

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Ανάπτυξη ομοιώματος προσομοίωσης για την
ανάλυση της λειτουργίας αρδευτικών δικτύων υπό
πίεση ελεύθερης ζήτησης**

ΑΓΓΕΛΙΚΗ Κ. ΣΤΕΦΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Νικόλαος Δέρκας



ΑΘΗΝΑ 2013

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ανάπτυξη ομοιώματος προσομοίωσης για την ανάλυση της λειτουργίας αρδευτικών δικτύων υπό πίεση ελεύθερης ζήτησης

ΑΓΓΕΛΙΚΗ Κ. ΣΤΕΦΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Νικόλαος Δέρκας, Αναπλ. Καθηγητής ΓΠΑ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή: Ν. Δέρκας, Αναπλ. Καθηγητής, ΓΠΑ

Ι. Δ. Βαλιάντζας, Καθηγητής ΓΠΑ

Σ. Ελμαλόγλου, Καθηγητής ΓΠΑ

Επταμελής εξεταστική επιτροπή: Ν. Δέρκας, Αναπλ. Καθηγητής, ΓΠΑ

Ι. Δ. Βαλιάντζας, Καθηγητής ΓΠΑ

Σ. Ελμαλόγλου, Καθηγητής ΓΠΑ

Γ. Τσακίρης, Καθηγητής ΕΜΠ

Ε. Μπαλτάς, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Ι. Αργυροκαστρίτης, Αναπλ. Καθηγητής ΓΠΑ

Χ. Καραβίτης, Επίκ. Καθηγητής ΓΠΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για την ανάλυση της λειτουργίας υπό πίεση συλλογικών αρδευτικών δικτύων που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε υλοποιεί την ανάλυση αυτή σε επίπεδο δικτύου προκειμένου να δοθεί μια γενική εικόνα της λειτουργικής επάρκειας του δικτύου και σε επίπεδο υδροστομίου ώστε να εντοπιστούν τα συγκεκριμένα σημεία του δικτύου που παρουσιάζουν προβλήματα. Το μοντέλο αναπτύχθηκε ως ανεξάρτητη εφαρμογή ώστε να υπάρχει η δυνατότητα παρέμβασης σε οποιοδήποτε σημείο της ανάλυσης καθώς επίσης και επέκτασής του με νέες δυνατότητες. Επιπλέον, το μοντέλο αναπτύχθηκε έχοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν αρκετά από τα υπό πίεση συλλογικά αρδευτικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης στην Ελλάδα (πχ. μεγάλος αριθμός χρηστών ανά υδροληψία, κα) και με στόχο την αρτιότερη διαχείριση των έργων αυτών.

Η λειτουργικότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε εξασφαλίστηκε με τη δημιουργία ενός εύχρηστου και απλού γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής με το χρήστη (GUI). Το γραφικό περιβάλλον διεπαφής ακολουθεί το πρότυπο του παραθυρικού περιβάλλοντος ώστε ο χρήστης να αντιμετωπίζει ένα γνώριμο περιβάλλον και εύχρηστο περιβάλλον.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει μεταξύ διάφορων εξισώσεων για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών. Οι εξισώσεις που ενσωματώθηκαν ήταν η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την εξίσωση των Colebrook-White (DW-CW) για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας, η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την σχέση των Swamee και Jain (DW-SJ), η σχέση των Hazen –Williams, η εξίσωση του Darcy με την παράμετρο γ του Bazin, η εξίσωση των Calmon και Lechart και η εξίσωση του Valiantzas (2008).

Για την εφαρμογή του μοντέλου που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκαν δύο αντιπροσωπευτικά ελληνικά δίκτυα, το δίκτυο των Ιρίων στην Αργολίδα και το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά στο νομό Λακωνίας. Τα δύο αυτά δίκτυα είναι υπό πίεση συλλογικά αρδευτικά δίκτυα που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση τριών εφαρμογών όπως περιγράφονται στη συνέχεια.

Αρχικά, έγινε διερεύνηση της επίδρασης που έχει στην ανάλυση σε επίπεδο δικτύου και υδροστομίου η επιλογή της εξίσωσης για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών. Χρησιμοποιήθηκαν οι προαναφερθείσες εξισώσεις για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από τη χρήση της εξίσωσης των Darcy-Weisbach με την εξίσωση των Colebrook-White για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας. Μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάστηκαν όταν οι αγωγοί του δικτύου είχαν μεγαλύτερο συντελεστή τραχύτητας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για παροχές στην κεφαλή χαμηλότερες της παροχής Clément, όλες οι εξισώσεις που εξετάστηκαν δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, ωστόσο για παροχές μεγαλύτερες από την παροχή Clément οι αποκλίσεις αυξάνονταν. Αυτό σημαίνει ότι η εξίσωση που υιοθετείται για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών θα επηρεάσει την ακρίβεια του μοντέλου των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες στην περίπτωση κορεσμένων δικτύων ή δικτύων για τα οποία η παροχή στην κεφαλή του δικτύου έχει διαφοροποιηθεί.

Με το μοντέλο που αναπτύχθηκε, διερευνήθηκε επίσης η επίδραση της εξίσωσης των γραμμικών απωλειών στην ανάλυση της λειτουργίας των δικτύων ελεύθερης ζήτησης σε επίπεδο υδροστομίου. Χρησιμοποιήθηκαν και εδώ οι προαναφερθείσες εξισώσεις για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών και προέκυψε ότι οι εξισώσεις DW-SJ και Valiantzas (2008) παρουσιάζουν αποτελέσματα κοντά σε αυτά που δίνει η εξίσωση αναφοράς (DW-CW).

