεωχημικών όσο και των βιολογικών διεργασιών στον κύκλο του φωσφόρου.

1.2.5. Κλασμάτωση του εδαφικού φωσφόρου σε εδάφη της τάξης των Alfisols

Ο φώσφορος βρίσκεται σε τρεις κύριες δεξαμενές του εδάφους που χαρακτηρίζονται πρωτογενείς ανόργανες, δευτερογενείς ανόργανες και οργανικές (Walker and Syers, 1976). Ο ρυθμός απελευθέρωσης και η ικανότητα προσρόφησης του φωσφόρου εξαρτάται κυρίως από τον τύπο των δευτερογενών ορυκτών. Τα διάφορα κλάσματα του φωσφόρου διαφέρουν ως

προς τη συμπεριφορά και την τύχη τους στο έδαφος (Turner et al., 2007). Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο έδαφος επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως η εδαφική υγρασία, η θερμοκρασία, οι φυσικοχημικές ιδιότητες, το pH και το Eh του εδάφους. Η κατανομή τόσο του οργανικού όσο και του ανόργανου κλάσματος του εδαφικού φωσφόρου ποικίλλει ανάλογα με το κλίμα, τη βλάστηση, το μητρικό υλικό και τα συστήματα χρήσης γης. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι οι συγκεντρώσεις των ενεργών μορφών του φωσφόρου (Ca-P, Al-P και Fe-P) σχετίζονταν απόλυτα με το βαθμό χημικής αποσάθρωσης (Paulos Dubale, 1996).

Ο φώσφορος αποτελεί το δεύτερο πιο περιοριστικό στοιχείο σε εδάφη Alfisols της τροπικής Ασίας και της Αφρικής. Σε μια έρευνα των Sattle & Morris (1992) εξετάστηκαν οι σχέσεις μεταξύ των κλασμάτων του φωσφόρου σε 12 Alfisols της Sri Lanka. Συνοπτικά, το 45% του συνολικού εδαφικού φωσφόρου ήταν στο κλάσμα NaOH και από αυτό, το 72% ήταν σε οργανική μορφή. Επίσης, η μελέτη έδειξε ότι το ασταθές κλάσμα οργανικού φωσφόρου καθώς και το ασταθές κλάσμα ανόργανου φωσφόρου συνέβαλαν σημαντικά στην προσρόφηση φωσφόρου σε τροπικά εδάφη της τάξης των Alfisols.

Μια άλλη έρευνα διεξήχθη στη δυτική Αιθιοπία που μελετούσε τις επιπτώσεις των συστημάτων χρήσης γης στα κλάσματα φωσφόρου και στη διαθεσιμότητα επιλεγμένων μικροθρεπτικών συστατικών, αφορούσε τρία συστήματα διαχείρισης γης (πειραματικό αγροτεμάχιο, καλλιεργούμενο αγροτεμάχιο και φυσική βλάστηση). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα τρία διαφορετικά συστήματα χρήσης γης επηρέασαν τις διαφορετικές μορφές φωσφόρου και τις συγκεντρώσεις των διαθέσιμων μικροθρεπτικών στοιχείων στα εδάφη. Πιο συγκεκριμένα, ο υψηλότερα διαθέσιμος φώσφορος (25,52 και 43,05 mg kg⁻¹) για τις μεθόδους εκχύλισης Olsen και Bray II, αντίστοιχα, καταγράφηκε στην επιφανειακή στρώση του πειραματικού αγροτεμαχίου. Αυτό φαίνεται να οφείλεται στην επαναλαμβανόμενη εφαρμογή λιπάσματος φωσφόρου τις τελευταίες τρεις δεκαετίες σε αντίθεση με τεμάχιο της φυσικής βλάστησης και το καλλιεργούμενο αγροτεμάχιο. Αντίθετα, ο οργανικός φώσφορος ήταν υψηλότερος στο επιφανειακό έδαφος της φυσικής βλάστησης ακολουθούμενο από το καλλιεργούμενο αγροτεμάχιο (Negassa and Gebrekidan, 2003).

Σε δεκατέσσερις εδαφικές κατατομές της κοιλάδας Kangra του Himachal Pradesh στην Ινδία μελετήθηκαν οι μορφές του φωσφόρου σε σχέση με τις ιδιότητες και τη γένεση των εδαφών. Στα Alfisols, η ποσότητα του ολικού φωσφόρου μειώθηκε με την αύξηση του βάθους ενώ ο ανηγμένος διαλυτός φώσφορος αποτέλεσε το κυρίαρχο κλάσμα των εδαφών. Επιπρόσθετα, τα ανόργανα κλάσματα του φωσφόρου βρέθηκαν να συσχετίζονται με το pH, ενώ η επίδραση της περιεκτικότητας του οργανικού άνθρακα, της αργίλου και των οξειδίων δεν εμφάνισαν κάποια σημαντική σχέση με την ποσότητα των κλασμάτων φωσφόρου (Kanwar et al., 1983).

1.3. Υδρομορφία εδαφών

Για τον προσδιορισμό της υδρομορφίας στα εδάφη χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές ιδιότητες: i) ο βαθμός κορεσμού με νερό, ii) η εμφάνιση αναγωγής και iii) η παρουσία οξειδοαναγωγικών χαρακτηριστικών (Soil Survey Staff, 1992). Σύμφωνα με την 12^η έκδοση του Soil Survey Staff, Keys to Soil Taxonomy (2014), οι συνθήκες υδρομορφίας ενός εδάφους σημαίνουν τον συνεχή ή περιοδικό κορεσμό καθώς και τη μείωση του κορεσμού του εδάφους, ενώ δεν είναι συγκεκριμένες για οποιοδήποτε εύρος βάθους σε ένα έδαφος και μπορούν να εμφανιστούν σε οποιοδήποτε βάθος του εδάφους.

Σε πολλές περιπτώσεις το υγρασιακό καθεστώς του εδάφους έχει χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό της αποστράγγισης των εδαφών στα εδάφη, ενώ συγκεκριμένοι τύποι εδαφών καθορίζονται με βάση την κλάση υδρομορφίας. Η κλάση υδρομορφίας ενός εδάφους αναφέρεται στη συχνότητα και τη διάρκεια των υγρών περιόδων, ενώ εξαρτάται άμεσα από το τοπογραφικό ανάγλυφο και τη μορφολογία του εδάφους. Εκτός των Histosols και Histels, η παρουσία αυτών των συνθηκών εκτιμάται από την εμφάνιση μορφολογικών οξειδοαναγωγικών χαρακτηριστικών στην εδαφική κατατομή κι επαληθεύεται μέσω μετρήσεων του κορεσμού των εδαφών με νερό και των αναγωγικών συνθηκών που λαμβάνουν χώρα.

Χαρακτηριστικό των συνθηκών αποστράγγισης των εδαφών είναι η μηδενική ή θετική πίεση του κορεσμού στο εδαφικό νερό, ενώ αυτά τα εδάφη θεωρούνται υγρά εφόσον έχουν ύψος πίεσης μεγαλύτερο από -1 kPa. Υφίστανται τρεις τύποι κορεσμού:

i. **Υπόγειος κορεσμός του εδάφους με νερό (Endosaturation)**, όπου το έδαφος είναι κορεσμένο με νερό σε όλα τα στρώματα από το ανώτερο όριο κορεσμού μέχρι βάθος 200 cm ή περισσότερο από την επιφάνεια του ορυκτού εδάφους.

ii. **Επιφανειακός κορεσμός του νερού (Episaturation)**, όπου το έδαφος είναι κορεσμένο με νερό σε ένα ή περισσότερα στρώματα σε απόσταση 200 cm από την επιφάνεια του ορυκτού εδάφους και έχει επίσης ένα ή περισσότερα ακόρεστα στρώματα, με ανώτερο όριο πάνω από βάθος 200 cm, κάτω από το κορεσμένο στρώμα.

iii. **Anthric saturation**, όπου αποτελεί ένα ειδικό είδος υδατικής κατάστασης που εμφανίζεται σε εδάφη που καλλιεργούνται και αρδεύονται.

Οι συνθήκες οξειδοαναγωγής ενός εδάφους μπορούν να χαρακτηριστούν μέσω των μετρήσεων του δυναμικού οξειδοαναγωγής κι αποτελούν συνάρτηση του pH του εδάφους. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά οξειδοαναγωγής συνδέονται άμεσα με την υγρασία και προκύπτουν από περιόδους αναγωγής και οξείδωσης των ενώσεων σιδήρου και μαγγανίου στο έδαφος..

Οι Verbraskas και Guertal (1992) ανέφεραν ότι εδάφη που ήταν κορεσμένα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, η ποσότητα απωλειών του Fe αυξήθηκε ενώ η ποσότητα συγκεντρώσεων του Fe μειώθηκε. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά οξειδοαναγωγής ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. **Συγκεντρώσεις οξειδοαναγωγής (redox concentrations)**, όπου αποτελούν ζώνες εμφανούς τοπικής συσσώρευσης οξειδίων σιδήρου-μαγγανίου και περιλαμβάνουν τις εξής τρεις κατηγορίες: α. συγκρίματα (concretions) και θρόμβοι (nodules), β. μάζες (masses) και γ. επικαλύψεις πόρων (pore linings).

2. **Απώλειες οξειδοαναγωγής (redox depletions)**, όπου αποτελούν ζώνες οι οποίες χαρακτηρίζονται είτε από την μετακίνηση και απώλεια των οξειδίων σιδήρου-μαγγανίου είτε από την μετακίνηση οξειδίων και αργίλου και περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες: α. απώλειες σιδήρου (iron depletions) και β. απώλειες αργίλου (clay depletions).

3. **Ανηγμένες μάζες (reduced matrices)**, όπου το έδαφος υφίσταται μεταχρωματισμό εντός 30 λεπτών μετά την έκθεση του εδαφικού υλικού στον αέρα λόγω της οξείδωσης του Fe^{2+} σε Fe^{3+} .

1.3.1. Συνθήκες υδρομορφίας των Alfisols

Τα Alfisols καλύπτουν σχεδόν το 33% των ημίξηρων τροπικών περιοχών και παρέχουν επαρκή υγρασία για τα φυτά για τουλάχιστον ένα μέρος του έτους (Pathak and Sahrawat, 2013). Για να αναπτυχθούν κατάλληλες και πιο αποτελεσματικές στρατηγικές και πρακτικές διαχείρισης του εδάφους και των υδάτων, είναι εξαιρετικά σημαντική η καλύτερη κατανόηση της υδρολογικής συμπεριφοράς των εδαφών (Pathak and Sahrawat, 2013).

Η υπόταξη των Alfisols η οποία δείχνει ξεκάθαρα την επίδραση της κακής υδρομορφίας στις φυσικοχημικές ιδιότητες των ειδών είναι τα Aqualfs Διακρίνονται από τις γκρι απώλειες οξειδοαναγωγής (glay χαρακτηριστικά) όπως και τις συγκεντρώσεις οξειδοαναγωγής. Σε ορισμένα από αυτά τα εδάφη, ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια ενός σημαντικού μέρους του έτους, αλλά ταπεινώνεται σε βάθος κάτω από τον αργιλικό ή kandic ορίζοντα για την υπόλοιπη διάρκεια του έτους. Σε άλλα Aqualfs, ο υπόγειος υδροφόρος μπορεί να είναι βαθιά το μεγαλύτερο μέρος του έτους, αλλά οι οριζόντες που έχουν χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα περιορίζουν την καθοδική κίνηση του νερού προκαλώντας επιφανειακό κορεσμό του εδάφους με νερό (Soil Survey Staff, 1999).