Επιπλέον, προτείνεται ένας νέος δείκτης αξιοπιστίας που στοχεύει να αναδείξει όχι μόνο την πιθανότητα ενός υδροστομίου να αποτύχει, αλλά και το εύρος της αποτυχίας αυτής. Έτσι, με τη χρήση του συγκεκριμένου δείκτη αναδεικνύονται τα υδροστόμια του δικτύου με υψηλό διαθέσιμο φορτίο πίεσης, τα οποία έχουν μικρότερη πιθανότητα αποτυχίας κατά την περίοδο αιχμής.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας με το μοντέλο που υλοποιήθηκε, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της τιμής του συντελεστή γ του Bazin στη χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προέκυψε ότι η τιμή του συντελεστή επηρεάζει σημαντικά την ανάλυση για παροχές στην κεφαλή μεγαλύτερες από την παροχή Clément.

Συγκεντρωτικά, στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για την ανάλυση της λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης, το οποίο

με τις πληροφορίες που παρέχει μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη διαχείριση των έργων αυτών και στον προγραμματισμό των απαιτούμενων παρεμβάσεων για τον εκσυγχρονισμό της λειτουργίας τους. Επιπλέον, δημιουργήθηκε από μηδενική βάση ένα εργαλείο το οποίο επιτρέπει την παρέμβαση σε οποιοδήποτε σημείο της ανάλυσης αλλά και την επέκτασή του με νέες δυνατότητες προκειμένου να καλύψει μελλοντικές ανάγκες.

Λέξεις κλειδιά: Συλλογικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης, υδραυλική ανάλυση λειτουργίας, μοντέλο προσομοίωσης, αντικειμενοστραφής προγραμματισμός, Visual Basic.net, γραμμικές απώλειες, δείκτες αξιολόγησης

ABSTRACT

In this thesis a model was developed for the operational analysis of under pressure collective irrigation networks operating on- demand. The developed model implements this analysis at network level in order to give an overview of the operational condition of the network and at hydrant level in order to identify the specific parts of the network that present problems in their operation. The model was developed as a standalone application aiming to allow the user's intervention at any part of the analysis as well as extending the model's capacities with new features. Furthermore, the model was developed with regard to the specific features of several Greek pressurized collective irrigation networks (e.g. large number of users per abstraction, etc) and in order to improve management of these projects.

The functionality of the developed model was ensured by creating an easy to use and simple graphical user interfaces (GUI). The user is familiar with windows environment of the graphical user interface.

The developed model enables the user to choose between different head losses formulas. The formulas which were incorporated were Darcy-Weisbach equation with Colebrook-White formula for the calculation of the friction factor (DW-CW), Darcy-Weisbach formula with Swamee and Jain (DW-SJ), Hazen-Williams formula, Darcy's formula with the roughness parameter γ of Bazin, Calmon and Lechapt formula and Valiantzas formula (2008).

For the application of the developed model, two Greek representative networks were chosen, the network of Iria at Argolida and the network of Kalyvia-Socha in the prefecture of Laconia. The two networks are collective pressurized irrigation networks operating on- demand. The model developed employed to implement three applications as described below.

Initially, we examined the effect of the head losses formula on the operation analysis at network level. The abovementioned formulas were used to calculate the head losses and the results were compared to those obtained by using the equation of Darcy-Weisbach equation with the Colebrook-White formula for the calculation of the

roughness coefficient. Greater deviations were observed for network pipes with greater roughness coefficient. Moreover, for upstream discharges up to the Clément discharge, all the examined formulas gave similar results, however for upstream discharges greater than the Clément discharge the observed deviations were increased. This means that the adopted formula for the calculation of the head losses will affect the accuracy of the indexed characteristic curves in the case of saturated networks or in the case of networks for which the upstream discharge has changed significantly.

The developed model was also used in order to investigate the effect of the adopted formula for the head losses evaluation at hydrant level analysis. The same formulas were examined and the presented results indicate that DW-SJ formula and Valiantzas (2008) formula present results closer to those given by the reference formula (DW-CW).

A new reliability indicator was also suggested that aims to highlight not only the probability of a hydrant to fail, but also the extent of this failure. Thus, the use of the new indicator accentuates the hydrants with high available pressure head, which have lower probability of failure during the peak season.

Finally, a sensitivity analysis was implemented with the developed model, in order to investigate the effect of the value of the γ Bazin's coefficient on the design of the indexed characteristic curves. The results of the analysis indicate that the coefficient value significantly affects the analysis when the upstream discharges are greater than the Clément discharge.

In a nutshell, in this thesis a model was developed for the operation analysis of collective irrigation networks operating on-demand, at network and at hydrant level. The developed model provides information that contributes significantly to the management of these projects and the planning of the required interventions to modernize their operation. In addition, the developed model was created from scratch as a tool which allows intervention at any point of the analysis and allows also its extension with new capabilities to meet future needs.

Key Words: Collective irrigation networks on-demand, hydraulic performance analysis, simulation model, object-oriented programming, Visual Basic.net, friction loss, performance indicators

*Στους γονείς μου,
Κώστα και Αθηνά*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω εκείνους που συνέβαλαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην ολοκλήρωση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γ.Π.Α, κ. Νικόλαο Δέρκα, Επιβλέποντα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας. Σε δύσκολες στιγμές, όταν απορίες, δυσκολίες και δισταγμοί, έκαναν την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής να φαντάζει μακρινή και αβέβαιη, με τις επιστημονικές του γνώσεις και την εμπειρία του με καθοδηγούσε και μου υποδείκνυε τη σωστότερη λύση. Χωρίς την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση, την ηθική συμπαράσταση και την ενθάρρυνσή του, θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της παρούσας προσπάθειας.

Τους Καθηγητές του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γ.Π.Α κ. Ιωάννη Βαλιάντζα και κ. Σταμάτη Ελμαλόγλου, μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής, θα ήθελα να τους ευχαριστήσω θερμά για το χρόνο που αφιέρωσαν για τη μελέτη της διατριβής και τις χρήσιμες υποδείξεις τους. Οι συμβουλές τους καθόλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας ήταν πολύτιμες.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ κ. Γεώργιο Τσακίρη, τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ κ. Ευάγγελο Μπαλά, τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γ.Π.Α κ. Ιωάννη Αργυροκαστρίτη και τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γ.Π.Α κ. Χρίστο Καραβίτη για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και το χρόνο που αφιέρωσαν για την μελέτη της διατριβής.

Το τ.Καθηγητή του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γ.Π.Α κ. Γεώργιο Καραντούνια, για την αρχική συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή και τις επικοδομητικές συζητήσεις που είχαμε πάνω σε θέματα που αφορούσαν στο αντικείμενο της συγκεκριμένης διατριβής.

Το συνάδελφο κ. Γιώργο Μπουραζάνη θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη βοήθειά του στην απόκτηση της αρχικής μελέτης του Δικτύου Καλυβίων-Σοχά, αλλά και για τη διαρκή βοήθειά του κατά τις επισκέψεις μου στο συγκεκριμένο δίκτυο για τη συλλογή δεδομένων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Ασημακόπουλο, υπάλληλο του ΤΟΕΒ Καλυβίων-Σοχά, γιατί η καλή του διάθεση και η προθυμία του να με βοηθήσει κατά τη συλλογή δεδομένων από το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά ήταν πολύ σημαντικές για την κατανόηση της λειτουργίας του συγκεκριμένου δικτύου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και την υπομονή τους. Στην πίστη, την αισιοδοξία, καθώς και στο κουράγιο που αντλούσα από αυτούς καθημερινά, οφείλεται ένα μεγάλο μέρος αυτής της προσπάθειας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που κατάφεραν στις δύσκολες στιγμές, να μετατρέπουν την απογοήτευσή μου σε πηγή έμπνευσης με την καλή τους διάθεση και το χιούμορ τους. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στους φίλους εκείνους που πριν χρόνια με «μύησαν» στην τέχνη του προγραμματισμού.

Η ολοκλήρωση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής ενισχύθηκε οικονομικά από τα έσοδα του κληροδοτήματος «Τριανταφυλλίδη».

Αγγελική Κ. Στεφοπούλου

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	6
1. Εισαγωγή	15
1.1 Αντικείμενο.....	15
1.2 Στόχοι.....	18
1.3 Μεθοδολογία	20
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	21
2.1 Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα	21
2.1.1 Μελέτη ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου	23
2.2 Ανάλυση ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου	32
2.2.1 Ανάλυση σε επίπεδο δικτύου	32
2.2.2 Ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου.....	39
2.2.3 Ολοκληρωμένη ανάλυση του δικτύου.....	43
2.2.4 Σημασία της ανάλυσης της λειτουργίας ενός δικτύου	46
2.3 Δείκτες αξιολόγησης της λειτουργίας των αρδευτικών δικτύων.....	51
2.3.1 Γενικά.....	51
2.3.2 Πλαίσιο για την αξιολόγηση της λειτουργίας.....	52
2.3.3 Επιθυμητά χαρακτηριστικά των δεικτών αξιολόγησης	56
2.3.4 Ανασκόπηση των εξελίξεων στο χώρο των δεικτών αξιολόγησης της άρδευσης	58
2.3.5 Η έννοια της αξιοπιστίας (reliability)	64
2.3.6 Επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός δείκτη αξιολόγησης για την ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου	67
2.4 Προγράμματα για την υδραυλική ανάλυση συλλογικών αρδευτικών δικτύων	69
2.5 Προσομοίωση και τυχαίοι αριθμοί	73
2.5.1 Αξιολόγηση γεννήτριας τυχαίων αριθμών.....	77
2.5.2 Διαθέσιμα σύνολα υλοποιημένων εμπειρικών ελέγχων (Batteries of tests)	78
2.5.3 Γεννήτριες τυχαίων αριθμών	79
3. Ανάπτυξη νέου μοντέλου	83
3.1 Δεδομένα εισόδου	87

3.2 Μοντέλο για την ανάλυση της λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες	88
3.3 Ποσοστημόρια (Quantiles)	90
3.4 Αριθμός προσομοιώσεων	92
3.5 Μοντέλο για την ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών δικτύων σε επίπεδο υδροστομίου	94
3.6 Υπολογισμός γραμμικών απωλειών.....	97
3.7 Γεννήτριες τυχαίων αριθμών	103
3.8 Λειτουργία του μοντέλου.....	108
3.8.1 Εισαγωγή δεδομένων.....	108
3.8.2 Ανάλυση της λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες	112
3.8.3 Ανάλυση της λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου	113
3.8.4 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων	115
4. Εφαρμογές σε υφιστάμενα ελληνικά δίκτυα.....	120
4.1 Αντιπροσωπευτικά συλλογικά αρδευτικά δίκτυα	121
4.2 Επίδραση του τύπου απωλειών στην ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου.....	125
4.2.1 Μεθοδολογία	125
4.2.2 Αποτελέσματα και συζήτηση	127
4.3 Επίδραση του τύπου απωλειών στην ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου ..	141
4.3.1 Μεθοδολογία	141
4.3.2 Αποτελέσματα και συζήτηση	142
4.4 Ανάλυση ευαισθησίας.....	148
4.4.1 Μεθοδολογία	148
4.4.2 Αποτελέσματα και συζήτηση	148
5. Συμπεράσματα- Μελλοντική έρευνα.....	151
ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	155
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	166
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	168