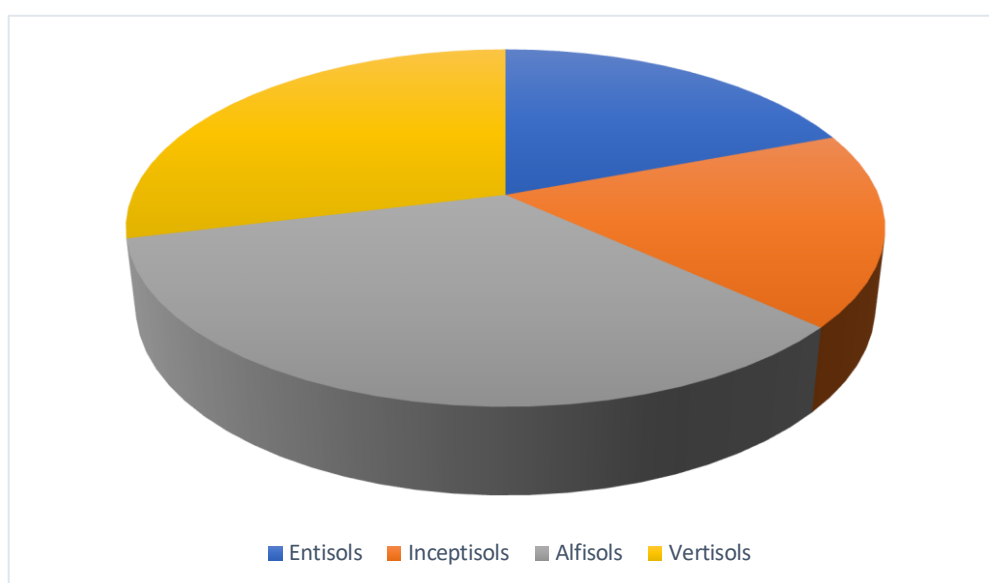
Τα Aqualfs εμφανίζονται σε πολλά μέρη του κόσμου, κυρίως σε μικρές περιοχές αποθέσεων του Πλειστόκαινου και τα περισσότερα διαθέτουν τεχνητή αποστράγγιση και καλλιεργούνται. Το ρύζι είναι μια κοινή καλλιέργεια στα Aqualfs που έχουν θερμότερο καθεστώς θερμοκρασίας, ενώ αξίζει να τονισθεί πως πριν καλλιεργηθούν μερικά από τα Aqualfs βρισκόνταν κάτω από δασική βλάστηση και άλλα κάτω από γρασίδι (Soil Survey Staff, 1999).

2. Περιβάλλον

2.1. Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του νομού Καρδίτσας και περιλαμβάνει τις θέσεις Γεφύρια και Καπαδοκικό. Η Καρδίτσα είναι πόλη της Θεσσαλίας και πρωτεύουσα της ομώνυμης Περιφερειακής Ενότητας. Βρίσκεται στο δυτικό άκρο του Θεσσαλικού κάμπου, χτισμένη δίπλα σε παραπόταμο του Πηνειού. Το δυτικό τμήμα του νομού, που ανήκει στη λεκάνη απορροής του Αχελώου, είναι αρκετά ορεινό, με λίγες αρδευτικές εκτάσεις κι ιδιαίτερα σημαντικό υδατικό πλούτο. Επιπρόσθετα, στο δυτικό τμήμα του νομού βρίσκεται η τεχνητή λίμνη Πλαστήρα. Το ανατολικό τμήμα του νομού που ανήκει στη λεκάνη απορροής του Πηνειού, αποτελεί κομμάτι του Θεσσαλικού κάμπου και έχει σημαντικότερες αρδευτικές εκτάσεις.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της εδαφολογικής μελέτης του νομού Καρδίτσας, τα εδάφη της περιοχής κατανέμονται ως εξής (ΙΧΤΕΛ, 1991):



Διάγραμμα 1 Η κατανομή των εδαφών στην περιοχή μελέτης του νομού Καρδίτσας.
Πηγή: ΙΧΤΕΛ, 1991

Τα Alfisols αποτελούν την πλειοψηφία των εδαφών στο νομό Καρδίτσας, ενώ είναι εδάφη στα οποία έπαψε να γίνεται απόθεση νέων υλικών και βρίσκονται σε παλιούς σχετικά αλλουβιακούς αναβαθμούς. Ανήκουν στην υπόταξη των Xeralfs και στην πλειοψηφία τους στην μεγάλη ομάδα των Harloxeralfs.

2.2. Κλίμα περιοχής μελέτης

Στην περιοχή της Καρδίτσας κυριαρχεί το ηπειρωτικό κλίμα, όπου ο χειμώνας χαρακτηρίζεται δριμύς με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ ο παγετός αποτελεί ένα ιδιαίτερα συνηθισμένο φαινόμενο. Το καλοκαίρι είναι αρκετά θερμό, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία της περιοχής να υπερβαίνει συχνά τους 40°C.

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του Μετεωρολογικού σταθμού Καρδίτσομαγούλας του νομού Καρδίτσας μέσω της ιστοσελίδας meteo.gr. Βάσει των μετρήσεων του σταθμού για την περίοδο 2015-2021 παρατίθενται τα εξής στοιχεία:

Πίνακας 1 Μετρήσεις του σταθμού Καρδίτσομαγούλας για την περίοδο 2015-2021. Πηγή: meteo.gr, 2023

Μήνας	Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία Αέρα	Μέση Μέγιστη Θερμοκρασία Αέρα	Μέση Ελάχιστη Θερμοκρασία Αέρα	Μέση Βροχόπτωση	Μέση Κατανομή Βροχόπτωσης
Ιανουάριος	4,6	17,8	-8,3	82,5	11,4
Φεβρουάριος	8,1	20,5	-3,9	71,3	9,8
Μάρτιος	11,0	25,1	0,3	77,5	10,7
Απρίλιος	15,0	30,0	3,0	39,7	5,5
Μάιος	20,3	29,9	8,7	45,7	6,3
Ιούνιος	24,2	38,0	12,6	40,9	5,6
Ιούλιος	26,0	38,5	15,8	41,2	5,7
Αύγουστος	25,0	36,9	13,8	28,0	3,9
Σεπτέμβριος	21,3	35,5	9,5	80,4	11,1
Οκτώβριος	15,9	29,0	4,2	71,2	9,8
Νοέμβριος	11,4	24,4	1,4	81,8	11,3
Δεκέμβριος	6,7	18,5	-2,5	64,1	8,8
Σύνολο	15,8	28,7	4,6	724,3	100,0

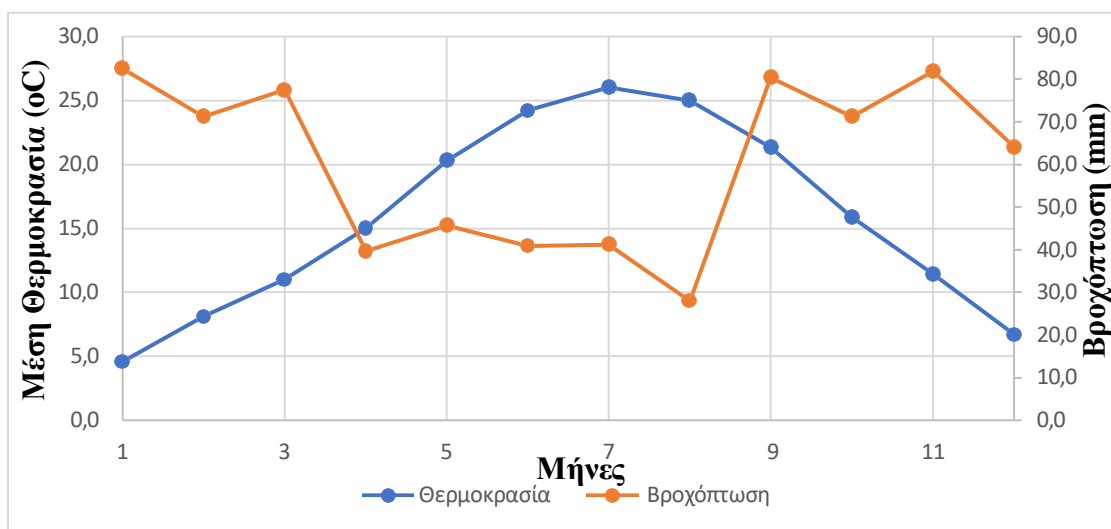
Σύμφωνα με τον Πίνακα 1 η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα είναι 15,8 °C, η μέση θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα (Ιανουάριος) αντιστοιχεί σε -8,3 °C και η μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα (Ιούλιος) προσεγγίζει τους 38,5 °C. Επιπρόσθετα, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται σε 724,30 mm.

Η κατανομή των βροχοπτώσεων είναι άνιση κατά τη διάρκεια του έτους κι ο κύριος όγκος τους κατανέμεται στους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες και λιγότερο την άνοιξη, ενώ το καλοκαίρι είναι ιδιαίτερα ξηρό. Το μέγιστο μηνιαίο ποσοστό παρουσιάζεται τους μήνες Ιανουάριο, Σεπτέμβριο και Νοέμβριο, ενώ σημαντικά ποσοστά εμφανίζονται κατά τους μήνες Φεβρουάριο, Μάρτιο, Οκτώβριο και Δεκέμβριο. Οι πλέον ξηροί μήνες είναι ο Αύγουστος και ο Απρίλιος, ενώ ακολουθούν ο Ιούνιος, Ιούλιος και Μάιος.

Οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή έχουν κατεύθυνση βορειοδυτική, εκτός από αυτούς του Ιουλίου και του Αυγούστου, οι οποίοι έχουν δυτική κατεύθυνση, μεγάλη ένταση και είναι ταυτόχρονα ξηροί και θερμοί. Σύμφωνα με τους Bagrouis & Gaussien (1957), ξηρός χαρακτηρίζεται ένας μήνας όπου το σύνολο των κατακρημνισμάτων του είναι ίσο ή μικρότερο από το διπλάσιο της μέσης θερμοκρασίας του εν λόγω μήνα, δηλαδή $P_{mm} \leq 2T$ °C. Για τον χαρακτηρισμό ενός μήνα χρησιμοποιείται το ομβροθερμικό διάγραμμα όπου αποτελεί ένα

διάγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται για την περιγραφή των κλιματικών παραγόντων της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας.

Τα ομβροθερμικά διαγράμματα των Bagnouls & Gaussen περιλαμβάνουν τους μήνες του έτους στην τετμημένη, τις μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις στην αριστερή τεταγμένη και τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στην δεξιά τεταγμένη και σε κλίμακα διπλάσια από εκείνη των βροχοπτώσεων ($P=2T$). Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται η καμπύλη των βροχοπτώσεων και η καμπύλη των θερμοκρασιών, ενώ τα σημεία τομής τους καθορίζουν το χρονικό σημείο που ισχύει $P=2T$. Η επιφάνεια που περικλείεται από τις δύο καμπύλες μεταξύ των σημείων $P=2T$, αποτελεί γραφική αναπαράσταση της διάρκειας και της έντασης της ξηρής περιόδου για την περιοχή του σταθμού. Βάσει του ομβροθερμικού διαγράμματος προκύπτει ότι στην ευρύτερη περιοχή της μελέτης, η ξηρή περίοδος διαρκεί από τον Απρίλιο μέχρι και τον Οκτώβριο.

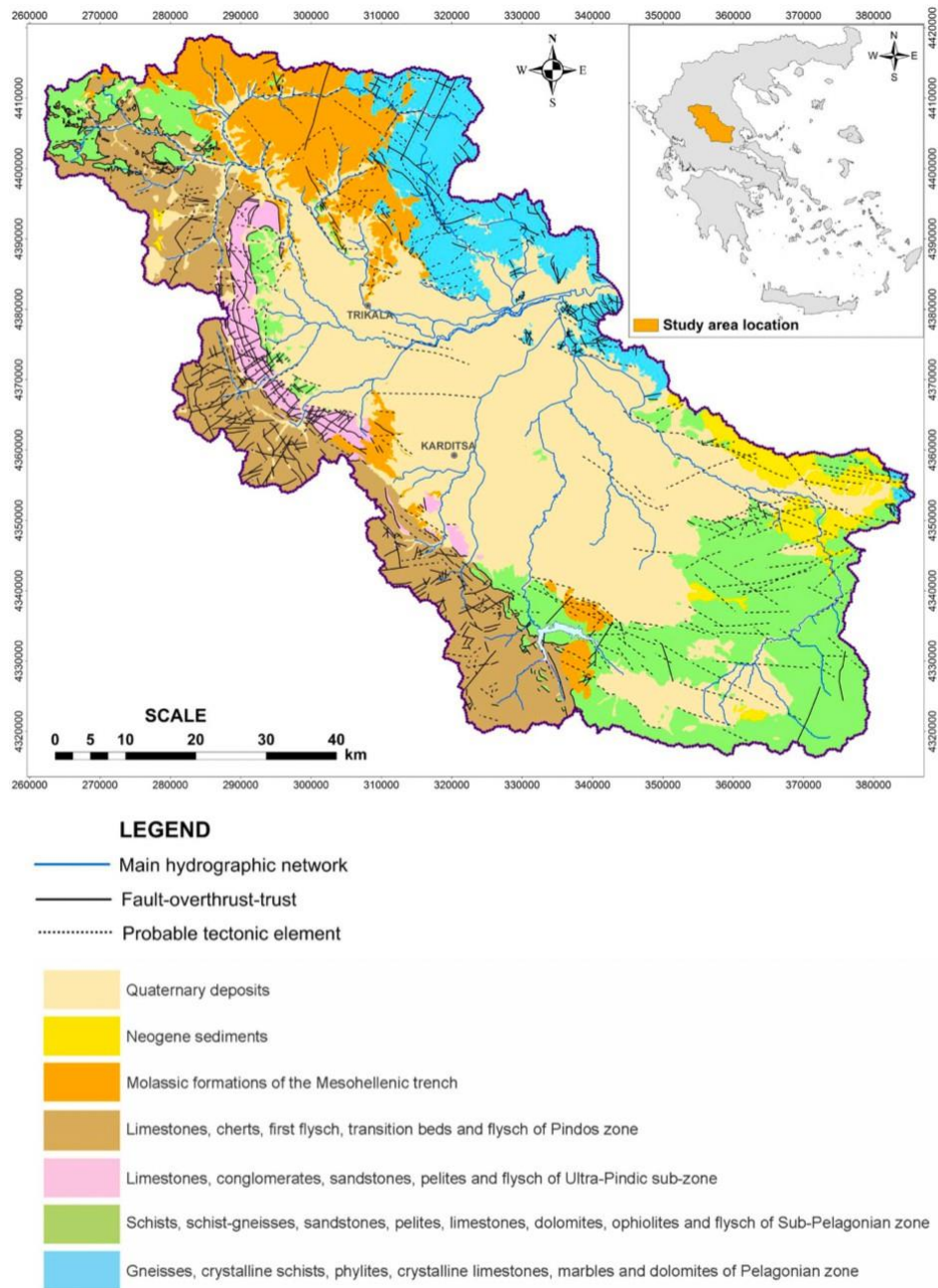


Διάγραμμα 2 Το ομβροθερμικό διάγραμμα της περιοχής του σταθμού Καρδιτσομαγούλας κατά την περίοδο 2015-2021.

Πηγή: *Bagnouls & Gaussen, 1957*

2.3. Γεωλογία περιοχής μελέτης

Η περιοχή της Θεσσαλίας ανήκει γεωλογικά σε τρεις γεωτεκτονικές ζώνες: την Πελαγονική, την Υποπελαγονική και τη ζώνη της Πίνδου (Μιγκίρος, 1998) με την περιοχή μελέτης να ανήκει στην Υποπελαγονική ζώνη, όπου τη μεγαλύτερη εξάπλωση παρουσιάζουν οι οφιόλιθοι και οι ασβεστόλιθοι. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται ο πρόσφατος Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής της Καρδίτσας και το υπόμνημά του (Apostolidis and Koukis, 2013).



Εικόνα 2 Γεωλογικός χάρτης της Δυτικής Θεσσαλίας.
 Πηγή: Apostolidis and Koukis, 2013

3. Υλικά και Μέθοδοι

3.1. Φυσικές και χημικές ιδιότητες εδαφικών δειγμάτων

Στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής περιγράφονται τρεις εδαφοτομές της τάξης των Alfisols στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης του νομού Καρδίτσας. Τα δεδομένα των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των εδαφοτομών P1, P2 και P3 που αναφέρονται στην παρούσα μελέτη, προέρχονται από τη διδακτορική διατριβή του Γασπαράτου Δ. (2007).

3.2. Διαδικασία κλασμάτωσης φωσφόρου εδαφικών δειγμάτων

Ο φώσφορος κλασματώθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο που ανέπτυξαν οι Tiessen and Moir (1993). Η κλασμάτωση πραγματοποιείται σε διαδοχικά στάδια, με το καθένα να έχει ιδιαίτερη σημασία τόσο γεωχημικά όσο και βιολογικά. Για την έναρξη της διαδικασίας της κλασμάτωσης ελήφθησαν 0.5 g από κάθε δείγμα κοσκινισμένο στα 250 μm.

Τα εκχυλιστικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μέθοδο είναι τα παρακάτω: **0,5 M HCl, 0,5 M NaHCO₃, 0,1 M NaOH, 1 M HCl, πυκνό HCl 11,3 M, H₂O₂: 30% H₂O₂, πυκνό H₂SO₄ 18 M.**

Ο προσδιορισμός του φωσφόρου σε όλα τα εκχυλίσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της διαδοχικής κλασμάτωσης έγινε χρωματομετρικά σύμφωνα με τη μέθοδο των (Murphy & Riley 1962).

4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.1. Περιγραφές εδαφοτομών και αναλυτικά δεδομένα

Στις επιμέρους ενότητες περιγράφονται οι τρεις εδαφοτομές της τάξης των Alfisols και παρουσιάζονται τα αναλυτικά δεδομένα των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους.

4.1.1. Περιγραφή εδαφοτομής P1 και βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφικών οριζόντων

Πίνακας 2 Περιγραφή της εδαφοτομής P1.

Ορίζ.	Βάθος (cm)	Περιγραφή
Ap	0-29	SiL, 10 YR 4/3, 1fgr, f1d, 7,5 YR 5/8
EB	29-54	SiC, 10 YR 4/3, 2msbk, f2d, 5 YR 6/8
Bt1	54-96	C, 10 YR 5/4, 2mabk, c2f, 10YR 6/8
Bt2	96-122	SiC-SiCL, 10 YR 5/4, 3mabk, c2f, 10 YR 6/8
Ck1	122-158	SiC, 10 YR 6/3, 1msbk
2Bt2	158+	CL, 10 YR 4/3, 2msbk

Ορίζ.	Βάθος (cm)	Άμμος	Ιλύς	Άργιλος	Υφή	Αργιλικές Επικαλύψεις	CaCO ₃ (%)	pH
Ap	0-29	23,7	52,7	23,6	SiL		-	6,3
EB	29-54	16,2	42,2	41,6	SiC	+	-	6,6
Bt1	54-96	17,6	38,4	44,0	C	++	-	6,7
Bt2	96-122	14,6	45,4	40,0	SiC-SiCL	+++	-	6,9
Ck1	122-158	13,5	45,7	40,6	SiC		17,5	7,7
2Bt2	158+	23,2	41,2	35,6	CL	++	-	6,5

4.1.2. Περιγραφή εδαφοτομής P2 και βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφικών οριζόντων

Πίνακας 3 Περιγραφή της εδαφοτομής P2.

Ορίζ.	Βάθος (cm)	Περιγραφή
Ap	0-19	L, 10 YR 4/2, 1fgr, f1p, 5 YR 6/8
BE	19-35	L, 10 YR 4/2, 2msbk, f1p, 5 YR 6/8
Bt1	35-58	C – CL, 10 YR 5/3, 2mabk, m3f, 10 YR 6/8
Bt2	58-96	SiC-SiCL, 10 YR 5/3, 3mabk, m2f, 10 YR 6/8
BC	96-112	SiC-SiCL, 10 YR 5/4, 1mabk
Ck1	112-148	CL, 10 YR 6/3, 1msbk
C2	112-148	CL-L, 10 YR 5/6, 1msbk

Ορίζ.	Βάθος (cm)	Άμμος	Ιλύς	Άργιλος	Αργιλικές Επικαλύψεις	CaCO ₃ (%)	pH
Ap	0-19	29,5	47,7	22,8		-	6,5
BE	19-35	28,8	45,2	26,0	+	-	6,4
Bt1	35-58	23,0	37,0	40,0	+++	-	6,5
Bt2	58-96	19,1	40,9	40,0	+++	-	6,9
BC	96-112	19,5	40,7	39,8	+	ίχνη	7,9
Ck1	112-148	24,7	44,5	30,8		14,35	8,0
C2	112-148	28,5	44,7	26,8		ίχνη	7,9

4.1.3. Περιγραφή εδαφοτομής P3 και βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφικών οριζόντων

Πίνακας 4 Περιγραφή της εδαφοτομής P3.

Ορίζ.	Βάθος (cm)	Περιγραφή
Ap	0-13	L, 10 YR 4/2, c1d, 7,5 YR 6/6
AE	13-26	L, 10 YR 4/2, 1msbk, c1d, 7,5 YR 6/6
Bt1	26-45	CL, 10 YR 4/3, 2mabk, m2f, 10 YR 6/8
Bt2	45-83	CL, 10 YR 5/4, 3mabk, m3f, 10 YR 6/8
BC	83-107	CL, 10 YR 4/3, 2mabk, m3f, 10 YR 6/8
Ck1	107-135	SCL, 10 YR 6/3, 2msbk
C2	135-160	SL, 10 YR 5/6, 1msbk
C3	160-185+	SL, 10 YR 5/6, 1msbk

Ορίζ.	Βάθος (cm)	Άμμος	Ιλύς	Άργιλος	Υφή	Αργιλικές Επικαλύψεις	CaCO ₃ (%)	pH
Ap	0-13	44,7	42,1	13,2	L			5,8
AE	13-26	45,9	40,2	13,9	L			6,3
Bt1	26-45	36,8	33,3	29,9	CL	++		6,8
Bt2	45-83	37,5	30,9	31,6	CL	++		7,8
BC	83-107	37,4	25,9	36,7	CL	+	ίχνη	8,0
Ck1	107-135	51,7	24,1	24,2	SCL		4,92	8,3
C2	135-160	60,6	21,6	17,8	SL		ίχνη	8,4
C3	160-185+	67,1	18,1	14,8	SL		ίχνη	8,4

Βάσει των Πινάκων 2, 3 και 4 για την κάθε εδαφοτομή παρατηρούνται τα εξής:

Εδαφοτομή P1

Η κλάση της κοκκομετρικής σύστασης των οριζόντων της εδαφοτομής P1 χαρακτηρίζεται από μετρίως λεπτόκοκκη έως λεπτόκοκκη. Το ποσοστό της άμμου κυμαίνεται από 13,5% έως 23,7%, το ποσοστό της ιλύος από 38,4% έως 52,7% και το αντίστοιχο της αργίλου από 23,6% έως 44%. Το έδαφος είναι μετρίως – ατελώς αποστραγγιζόμενο, μη διαβρωμένο και ως προς το CaCO₃ δεν υπάρχει αντίδραση στο Α τμήμα της εδαφοτομής, ενώ υφίσταται αντίδραση στο Β και Γ ή Γ τμήμα. Κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα φθάνει μέχρι τα 40 cm από την επιφάνεια του εδάφους.