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ανάπτυξη της γεωργίας είναι το νερό. Για την αξιοποίηση, τη διάθεση του νερού, αλλά και την προστασία από αυτό κατασκευάστηκαν από πολύ νωρίς υδραυλικά έργα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα αρδευτικά έργα, που έχουν σκοπό την προσαγωγή του νερού στις καλλιέργειες. Η μεταφορά του νερού από το σημείο υδροληψίας και η διανομή του εντός της αρδευτικής περιμέτρου πραγματοποιείται με τα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα.

Τα υπό πίεση συλλογικά αρδευτικά δίκτυα που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση χρησιμοποιούνται ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες για τη διανομή του αρδευτικού νερού. Με τα αρδευτικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης, ο χρήστης αποκτά μεγαλύτερη ευελιξία, μπορεί να χρησιμοποιήσει πιο αποτελεσματικά συστήματα άρδευσης και να αυξήσει έτσι την ομοιομορφία στην άρδευση και τη συχνότητα με την οποία αρδεύει (Rodríguez Díaz et al, 2007; Lamaddalena et al, 2007; Urrestarazu et al, 2009; Carrillo Cobo et al, 2011).

Στα συστήματα αυτά κάθε καταναλωτής μπορεί να χρησιμοποιήσει το προσφερόμενο αρδευτικό νερό κατά βούληση, χωρίς να δεσμεύεται από τους περιορισμούς τους οποίους συνήθως επιβάλλει η εφαρμογή ενός ωρολογίου προγράμματος άρδευσης (Χαλκιάς, 1968; Τσακίρης και Δέρκας, 2006), με τελικό αποτέλεσμα μια ορθολογικότερη χρήση του νερού.

Σε ένα σύστημα που λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος του Clément προκειμένου να υπολογιστούν οι παροχές μελέτης εντός των αγωγών.

Οι οργανισμοί που έχουν αναλάβει τη διοίκηση, διαχείριση, συντήρηση και εν γένει την οργάνωση των συλλογικών αρδευτικών δικτύων της χώρας είναι στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων οι Οργανισμοί Εγγείων Βελτιώσεων.

Μια σημαντική ιδιαιτερότητα που εμφανίζουν τα συστήματα ελεύθερης ζήτησης είναι η χωρική και χρονική μεταβλητότητα των ταυτόχρονα λειτουργούντων υδροστομίων. Τόσο ο αριθμός τους όσο και η θέση τους εξαρτώνται από την απόφαση του χρήστη να

αρδεύσει μια δεδομένη χρονική στιγμή ανάλογα με τις ανάγκες της καλλιέργειάς του, τις κλιματικές συνθήκες, την απόδοση του αρδευτικού συστήματος που χρησιμοποιείται στο χωράφι, κα. Αυτή η χωρική και χρονική διακύμανση των ταυτόχρονα λειτουργούντων υδροστομιών μπορεί να έχει τις παρακάτω συνέπειες:

- Μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχημένη διαστασιολόγηση των αγωγών του δικτύου.
- Κατά τη διάρκεια ζωής του συλλογικού έργου, είναι πιθανό για διάφορους λόγους να αλλάξει το κτηματολόγιο, οι καλλιέργειες που εξυπηρετούνται και κατά συνέπεια η ζήτηση νερού να διαφοροποιηθεί σημαντικά σε σχέση με αυτό που είχε προβλεφθεί αρχικά από τη μελέτη του έργου. Κατά συνέπεια το δίκτυο δεν θα μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στην καινούργια ζήτηση.
- Επιπλέον, η πρόοδος της τεχνολογίας στον τομέα του αρδευτικού εξοπλισμού μπορεί να οδηγήσει τους χρήστες σε μια διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με αυτή που είχε προβλεφθεί από την αρχική μελέτη. Για παράδειγμα, η χρήση εκτοξευτήρων μεγάλης πίεσης αντί εκτοξευτήρων χαμηλής πίεσης, θα αυξήσει τις ζητούμενες πιέσεις ενώ θα αλλάξει και τη διάρκεια άρδευσης από τον κάθε καλλιεργητή.

Για τους παραπάνω λόγους, τόσο οι μελετητές που σχεδιάζουν ένα συλλογικό δίκτυο ελεύθερης ζήτησης, όσο και οι διαχειριστές του δικτύου αυτού, οφείλουν να έχουν επαρκή και εμπειριστάωμένη γνώση της συμπεριφοράς των συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης που σχεδιάζουν και διαχειρίζονται. Για να γίνει αυτό πρέπει να προσδιοριστούν οι παροχές που θα εμφανιστούν εντός του συστήματος για διάφορες συνθήκες ζήτησης. Στόχος ενός συλλογικού δικτύου ελεύθερης ζήτησης, είναι να μπορεί να λειτουργεί ικανοποιητικά, δηλ. να μπορεί να προσφέρει τη ζητούμενη παροχή και πίεση για ένα μεγάλο αριθμό συνθηκών ζήτησης.