Εδαφοτομή P2

Η κλάση της κοκκομετρικής σύστασης των οριζόντων της εδαφοτομής P2 χαρακτηρίζεται από μέση έως μετρίως λεπτόκοκκη. Το ποσοστό της άμμου κυμαίνεται από 19,1% έως 29,5%, το ποσοστό της ιλύος από 37,0% έως 47,7% και το αντίστοιχο της αργίλου από 22,8% έως 40%. Το έδαφος είναι ατελώς αποστραγγιζόμενο, μη διαβρωμένο και ως προς το CaCO₃ δεν υπάρχει αντίδραση στο Α τμήμα της εδαφοτομής, ενώ υφίσταται αντίδραση στο Β και Γ ή Γ τμήμα. Κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα φθάνει μέχρι τα 25 cm από την επιφάνεια του εδάφους.

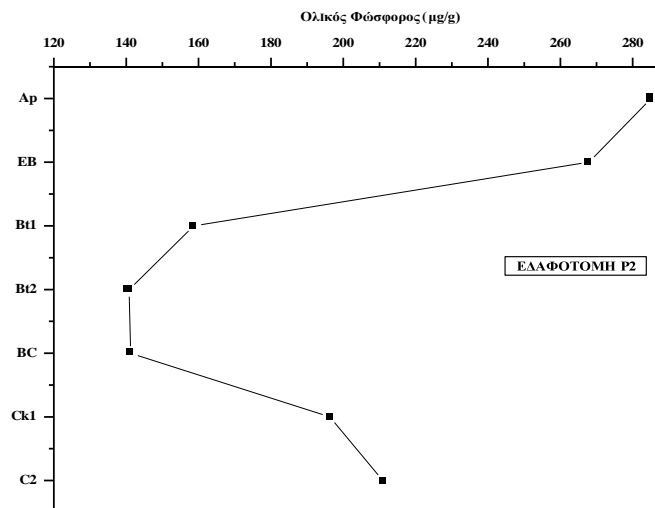
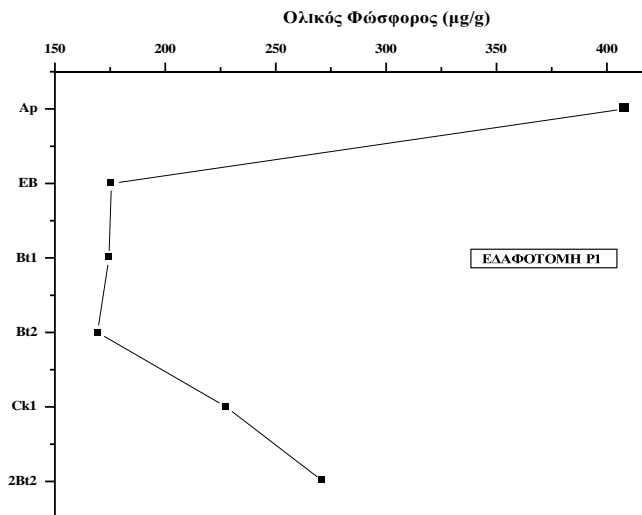
Εδαφοτομή P3

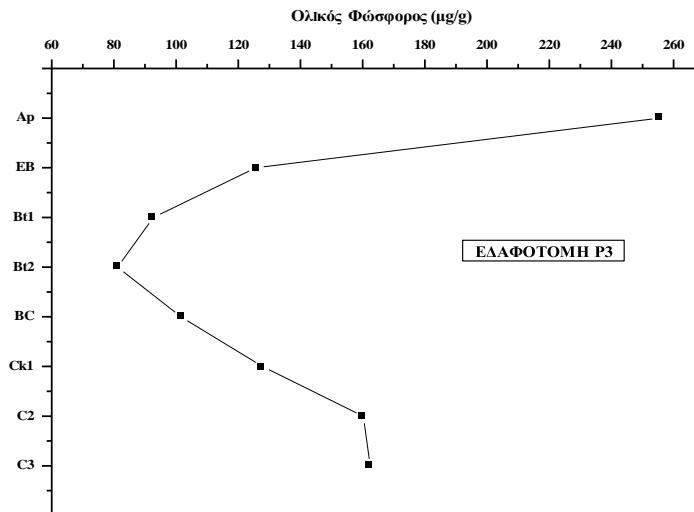
Η κλάση της κοκκομετρικής σύστασης των οριζόντων της εδαφοτομής P3 χαρακτηρίζεται από μετρίως χονδρόκοκκη έως μετρίως λεπτόκοκκη. Το ποσοστό της άμμου κυμαίνεται από 36,8% έως 67,1%, το ποσοστό της ιλύος από 18,1% έως 42,1% και το αντίστοιχο της αργίλου από 13,2% έως 36,6%. Το έδαφος είναι κακώς αποστραγγιζόμενο, μη διαβρωμένο και ως προς το CaCO₃ δεν υπάρχει αντίδραση στο Α τμήμα της εδαφοτομής, ενώ υφίσταται αντίδραση στο Β και Γ ή Γ τμήμα. Κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα φθάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.

4.2. Αποτελέσματα της κατανομής του ολικού φωσφόρου και των διαφορετικών του μορφών στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3

Στις επιμέρους ενότητες παρουσιάζονται τα αναλυτικά δεδομένα της κλασμάτωσης του φωσφόρου των τριών εδαφοτομών της τάξης των Alfisols.

4.2.1. Αποτελέσματα του ολικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3





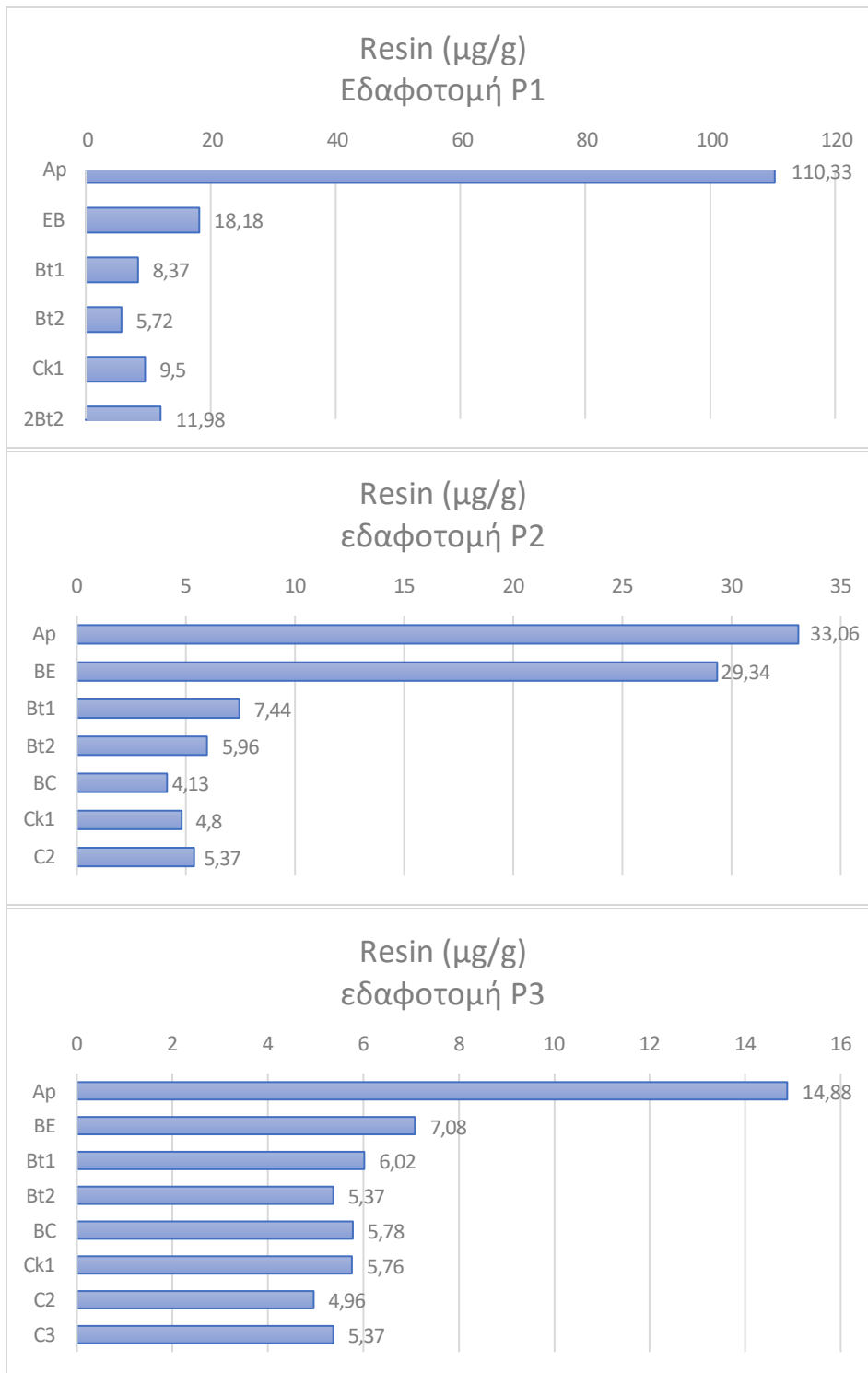
Διάγραμμα 3 Κατανομή του ολικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Ο ολικός φώσφορος όπως αυτός υπολογίσθηκε από το άθροισμα των επιμέρους κλασμάτων κυμαίνεται από 81,16 mg/g στον ορίζοντα Bt2 της εδαφοτομής P3 έως 353,66 mg/g στον ορίζοντα Ap της εδαφοτομής P1. Όπως αναφέρθηκε η υδρομορφία των εδαφών χειροτερεύει από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3, με αποτέλεσμα την αισθητή μείωση του ολικού φωσφόρου με το βάθος από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3, αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους Graca et al., 2021 η κλάση υδρομορφίας σχετίζεται με σημαντικές αλλαγές στην αναλογία C:P_o, στη συγκέντρωση σε ολικό φώσφορο (P_t) όπως και σε οργανικό φώσφορο (P_o). Σε κάθε περίπτωση η συγκέντρωση σε ολικό φώσφορο ήταν χαμηλότερη σε εδάφη κακής υδρομορφίας σε σχέση με τα καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη.