Στην περίπτωση υφιστάμενων συλλογικών αρδευτικών δικτύων που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση, η ανάλυση της λειτουργίας τους θα βοηθήσει τους διαχειριστές να εντοπίσουν τις αιτίες αλλά και τη θέση όπου θα εμφανιστούν προβλήματα λειτουργίας που θα έχουν σαν συνέπεια το σύστημα να αδυνατεί να προσφέρει τις ζητούμενες παροχές και πιέσεις.

Η ανάλυση λειτουργίας των δικτύων αυτών έχει στόχο τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του δικτύου σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η προσομοίωση των συστημάτων αυτών μέσω μαθηματικών ομοιωμάτων χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυσή τους, όπου διακρίνουμε γενικά δύο προσεγγίσεις: η πρώτη εξετάζει τη λειτουργία του δικτύου σε επίπεδο δικτύου και η δεύτερη σε επίπεδο υδροστομίου. Σε επίπεδο δικτύου, η ανάλυση πραγματοποιείται με τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (Labye et al., 1975; Bethery et al., 1981; Bethery, 1990; CEMAGREF, 1983; Lamaddalena and Sagardoy, 2000) ενώ σε επίπεδο υδροστομίου διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί (CEMAGREF, 1983; Lamaddalena and Sagardoy, 2000; Khadra and Lamaddalena, 2010). Η ανάλυση της λειτουργίας με τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες, δηλαδή σε επίπεδο δικτύου, δίνει πολύτιμα συμπεράσματα για τη γενική λειτουργία του δικτύου, ενώ με την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου μπορούν να εντοπιστούν τα υδροστόμια που παρουσιάζουν ανεπάρκειες πίεσης και παροχής και η συχνότητα με την οποία εμφανίζουν αυτή την ανεπάρκεια, όπως επίσης να εντοπιστούν και οι υποδιαστασιοποιημένοι αγωγοί, κα.

Η μελέτη ενός δικτύου πραγματοποιείται για ένα συγκεκριμένο σημείο που προσδιορίζεται από την Q_{Clem} (είναι η παροχή που προσδιορίζεται συνήθως με τον 1^ο νόμο του Clément) και το πιεζομετρικό φορτίο $Z_{optimal}$ στην κεφαλή του δικτύου. Έτσι, στην πραγματικότητα δεν ξέρουμε πώς θα συμπεριφερθεί το δίκτυο σε άλλες καταστάσεις λειτουργίας (πχ. για άλλους συνδυασμούς πιεζομετρικού φορτίου και παροχής στην κεφαλή). Η προσέγγιση που αναφέρεται αποκλειστικά σε ένα σημείο λειτουργίας ($Z_{optimal}$, Q_{Clem}) δεν δίνει σαφή εικόνα για τη λειτουργία των αρδευτικών δικτύων που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση. Αντίθετα, η ανάλυση με τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (C_i) έχει στόχο τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του δικτύου σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας (πιεζομετρικού φορτίου και παροχής στην κεφαλή) κυρίως για τις παροχές που εμφανίζονται συχνότερα στο υπό ανάλυση δίκτυο.

Τα γνωστότερα λογισμικά που υλοποιούν ανάλυση της λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση, ελεύθερης ζήτησης, είναι το ICARE και το COPAM. Το ICARE (CEMAGREF 1983) είναι ένα εμπορικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε από το CEMAGREF σε περιβάλλον MS-DOS. Το COPAM (Combined Optimization and Performance Analysis Model) είναι ένα λογισμικό που διατίθεται δωρεάν και αναπτύχθηκε από το το FAO και το Ινστιτούτο CHIEAM-Bari Institute σε περιβάλλον

Windows (Lamaddalena and Sagardoy 2000). Το ICARE και το COPAM υλοποιούν και τα δύο είδη ανάλυσης τόσο σε επίπεδο δικτύου όσο και σε επίπεδο υδροστομίου.

1.2 Στόχοι

Οι στόχοι της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι οι ακόλουθοι:

- **Ανάπτυξη ενός μοντέλου που πραγματοποιεί ανάλυση, σε επίπεδο δικτύου και σε επίπεδο υδροστομίου. Η δημιουργία του πηγαίου κώδικα του μοντέλου αυτού θα επιτρέψει τον πλήρη έλεγχο των υπολογισμών που θα πραγματοποιούνται.** Η ανάλυση σε επίπεδο δικτύου γίνεται με την υλοποίηση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες και δίνει μια γενική εικόνα της λειτουργικής επάρκειας του δικτύου, ενώ η ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου δίνει συγκεκριμένες πληροφορίες για τους υποδιαστασιοποιημένους αγωγούς του δικτύου και τα υδροστόμια που αδυνατούν να παράσχουν την απαιτούμενη παροχή και το απαιτούμενο φορτίο πίεσης στους χρήστες. Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε με μεθόδους αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (Object Oriented Programming) σε περιβάλλον Microsoft Visual Studio με τη χρήση Visual Basic.Net. Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι προσαρμοσμένο στα ιδιαίτερα τοπικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα υπό πίεση συλλογικά αρδευτικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης στην Ελλάδα (πχ. μεγάλος αριθμός υδροστομίων ανά υδροληψία, κα) και στις ανάγκες διαχείρισης των έργων αυτών. Ο μεγάλος αριθμός υδροστομίων ή χρηστών ανά υδροληψία εμφανίζεται συχνά στα ελληνικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης (Εικόνα 1). Με τα υφιστάμενα λογισμικά ανάλυσης, η εισαγωγή των επιπλέον υδροληψιών γίνεται με την προσθήκη μικρών υποθετικών αγωγών προκειμένου να ενσωματωθεί το σύνολο του εξεταζόμενου δικτύου, καθώς τα λογισμικά αυτά επιβάλλουν περιορισμούς στον αριθμό των υδροστομίων που μπορεί να έχει κάθε υδροληψία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εισάγεται τελικά ένα δίκτυο με πολύ μεγαλύτερο αριθμό αγωγών του πραγματικού, ενώ και η τοπολογία του δικτύου που εισάγεται διαφέρει σημαντικά από αυτή του πραγματικού. Τέλος, η ανάπτυξη του κώδικα έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε το μοντέλο που παράχθηκε να μπορεί να επεκταθεί και νέες δυνατότητες να προστεθούν σ' αυτό μελλοντικά.
- **Διερεύνηση της επίδρασης που έχει στην ανάλυση σε επίπεδο δικτύου και υδροστομίου η επιλογή της εξίσωσης για τον υπολογισμό των γραμμικών**

απωλειών. Ένας αριθμός γνωστών και ευρέως χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών διερευνούνται ως προς την επίδραση που έχουν στη χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες, αλλά και ως προς την επίδραση που έχουν στον προσδιορισμό διαφόρων δεικτών που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της λειτουργικής επάρκειας των υδροστομίων.

- **Δημιουργία ενός πλαισίου ολοκληρωμένης αξιολόγησης της λειτουργικής επάρκειας των υδροστομίων με την ταυτόχρονη χρήση υφιστάμενων δεικτών αξιοπιστίας και ενός νέου δείκτη που προτείνεται για το λόγο αυτό.** Η ολοκληρωμένη αξιολόγηση που προτείνεται περιλαμβάνει δείκτες που παρουσιάζουν το ενδεχόμενο αποτυχίας (ή επιτυχίας) ενός υδροστομίου να δώσει τη ζητούμενη παροχή και πίεση στο χρήστη και το εύρος αυτής.
- **Διερεύνηση της επίδρασης της επιλογής της τιμής του συντελεστή τραχύτητας, μέσω μιας ανάλυσης ευαισθησίας στο συντελεστή γ του Bazin, στη χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες.** Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας σε ένα υφιστάμενο δίκτυο δεν είναι γνωστή καθώς η τιμή αυτή μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τα χρόνια που λειτουργεί το δίκτυο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αρδευτικού νερού. Έτσι, προσδιορίστηκε η επίδραση μιας ενδεχόμενης υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης της τιμής του συντελεστή τραχύτητας στην ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών αρδευτικών δικτύων.



Εικόνα 1: Υδροληψία σε συλλογικό αρδευτικό δίκτυο στην Κρήτη

1.3 Μεθοδολογία

Το νέο μοντέλο δημιουργήθηκε για την ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών αρδευτικών δικτύων που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση, σε επίπεδο δικτύου και σε επίπεδο υδροστομίου. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με τη χρήση τεχνικών αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού σε Visual Basic. NET σε περιβάλλον Microsoft Visual Studio 2008. Έτσι, διευκολύνεται η επέκταση των δυνατοτήτων του για μελλοντικές εφαρμογές.

Το μοντέλο υλοποιεί την ανάλυση της λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης σε επίπεδο δικτύου με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες. Σε επίπεδο υδροστομίου, το μοντέλο υλοποιεί έναν αριθμό προσομοιώσεων από τις οποίες προκύπτει μέσω διαφόρων δεικτών αξιολόγησης η λειτουργική επάρκεια των υδροστομίων του δικτύου. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα οι παραπάνω αναλύσεις να υλοποιηθούν με τη χρήση διαφορετικών εξισώσεων και τύπων για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας σκαριφήματος του δικτύου που εισάγεται προς ανάλυση προκειμένου να είναι εύκολος ο εντοπισμός σφαλμάτων κατά την εισαγωγή των δεδομένων. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με διαγράμματα και πίνακες, ενώ προσφέρονται και τα πρωτογενή δεδομένα που προκύπτουν από κάθε ανάλυση.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής έγινε μια γενική παρουσίαση του αντικειμένου της έρευνας που υλοποιήθηκε, παρουσιάστηκαν οι στόχοι της και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίησή τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση και παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της υδραυλικής ανάλυσης των υπό πίεση συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης. Περιγράφονται επίσης οι βασικές έννοιες σχετικά με τους δείκτες αξιολόγησης των δικτύων αυτών και τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση προσομοιώσεων. Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια παρουσίαση των υφιστάμενων διαθέσιμων λογισμικών για την ανάλυση λειτουργίας των υπό πίεση συλλογικών αρδευτικών δικτύων που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση. Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται η ανάπτυξη του νέου μοντέλου, γίνεται παρουσίαση των δυνατοτήτων του και παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία του. Στο τέταρτο μοντέλο, αναπτύσσονται οι εφαρμογές που υλοποιήθηκαν με το νέο μοντέλο, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω έρευνα.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα

Τα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα είναι υδραυλικά συστήματα που έχουν ως σκοπό να μεταφέρουν το αρδευτικό νερό από το σημείο υδροληψίας μέχρι την αρδευτική περίμετρο και να το διανέμουν στις αρδευτικές μονάδες. Από τη δεκαετία του '70 και μετά κατασκευάζονταν κυρίως δίκτυα με κλειστούς αγωγούς υπό πίεση και έγιναν αλλαγές στις μεθόδους διανομής του νερού που αναπτύχθηκαν. Τα δίκτυα υπό πίεση είναι συστήματα αγωγών που έχουν ακτινωτή διάταξη (σε αντίθεση με τα κλειστά δίκτυα ύδρευσης) και με αυτά γίνεται η μεταφορά του νερού από το σημείο υδροδότησης μέχρι τα σημεία διανομής του νερού στις αρδευτικές μονάδες. Από το σημείο υδροδότησης η μεταφορά του νερού γίνεται υπό πίεση, με αντλίες ή με τη βαρύτητα (εφόσον το επιτρέπει η τοπογραφία). Με αυτό τον τρόπο το αρδευτικό νερό μεταφέρεται μέχρι τις υδροληψίες που φέρουν έναν αριθμό υδροστομίων στα οποία οι χρήστες συνδέουν το ατομικό τους σύστημα άρδευσης προκειμένου να ποτίσουν τα αγροτεμάχιά τους (συνήθως με καταιονισμό ή μικροάρδευση).

Για τη διανομή του αρδευτικού νερού χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι (Τσακίρης και Δέρκας, 2006):

- a. Η μέθοδος συνεχούς ροής
- b. Η μέθοδος της εκ περιτροπής διανομής
- c. Η μέθοδος με ελεύθερη ζήτηση
- d. Η μέθοδος με περιορισμένη ζήτηση

Η μέθοδος συνεχούς ροής επιτρέπει τη συνεχή ροή του αρδευτικού νερού σε όλες τις αρδευτικές διώρυγες σύμφωνα με το δικαίωμα χρήσης ή τις αρδευόμενες εκτάσεις.

Η μέθοδος της εκ περιτροπής διανομής επιβάλλει τη διανομή του νερού στους αγωγούς ανά ομάδες σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα. Τα αρδευόμενα αγροτεμάχια οργανώνονται με παρόμοιο τρόπο και το νερό διανέμεται σ' αυτά σε προκαθορισμένο χρόνο και με συγκεκριμένη διάρκεια.

Η μέθοδος της ελεύθερης ζήτησης επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει ο ίδιος το χρόνο και τη διάρκεια της άρδευσης του αγροτεμαχίου του. Τα δίκτυα που λειτουργούν με αυτό τον τρόπο αποτελούν τη μεγαλύτερη ευκαιρία για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών, μιας και μεταφέρουν το αρδευτικό νερό με την παροχή και την πίεση που απαιτείται από το αρδευτικό σύστημα που υπάρχει στο χωράφι και με τη συχνότητα και τη χρονική διάρκεια που επιθυμεί ο καλλιεργητής (Labye et al., 1988).

Η μέθοδος της περιορισμένης ζήτησης επιτρέπει στους αγρότες να χρησιμοποιούν το αρδευτικό νερό κατά βούληση κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Για παράδειγμα να αρδεύουν ορισμένες μέρες της εβδομάδας ή να αρδεύουν διαφορετικές μέρες από άλλους χρήστες που χρησιμοποιούν το ίδιο υδροστόμιο ή την ίδια υδροληψία. Η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ ελεύθερης ζήτησης και εκ περιτροπής διανομής.

Στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης που λειτουργούν υπό πίεση, η παροχή που θα έχει από το υδροστόμιό του ο χρήστης δεν μπορεί να ξεπερνά μια συγκεκριμένη παροχή που του έχει αποδοθεί ανάλογα με το αρδευτικό σύστημα που χρησιμοποιεί και την καλλιέργειά του. Σε περίπτωση που η ζητούμενη παροχή ξεπεράσει τη συγκεκριμένη παροχή, επεμβαίνει ο περιοριστής παροχής, με τον οποίο πρέπει να είναι εφοδιασμένα όλα τα υδροστόμια, και μειώνει την παροχή στα επιτρεπτά επίπεδα.

2.1.1 Μελέτη ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου

Η ολοκληρωμένη μελέτη ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου που λειτουργεί υπό πίεση, περιλαμβάνει διάφορες φάσεις, όπως αναφέρονται στη συνέχεια:

1. Χάραξη του δικτύου
2. Υπολογισμός των παροχών στους αγωγούς
3. Βελτιστοποίηση των διαμέτρων
4. Ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου μέσω του προσδιορισμού των χαρακτηριστικών καμπυλών και μόνιμων ροών

Ανάλογα με το στόχο της μελέτης άλλες φάσεις που μπορεί να περιλαμβάνει είναι ο υπολογισμός του αντλητικού συγκροτήματος και η ρύθμισή του, η αντι-πληγματική προστασία και η ενίσχυση ενός υπάρχοντος δικτύου.

Η βέλτιστη χάραξη του δικτύου είναι ένα σύνθετο πρόβλημα, καθώς δεν αρκεί απλά να προσδιορίσουμε το πιο σύντομο μονοπάτι που θα εξυπηρετεί τα διάφορα υδροστόμια, ξεκινώντας από την κεφαλή του δικτύου, αλλά πρέπει ο προσδιορισμός αυτός να γίνει και με τον πιο οικονομικό τρόπο (Τσακίρης και Δέρκας, 2006).