Ο ολικός φώσφορος σε καλώς αποστραγγιζόμενα εδάφη παρουσιάζει ελάχιστες απώλειες, καθώς ο φώσφορος ανακατανέμεται από τα πρωτογενή ορυκτά στα δευτερογενή ορυκτά. Στα μετρίως αποστραγγιζόμενα εδάφη, ο ολικός φώσφορος μειώνεται καθώς τα οξείδια Fe και Al διαλυτοποιούνται εξαιτίας των χαμηλών τιμών του δυναμικού οξειδοαναγωγής. Σε αυτά τα εδάφη, παρατηρούνται χαμηλές συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου, επειδή οι απώλειές του σχετίζονται με την περιοδική αναγωγή του εδάφους χωρίς να εξισορροπούνται από τη συσσώρευση της οργανικής ύλης (Miller et al., 2001).

Στα κακώς αποστραγγιζόμενα εδάφη, παρατηρούνται σημαντικές απώλειες του ολικού φωσφόρου από τις ανόργανες δεξαμενές, όπου οι επικρατούσες αναγωγικές συνθήκες είναι ικανές να οδηγήσουν στη διαλυτοποίηση των οξειδίων του σιδήρου και του αργιλίου και ταυτόχρονα ικανές να προστατεύσουν την οργανική ύλη από την οξείδωση.

4.2.2. Αποτελέσματα του κλάσματος Resin-P στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3



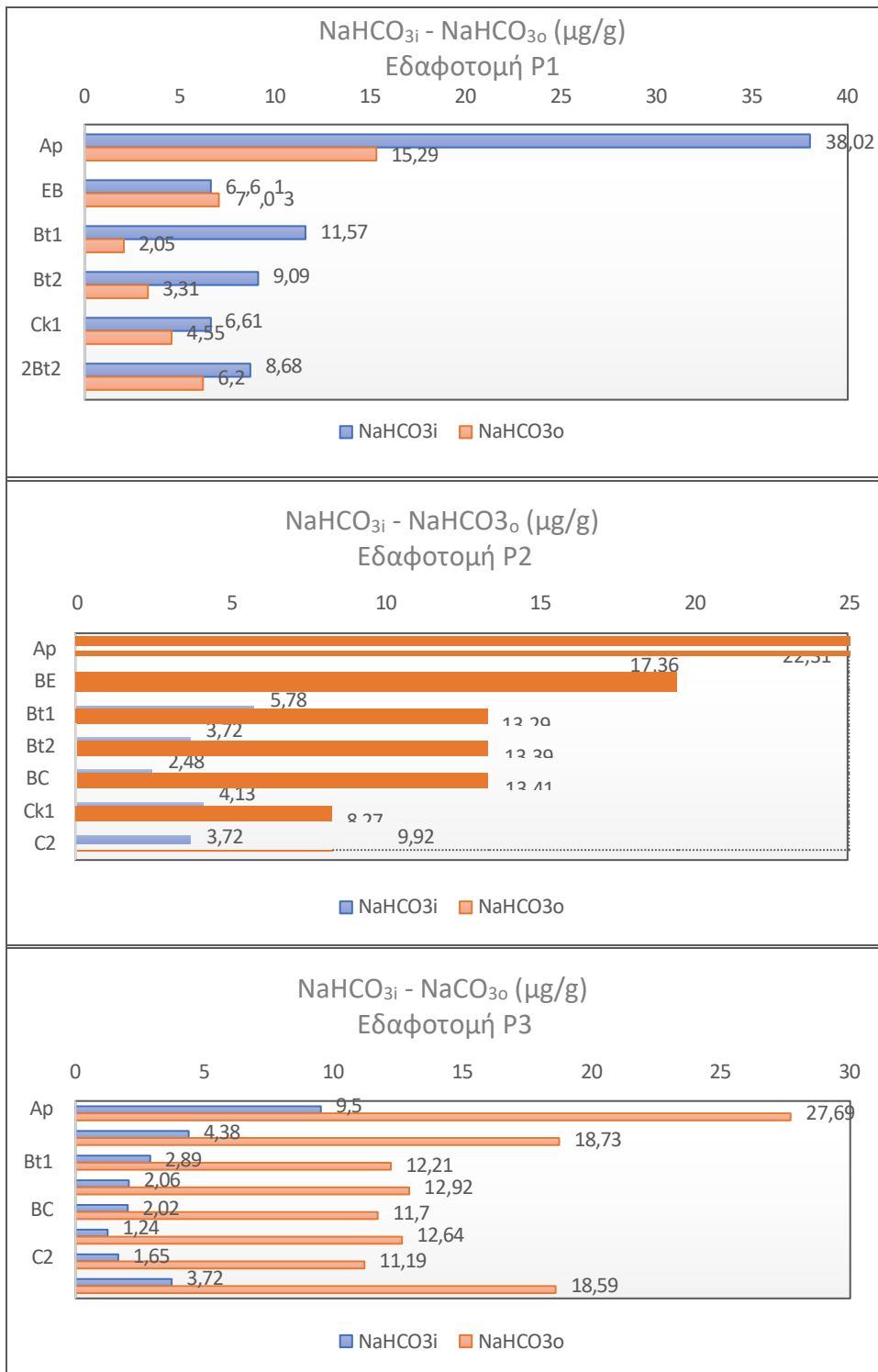
Διάγραμμα 4 Κατανομή του κλάσματος Resin-P στις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4 παρατηρείται ότι οι τιμές του κλάσματος της ρητίνης κυμαίνονται από 4,13 μg/g στον ορίζοντα BC της εδαφοτομής P2 έως 110,33 μg/g στον ορίζοντα Ap της εδαφοτομής P1. Αυτό που εμφανώς παρατηρείται είναι η μείωση του κλάσματος με το βάθος, με την απότομη αυτή μείωση να σημειώνεται κυρίως στους ορίζοντες της εδαφοτομής P1. Σύμφωνα με έρευνα των Tiessen and Moir (1993), σε όλα τα εδαφικά προφίλ που μελέτησαν, οι συγκεντρώσεις του κλάσματος της Resin-P ήταν υψηλότερες στους επιφανειακούς ορίζοντες και μειώνονταν απότομα με το βάθος τους. Επιπρόσθετα, το εκχυλίσμο κλάσμα με ρητίνη είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με τον συνολικό φώσφορο στο έδαφος.

Καθώς η υδρομορφία των εδαφών χειροτερεύει από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3, το κλάσμα της ρητίνης μειώνεται με τη μείωση αυτή να είναι ιδιαίτερα αισθητή στον επιφανειακό ορίζοντα των εδαφοτομών. Με λίγα λόγια, ο επιφανειακός ορίζοντας της εδαφοτομής P1 παρουσιάζει υψηλότερη τιμή από τον επιφανειακό ορίζοντα του κακώς αποστραγγιζόμενου εδάφους της εδαφοτομής P3.

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 4 αντιλαμβανόμαστε πως η κατανομή του κλάσματος της ρητίνης συνδέεται με την κατανομή των κλασμάτων NaHCO_3 και NaOH_i , όπως θα φανεί στα επόμενα διαγράμματα. Σε μια άλλη έρευνα των Wang et al. (2006) υποστηρίζεται ότι το κλάσμα Resin-P περιλαμβάνει τον βιοδιαθέσιμο φώσφορο και τον φώσφορο που είναι άμεσα ανταλλάξιμος, καθώς το εκχύλισμα ρητίνης δεν τροποποιεί χημικά τις ενεργές επιφάνειες των εδαφικών συστατικών.

4.2.3. Αποτελέσματα των κλασμάτων NaHCO_{3i} και NaHCO_{3o} στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3



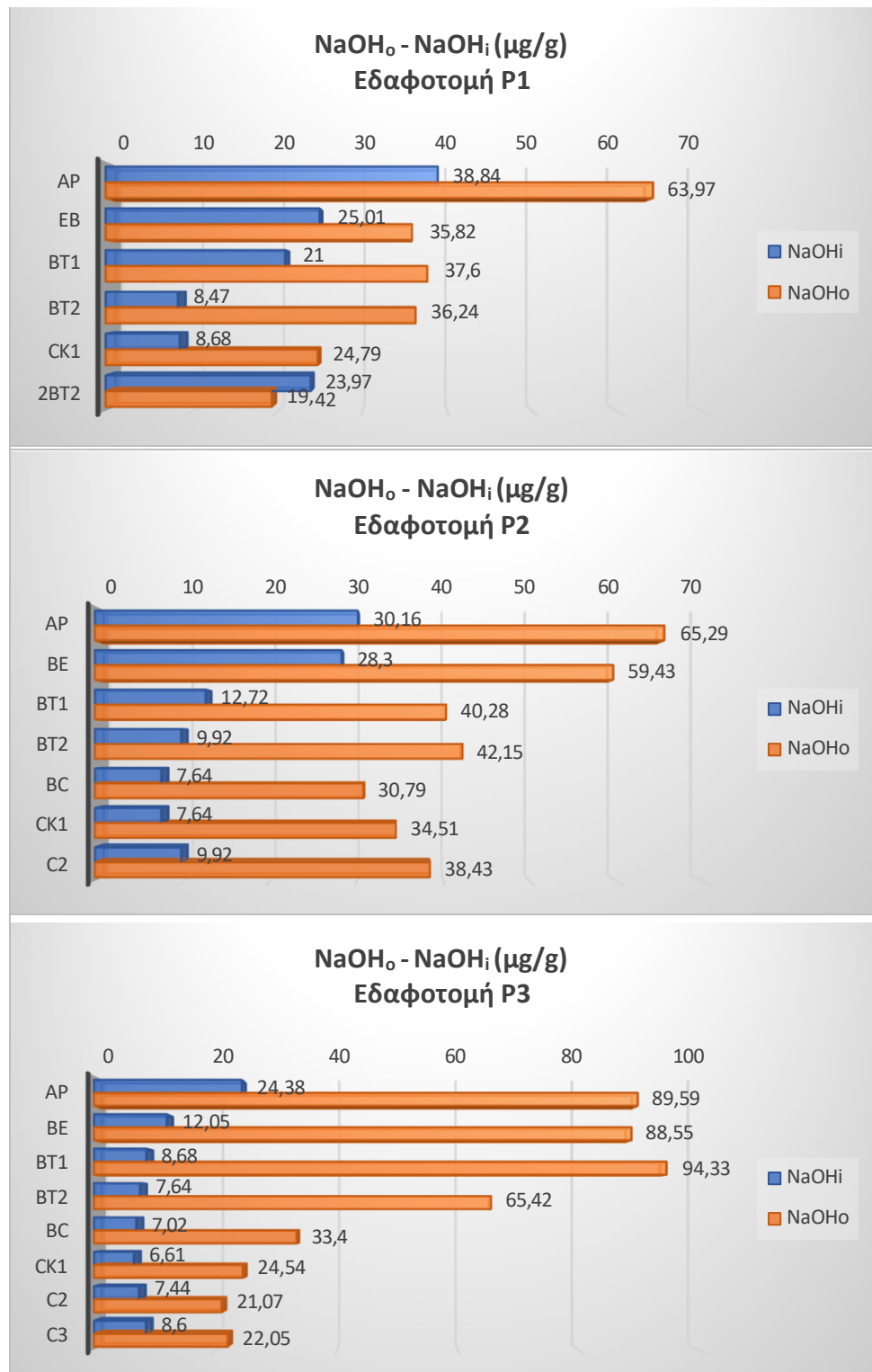
Διάγραμμα 5 Κατανομή των κλασμάτων NaHCO_{3i} και NaHCO_{3o} στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Στο Διάγραμμα 5 εμφανίζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων του οργανικού κλάσματος NaHCO_3o που κυμαίνεται από 2,05 $\mu\text{g/g}$ στον ορίζοντα Bt1 της εδαφοτομής P1 έως 27,69 $\mu\text{g/g}$ στον ορίζοντα Ap της εδαφοτομής P3.

Το ανόργανο κλάσμα NaHCO_3i παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση τιμών με εύρος από 1,24 $\mu\text{g/g}$ στον ορίζοντα Ck1 της εδαφοτομής P3 έως 38,02 $\mu\text{g/g}$ στον ορίζοντα Ap της εδαφοτομής P1. Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι το οργανικό κλάσμα NaHCO_3o αυξάνεται από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3, ενώ το ανόργανο κλάσμα NaHCO_3i μειώνεται από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3.

Σύμφωνα με αυτά απεικονίζεται μια προοδευτική απώλεια του φώσφορου στα κακώς αποστραγγιζόμενα εδάφη με τη μορφή του NaHCO_3i .

4.2.4. Αποτελέσματα των κλασμάτων NaOH_o και NaOH_i στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3



Διάγραμμα 6 Κατανομή των κλασμάτων NaOH_o και NaOH_i στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Στο Διάγραμμα 6 εμφανίζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων του οργανικού κλάσματος με την μικρότερη τιμή να εμφανίζεται στον ορίζοντα 2Bt2 της εδαφοτομής P1 και την υψηλότερη στον ορίζοντα Bt1 της εδαφοτομής P3.

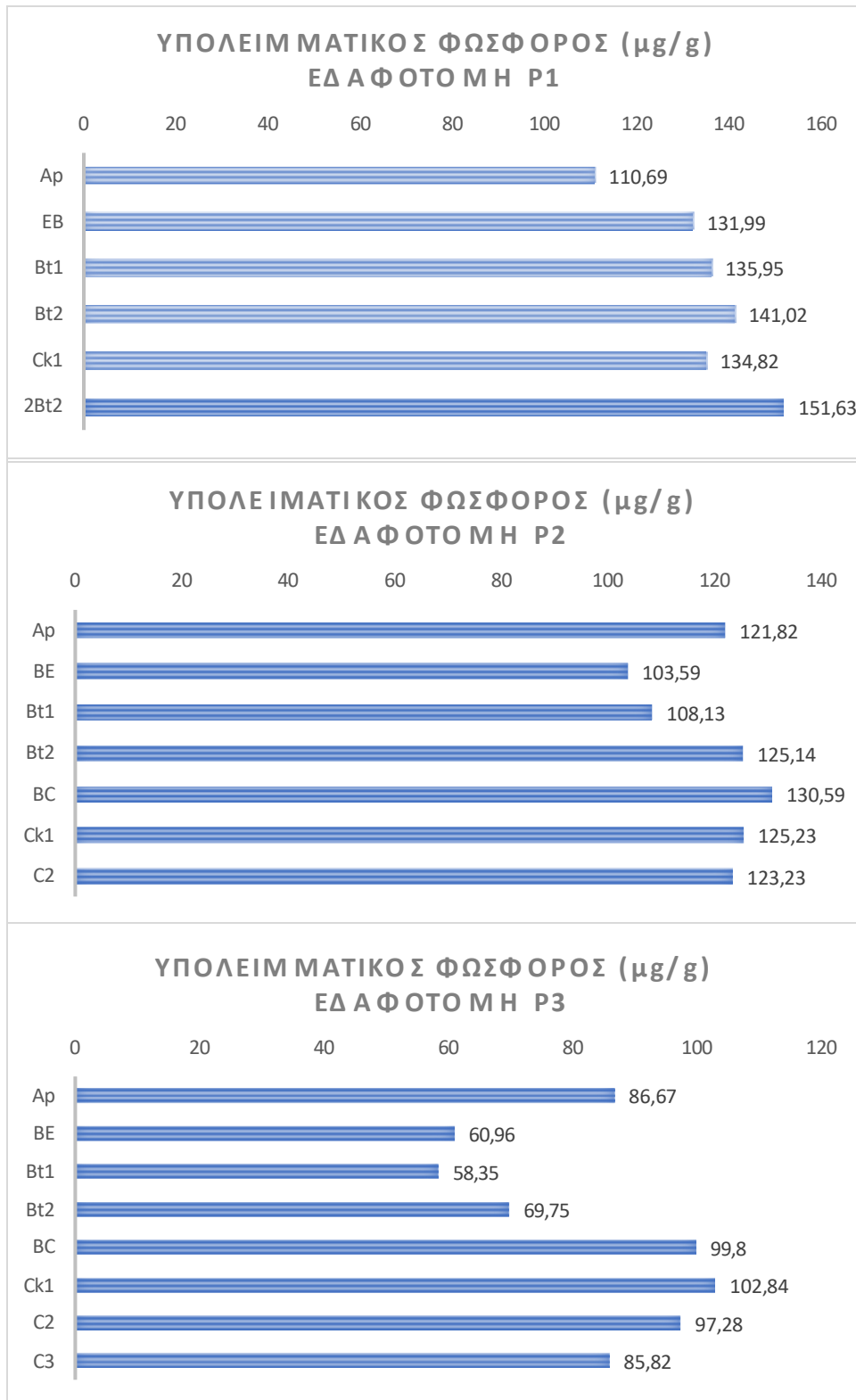
Το ανόργανο κλάσμα NaOH_i εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση τιμών με τη μεγαλύτερη να αντιστοιχεί σε 6,61 $\mu\text{g/g}$ στον ορίζοντα Ck1 της εδαφοτομής P3 και με τη χαμηλότερη σε 38,84 $\mu\text{g/g}$ στον ορίζοντα Ap της εδαφοτομής P1. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση του οργανικού κλάσματος NaOH_o αυξάνεται από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3, ενώ του ανόργανου κλάσματος NaOH_i μειώνεται από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3.

Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά των κλασμάτων του NaOH όπως και του NaHCO_3 γεγονός που υποστηρίζεται από τους Wang et. al (2006), οι οποίοι παρατήρησαν ότι το ανόργανο κλάσμα NaHCO_{3i} ακολουθεί την τάση του NaOH_i , ενώ το οργανικό κλάσμα NaHCO_{3o} συμβαδίζει με τη συμπεριφορά του NaOH_o σε εδάφη με διαφορετικές συνθήκες υδρομορφίας.

Η μεταχείριση με το αντιδραστήριο NaOH εκχυλίζει τον οργανικό κι ανόργανο φώσφορο που έχει προσροφηθεί τόσο στα δευτερογενή ορυκτά του εδάφους, όσο και στην οργανική ύλη και συγκεκριμένα στα χουμικά και φουλβικά οξέα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν παρόμοια συμπεριφορά του κλάσματος του NaOH με εκείνου του NaHCO_3 , όπου εμφανίζουν τις μεγαλύτερες απώλειες στα κακώς αποστραγγιζόμενα εδάφη.

4.2.5. Αποτελέσματα του κλάσματος του υπολειμματικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3



Διάγραμμα 7 Κατανομή του κλάσματος του υπολειμματικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

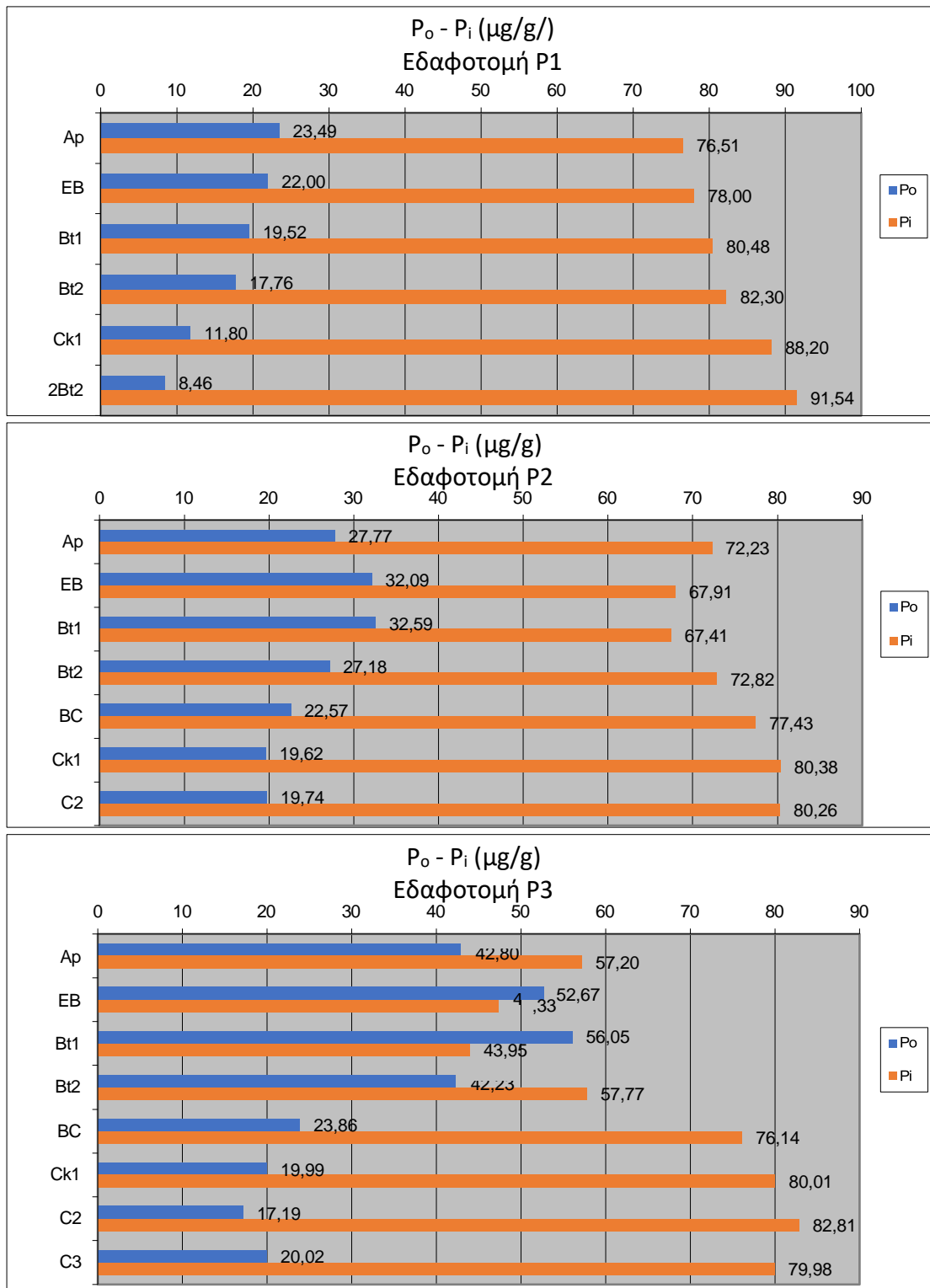
Το κλάσμα του υπολειμματικού φωσφόρου αποτελεί την πιο σταθερή οργανική και ανόργανη μορφή του φωσφόρου που έχει απομείνει στο έδαφος μετά από το στάδιο του πυκνού HCl (Thomas et al., 1967) και θεωρείται περιορισμένης διαθεσιμότητας για τα φυτά (Tiessen and Moir, 1993).

Παρατηρείται ότι οι τιμές αυτού του κλάσματος κυμαίνονται από 58,35 μg/g στον ορίζοντα Bt της εδαφοτομής P3 έως 151,63 μg/g στον ορίζοντα 2Bt2 της εδαφοτομής P3. Παρατηρείται διακύμανση των τιμών του κλάσματος μεταξύ των οριζόντων και των τριών εδαφοτομών με την εδαφοτομή P3 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διακύμανση.

Από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3, όπου η υδρομορφία χειροτερεύει, η συγκέντρωση του κλάσματος του υπολειμματικού φωσφόρου μειώνεται με τη μείωση αυτή να είναι ιδιαίτερα αισθητή στους επιφανειακούς ορίζοντες των εδαφοτομών. Πιο συγκεκριμένα, στον ορίζοντα 2Bt2 της εδαφοτομής P1 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη τιμή, ενώ στον ορίζοντα Bt1 του κακώς αποστραγγιζόμενου εδάφους της εδαφοτομής P3 παρουσιάζεται η μικρότερη τιμή.

Σύμφωνα με τους Miller et al. (2001) ο υπολειμματικός φώσφορος μειώθηκε με την αύξηση της υγρασίας λόγω των βροχοπτώσεων σε ορεινά δασικά εδάφη Χαβάης, και η μείωση αυτή ήταν εξαρτώμενη του εύρους της βροχόπτωσης. Στην ίδια έρευνα παρατηρήθηκε ότι η μείωση του υπολειμματικού φωσφόρου με την αύξηση της βροχόπτωσης ήταν παρόμοια με εκείνη που παρατηρήθηκε στην περίπτωση του κλάσματος NaOH_i.

4.2.6. Αποτελέσματα του γεωχημικού και βιολογικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3



Διάγραμμα 8 Κατανομή του γεωχημικού και βιολογικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Σε αντίθεση με το βιολογικό φώσφορο η διακύμανση των τιμών του γεωχημικού φωσφόρου ήταν μεγαλύτερη με εύρος από 43,95 μg/g στον ορίζοντα Bt1 της εδαφοτομής P3 έως 91,54 μg/g στον ορίζοντα 2Bt2 της εδαφοτομής P1. Παρατηρούμε ότι το ποσοστό του βιολογικού φωσφόρου αυξάνεται από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3, ενώ αντίθετα το ποσοστό του γεωχημικού φωσφόρου μειώνεται από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3.

Σημειώνεται ότι οι τιμές του βιολογικού φωσφόρου κυμαίνονται από 8,46 μg/g στον ορίζοντα 2Bt2 της εδαφοτομής P1 έως 56,05 μg/g στον ορίζοντα Bt1 της εδαφοτομής P3. Οι Cross και Schlensing (1995) παρατήρησαν ότι στα νεαρά εδάφη, ο οργανικός φώσφορος αποτελούσε περίπου το 5% του ολικού φωσφόρου, ενώ στα έντονα εξελιγμένα εδάφη το ποσοστό ήταν σημαντικά υψηλότερο έως 35% του ολικού φωσφόρου.

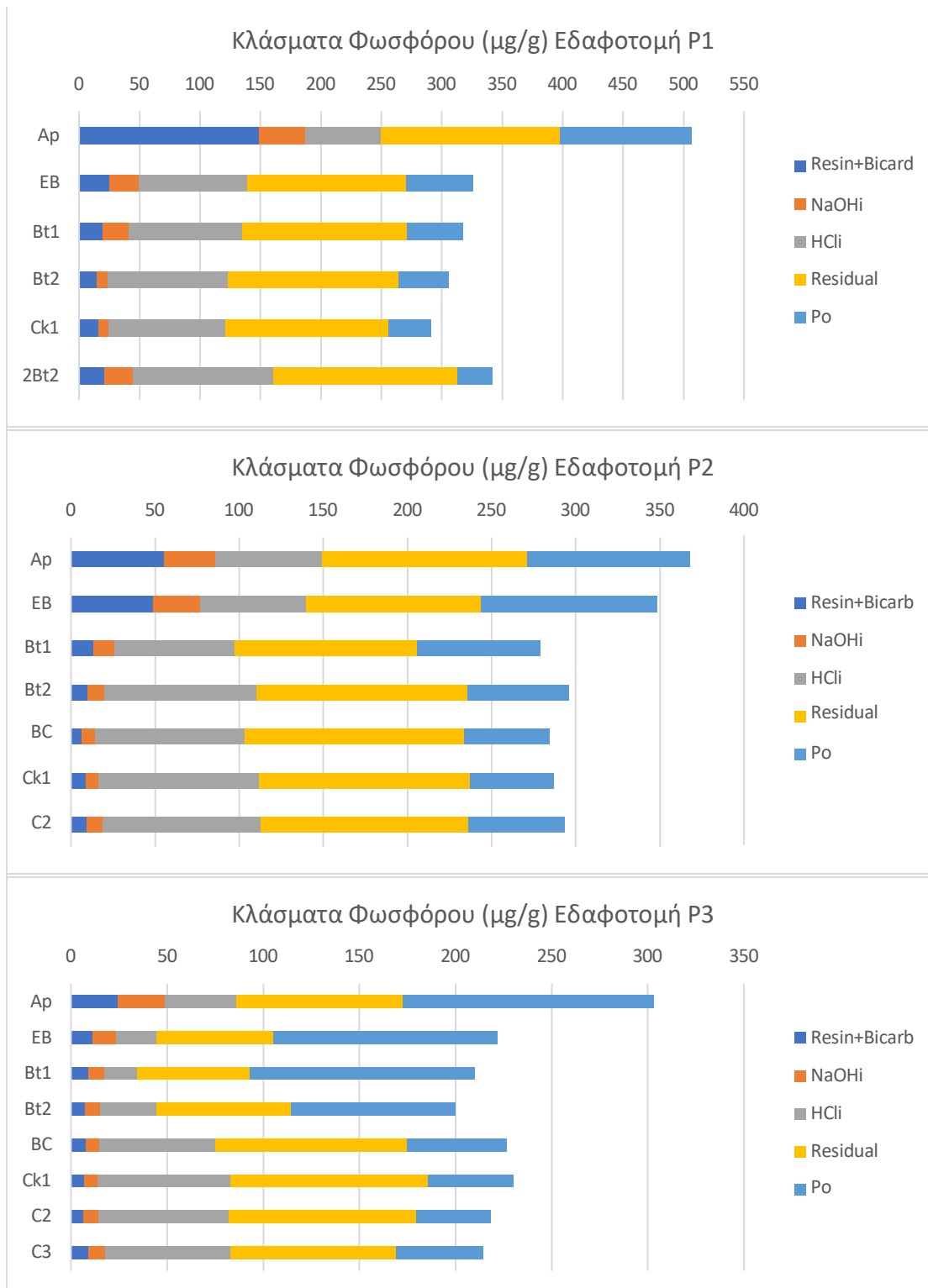
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και στις τρεις εδαφοτομές ο βιολογικός φώσφορος φαίνεται να μειώνεται σταθερά κάτω από τη θέση των αργιλικών οριζόντων. Στα καλώς αποστραγγιζόμενα εδάφη όπου επικρατούν κυρίως αερόβιες συνθήκες το μεγαλύτερο του φωσφόρου προσροφάται στις επιφάνειες των ορυκτών.

Τα μετρίως αποστραγγιζόμενα εδάφη χαρακτηρίζονται από την παρουσία εναλλασσόμενων περιόδων οξειδοαναγωγικών συνθηκών κατά τη διάρκεια των οποίων έχουν διαλυτοποιηθεί οξείδια του σιδήρου και του αργιλίου και ταυτόχρονα η ένταση των συνθηκών επιβραδύνει τους ρυθμούς οξείδωσης της οργανικής ύλης. Επομένως, αποτελούν μια ενδιάμεση κατάσταση υδρομορφίας των εδαφών, όπου παρατηρούνται χαμηλά επίπεδα ολικού φωσφόρου, με το μεγαλύτερο ποσοστό του να παραμένει συνδεδεμένο με ανθεκτικά ορυκτά.

Στην κατηγορία των κακώς αποστραγγιζόμενων εδαφών, παρατηρούνται μεγάλες απώλειες ανόργανου φωσφόρου λόγω των αναγωγικών συνθηκών, απώλειες οι οποίες αντισταθμίζονται από τη συσσώρευση οργανικού φωσφόρου. Επομένως, ενώ ο ανόργανος φώσφορος αποτελεί το μεγαλύτερο κομμάτι του ολικού φωσφόρου στα καλώς και μετρίως αποστραγγιζόμενα εδάφη, ο οργανικός φώσφορος φαίνεται να είναι το κυρίαρχο κομμάτι του ολικού φωσφόρου στα κακώς αποστραγγιζόμενα εδάφη. Η μεγάλη διάρκεια κι ένταση των αναγωγικών συνθηκών επιβραδύνουν το ρυθμό αποσύνθεσης της οργανικής ύλης, διατηρώντας οργανικό φώσφορο που υπό διαφορετικές συνθήκες θα μπορούσε να είχε χαθεί μέσω ανοργανοποίησης.

Σύμφωνα με τους Graça et al. (2021), οι διαφορές στον ανόργανο P_i φώσφορο σε σχέση με την υδρομορφία των εδαφών ήταν ανάλογες με τη διαθεσιμότητα του φωσφόρου για τα φυτά, με τα εδάφη με την υψηλότερη συγκέντρωση διαθέσιμου φωσφόρου να παρατηρείται στα καλώς αποστραγγιζόμενα εδάφη.

4.2.7. Κατανομή των διαφόρων κλασμάτων του φωσφόρου σε σχέση με τη συνολική ποσότητα του φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3



Διάγραμμα 9 Κατανομή των διαφόρων κλασμάτων του φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές P1, P2 και P3.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 9 η επικρατέστερη μορφή του φωσφόρου σχεδόν στους περισσότερους ορίζοντες των τριών εδαφοτομών είναι το κλάσμα του υπολειμματικού φωσφόρου. Σημαντική εξαίρεση αποτελούν οι πρώτοι τέσσερις ορίζοντες της εδαφοτομής P3, όπου επικρατεί το οργανικό κλάσμα του εκχυλιζόμενου φωσφόρου. Η τιμή του υπολειμματικού φωσφόρου, ως ποσοστό του ολικού φωσφόρου μειώνεται με το βάθος και στις τρεις εδαφοτομές.

Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι η τιμή του κλάσματος Resin + Bicarb P_i που αντιπροσωπεύει τον συνολικά διαθέσιμο φώσφορο μειώνεται με την αύξηση του βάθους και στις τρεις εδαφοτομές, ενώ αντίθετα η συγκέντρωση του αραιού HCl - P_i , αυξάνεται με το βάθος. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζουν κι άλλοι ερευνητές οι οποίοι δείχνουν ότι το κλάσμα HCl - P_i αυξάνεται με το βάθος σημειώνοντας υψηλότερες τιμές στους ορίζοντες C από ότι στους επιφανειακούς ορίζοντες A σε εδάφη με φυσική βλάστηση (Schoneau et al., 1989, Roberts et al., 1985). Η αύξηση του αραιού HCl - P_i οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό αποσάθρωσης των επιφανειακών οριζόντων και την απελευθέρωση του φωσφόρου από τα πρωτογενή ορυκτά. Τέλος, παρατηρείται ότι η συνολική συγκέντρωση του κλάσματος P_o μειώνεται όσο αυξάνεται σε βάθος και στις τρεις εδαφοτομές.

5. Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη είναι τα ακόλουθα:

1. Τα εδάφη της τάξης των Alfisols της παρούσας μελέτης χαρακτηρίζονται από μετρίως χονδρόκοκκα έως λεπτόκοκκα, ενώ ανάλογα με τη διακύμανση της τιμής της εδαφικής τους οξύτητας χαρακτηρίζονται από ισχυρώς όξινα έως ελαφρώς βασικά.
2. Όσον αφορά στη κλάση της υδρομορφίας η εδαφοτομή P1 χαρακτηρίζεται ως έδαφος μετρίως - ατελώς αποστραγγιζόμενο, όπου κατά τη διάρκεια των υγρών μηνών η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα φθάνει μέχρι τα 40 cm από την επιφάνεια. Η εδαφοτομή P2 χαρακτηρίζεται ως έδαφος ατελώς αποστραγγιζόμενο, όπου κατά τη διάρκεια των υγρών μηνών η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα φθάνει μέχρι τα 25 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Η εδαφοτομή P3 χαρακτηρίζεται ως έδαφος κακώς αποστραγγιζόμενο, όπου κατά τη διάρκεια των υγρών μηνών η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα φθάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.
3. Στις συγκριμένες εδαφοτομές των Alfisols τα μεγαλύτερα ποσά φωσφόρου εκχυλίστηκαν στο στάδιο του υπολειμματικού φωσφόρου. Σημαντική εξαίρεση αποτελούν οι πρώτοι τέσσερις οριζόντες της εδαφοτομής P3, όπου επικρατεί το οργανικό κλάσμα του εκχυλιζόμενου φωσφόρου. Το κλάσμα του υπολειμματικού φωσφόρου αποτελεί την πιο σταθερή οργανική και ανόργανη μορφή του φωσφόρου και θεωρείται περιορισμένης διαθεσιμότητας για τα φυτά. Η επικράτηση αυτής της μορφής του φωσφόρου δείχνει ότι κατά τη διάρκεια της εδαφογένεσης, ο φώσφορος μετακινήθηκε από τις διαθέσιμες και μη έγκλειστες μορφές, στις έγκλειστες και δύσκολα αποδομήσιμες μορφές. Η τιμή του υπολειμματικού φωσφόρου, ως ποσοστό του ολικού φωσφόρου μειώνεται, καθώς μεταβαίνουμε από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3 λόγω κακής υδρομορφίας.
4. Η συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου στις τρεις εδαφοτομές μειώνεται σταθερά με το βάθος μέχρι τον του ολικού φωσφόρου στον επιφανειακό ορίζοντα οφείλεται στη συσσώρευση της οργανικής ουσίας στην επιφάνεια του εδάφους.
5. Καθώς η υδρομορφία των εδαφών χειροτερεύει καθώς προχωράμε από την εδαφοτομή P1 στην εδαφοτομή P3, παρατηρείται αισθητή μείωση του ολικού φωσφόρου, αντίστοιχα.
6. Η τιμή του κλάσματος Resin + Bicarb P_i που αντιπροσωπεύει τον διαθέσιμο φώσφορο των εδαφοτομών μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος στους οριζόντες και των τριών εδαφοτομών, ενώ η τιμή του αραιού HCl - P_i σε σχέση με τον ολικό φώσφορο, αυξάνεται με το βάθος και στις τρεις εδαφοτομές.

6. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Apostolidis, E., & Koukis, G. (2013). *Engineering-geological conditions of the formations in the Western Thessaly basin, Greece*. Central European Journal of Geosciences.

Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1957). *Les climats biologiques et leur classification*. In *Annales de géographie* (Vol. 66, No. 355, pp. 193-220) Armand Colin.

Baillie, I. C. (2001). *Soil Survey Staff 1999, Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Agricultural Handbook 436, Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington DC, USA, pp. 869. *Soil Use and management*, 17(1), 57-60.

Bate, D. B., Barrett, J. E., Poage, M. A., & Virginia, R. A. (2008). *Soil phosphorus cycling in an Antarctic polar desert*. *Geoderma*, 144(1-2), 21-31 ISO 690.

Brady, N. C. and Weil, R. R. (1996). *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall Inc, New Jersey.

Chang, S. C., & Jackson, M. L. (1957). *Solubility product of iron phosphate*. *Soil Science Society of America Journal*, 21(3), 265-269.

Cross, A. F., & Schlesinger, W. H. (1995). *A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems*. *Geoderma*, 64(3-4), 197-214.

Gasparatos, D., Haidouti, C., Antonakos, G., Haroulis, A., & Massas, I. (2004). *Chemical characterization of soil phosphorus in a Greek Alfisol under continuous cultivation*. *ESNA UIR*, 12.

Graça, J., Daly, K., Bondi, G., Ikoyi, I., Crispie, F., Cabrera-Rubio, R., & Schmalenberger, A. (2021). *Drainage class and soil phosphorus availability shape microbial communities in Irish grasslands*. *European Journal of Soil Biology*, 104, 103297.

Guo, F., & Yost, R. S. (1998). *Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability*. *Soil Science*, 163(10), 822-833.

Harrison AF. (1987). *Soil Organic Phosphorus-A Review of World Literature*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, p 257.

Jenny, H. (1980). *The Soil Resource: Origins and Behaviour*. Springer-Verlag, Berlin.

<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-6112-4>

Kanwar, B. B., Verma, T. S., & Tripathi, B. R. (1983). *Phosphorus fractions in relation to soil properties and genesis in alfisols and inceptisols of Himachal Pradesh.* Journal of the Indian Society of Soil Science, 31(1), 65-72.

Miller, A. J., Schuur, E. A., & Chadwick, O. A. (2001). *Redox control of phosphorus pools in Hawaiian montane forest soils.* Geoderma, 102(3-4), 219-237.

Miller, G. A., & Azad, S. (2000). *Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust.* Construction and building materials, 14(2), 89-97.

Munsell, S. C. C., & Notation, A. C. (1954). *Munsell Color Company.* Inc., Baltimore, 18. ISO 690.

Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters.* Analytica chimica acta, 27, 31-36.

Negassa, W., & Gebrekidan, H. (2003). *Forms of phosphorus and status of available micronutrients under different land-use systems of Alfisols in Bako area of Ethiopia.* Ethiopian Journal of Natural Resources, 5(1), 17-37.

Neumann G., Römheld V. (2002). *Root-induced changes in the availability of nutrients in the rhizosphere.* Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U, Plant Roots, The Hidden Half, Ed 3 Marcel Dekker, Inc, New York, pp 617–649.

Oelkers EH., Valsami-Jones E. (2008). *Phosphate mineral reactivity and global sustainability.* Elements 4: 83–87.

Pathak, P., Sudi, R., Wani, S. P., & Sahrawat, K. L. (2013). *Hydrological behavior of Alfisols and Vertisols in the semi-arid zone: Implications for soil and water management.* Agricultural Water Management, 118, 12-21.

Patle, T., Khaddar, V. K., Tiwari, R., & Para, P. (2019). *Phosphorus Fractions in Different Soil Orders in India and their Relationship with Soil Properties.* Int J Curr Microbiol App Sci, 8(5), 1609-1620.

Paulos Dubale (1996). *Availability of phosphorus in the coffee soil of southwest Ethiopia.* pp 119-129 In: Tekalign Mamo and Mitiku Haile (eds.) Soil the Resource Base for Survival. Proceeding of 15 the second conference of Ethiopian Society of Soil Science (ESSS), 23-24 September 1993, Addis Ababa, Ethiopia.

Pierzynski GM., McDowell RW., Sims JT. (2005). *Chemistry, cycling, and potential moment of inorganic phosphorus in soils.* Sims JT, Sharpley AN, Phosphorus: Agriculture and the Environment. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Inc, Madison, WI, pp 53–86.

Rasmussen, P. E. and C. L. Douglas (1992). *The influence of tillage and cropping intensity on cereal response to nitrogen, sulfur and phosphorus*. Fertilizer Research 31: 15-19.

Ravikumar P. and Somashekar RK. (2014). *Spatial distribution of macronutrients in soils of Markandeya river basin, Belgaum, Karnataka, India*. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Science 4(2): 81-94.

Rishid, P. (2019). *Understanding phosphorus forms and their cycling in the soil*. ANR-2535, 100(1–2).

Roberts, T. L., Stewart, J. W. B., & Bettany, J. R. (1985). *The influence of topography on the distribution of organic and inorganic soil phosphorus across a narrow environmental gradient*. Canadian Journal of Soil Science, 65(4), 651-665 ISO 690.

Ruttenberg K. C. (2001). *Phosphorus Cycle*. Encyclopedia of Ocean Sciences.

Sanchez, Pedro A., and Terry J. Logan. (1992). *Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics*. Myths and Science of Soils of the Tropics 29:35-46.

Sattell, R. R., & Morris, R. A. (1992). *Phosphorus fractions and availability in Sri Lankan Alfisols*. Soil Science Society of America Journal, 56(5), 1510-1515.

Schoenau, J. J., Stewart, J. W. B., & Bettany, J. R. (1989). *Forms and cycling of phosphorus in prairie and boreal forest soils*. Biogeochemistry, 8, 223-237.

Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X. & Zhang, F. (2011). *Phosphorus dynamics: from soil to plant*. Plant physiology, 156(3), 997-1005.

Soil Survey Staff. (1992). *Keys to soil taxonomy*. Soil Manage Support Serv Tech Monogr 19 5th ed Pocahontas Press, Blacksburg, VA.

Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2nd Edition, Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture Handbook, Washington DC, 436.

Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy*, 13th ed USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Soil Taxonomy, Natural Resources Conservation Service. US Department of Agriculture. Retrieved from: <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-taxonomy>.

Thomas, R. L., Sheard, R. W., & Moyer, J. R. (1967). *Comparison of conventional and automated procedures for nitrogen, phosphorus, and potassium analysis of plant material using a single digestion* *1 Agronomy Journal*, 59(3), 240-243.

Tiessen, H., & Moir, J. O. (1993). *Total and organic carbon*. Soil sampling and methods of analysis, 187-199 ISO 690.

Turner BL., Richardson AE., Mullaney EJ. (2007). *Inositol phosphates in soil: amounts, forms and significance of the phosphorylated inositol stereoisomers*. Inositol Phosphates; Linking Agriculture and the Environment CABI, Wallingford, UK 186–206.

Walker, T. W., & Syers, J. K. (1976). *The fate of phosphorus during pedogenesis*. *Geoderma*, 15(1), 1-19.

Wang, G. P., Liu, J. S., Wang, J. D., & Yu, J. B. (2006). *Soil phosphorus forms and their variations in depressional and riparian freshwater wetlands (Sanjiang Plain, Northeast China)*. *Geoderma*, 132(1-2), 59-74.

Whitebread, AM., Lefroy, RDB. and GJ. Blair. (1998). *A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in Northwestern New South Wales*. *Australian Journal of Soil Research* 36: 669-681.

World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. (2016). Retrieved from: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>.

World Reference Base for Soil Resources (WRB). Retrieved from: <https://www.isric.org/explore/wrb>.

7. Ελληνική Βιβλιογραφία

Γεωλογικός Χάρτης – Δήμος Καρδίτσας. (2015). Ανακτήθηκε από:
<https://dimoskarditsas.gov.gr/wp-content/uploads/2015/07/MAP-3.pdf>.

Δεδομένα Μετεωρολογικού Σταθμού Καρδισσομαγούλας, Καρδίτσας. Ανακτήθηκε από:
<https://www.meteo.gr>.

Μιγκίρος, Γ. Π. (1998). Συνοπτική περιγραφή του ορυκτού πλούτου της Θεσσαλίας: γεωτεκτονική ένταξη-αξιοποίηση πόρων *The mineral wealth of Thessaly (Central Greece): geotectonic setting-resource development*. Ορυκτός Πλούτος, 1998(108), 15-26.

Παναγιωτόπουλος Κ. (2008). *Εδαφολογία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις: Άγιος-Σάββας Δ Γαρταγάνης.