Πριν προσδιορίσουμε τις βέλτιστες διαμέτρους είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις παροχές για κάθε αγωγό του δικτύου. Με δεδομένο ότι σε ένα συλλογικό αρδευτικό δίκτυο ο καλλιεργητής μπορεί να ποτίσει οποτεδήποτε επιθυμεί, η παροχή των αγωγών χαρακτηρίζεται από το «τυχαίο» αυτό άνοιγμα των υδροστομιών. Οι υψηλές ονομαστικές παροχές των υδροστομιών σε ένα τέτοιο δίκτυο, σημαίνουν ότι τα υδροστόμια λειτουργούν μόνο για ένα μέρος του χρόνου και είναι εξαιρετικά σπάνιο έως πρακτικά αδύνατο να χρειαστεί να λειτουργήσουν ταυτόχρονα. Αρκεί λοιπόν να προσδιορίσουμε την παροχή αιχμής, προκειμένου στη συνέχεια να γίνει η βελτιστοποίηση των διαμέτρων με τον ασφαλέστερο αλλά και οικονομικότερο τρόπο. Η παροχή Q σε έναν αγωγό που έχει R κατάντη υδροστόμια ονομαστικής παροχής d τα οποία αρδεύουν μια έκταση S_i , θα παίρνει τιμές τέτοιες ώστε να ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$S_i \cdot q_c \leq Q \leq R \cdot d \quad (2.1)$$

όπου q_c η ειδική συνεχής παροχή σε $l/s/ha$.

Ο Clément (1966) πρότεινε δύο μεθόδους προκειμένου να υπολογίσει τις παροχές αυτές, γνωστές ως πρώτος και δεύτερος νόμος του Clément αντίστοιχα. Για να προσδιορίσει τις παροχές αυτές ο Clément εισήγαγε δύο νέους όρους:

Την περίοδο αιχμής «T», που είναι η περίοδος των μέγιστων αναγκών σε αρδευτικό νερό και για την οποία γίνεται ο σχεδιασμός του δικτύου. Κατά την περίοδο αιχμής είναι δυνατόν το δίκτυο να μη λειτουργεί καθ' όλη τη διάρκεια του 24ωρου αλλά να υπάρχουν χρονικά διαστήματα κατά τα οποία η παροχεταιυόμενη παροχή να είναι μηδενική. Έτσι, κάνει χρήση του «διαθέσιμου χρόνου», T', τον οποίο ορίζει ως εξής:

$$T' = r' \cdot T \quad (2.2)$$

όπου r' ¹, σύμφωνα με τον Clément ορίζεται η χρονική απόδοση του δικτύου ή ο βαθμός χρησιμοποίησης του δικτύου. Το r' μεταβάλλεται συνήθως από 2/3 έως 3/4.

Τελευταία η έννοια της παραμέτρου r' έχει διαφοροποιηθεί καθώς παρόλο που σύμφωνα με κάποιους συγγραφείς υπάρχουν δίκτυα που λειτουργούν μόνο την ημέρα, η πράξη έχει δείξει ότι η μεγάλη πλειοψηφία των δικτύων λειτουργούν όλο το 24ωρο (Δέρκας, 1991). Έτσι, σήμερα ο συντελεστής « r' » θεωρείται ένας συντελεστής προσαρμογής της θεωρίας στην πραγματικότητα (Δέρκας, 1991). Η τιμή του « r' » είναι αυτή που επιτρέπει την καλύτερη προσέγγιση μεταξύ των μέσων τιμών και των διασπορών της θεωρητικής και πειραματικής κατανομής της παροχής στην κεφαλή του δικτύου (Δέρκας, 1991). Έτσι, προκειμένου να λάβουμε υπόψη την αυθόρμητη συμπεριφορά των καλλιεργητών στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης, θα πρέπει η τιμή της παραμέτρου « r' » να μη λαμβάνεται αυθαίρετα, αλλά να προσδιορίζεται προσαρμόζοντας το νόμο του Clément στα πειραματικά δεδομένα.

Κάνοντας τις παραπάνω υποθέσεις ο Clément προκειμένου να μοντελοποιήσει το φαινόμενο της λειτουργίας των υδροστομίων χρησιμοποίησε το διωνυμικό νόμο, ο οποίος για ένα μεγάλο αριθμό υδροστομίων και για πιθανότητα λειτουργίας υδροστομίων που να μην είναι κοντά στο μηδέν και το ένα, μπορεί να προσεγγιστεί από το νόμο της κανονικής κατανομής.

¹ Για το συμβολισμό της χρονικής απόδοσης του δικτύου χρησιμοποιείται ο συμβολισμός r' (αντί του r που χρησιμοποιείται στη διεθνή βιβλιογραφία) προκειμένου να αποφευχθεί σύγχυση με το συμβολισμό που χρησιμοποιείται παρακάτω για το συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων (r).

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο που προτάθηκε από τον Clément έχει δεχτεί αρκετές κριτικές κυρίως σχετικά με την υπόθεση που αναφέρεται στην ανεξαρτησία των υδροστομιών, στην έννοια της παραμέτρου r' και της ποιότητας λειτουργίας του δικτύου. Έχει ωστόσο δεχτεί κριτική και ως προς τη χρήση της κανονικής κατανομής (Μανγορούλος, 1996; Δέρκας, 2001; Monserrat, 2004).

Νεότεροι ερευνητές προτείνουν τη χρήση γενικότερων κατανομών (ασύμμετρων κατανομών) όπως οι κατανομές Γάμμα, Βήτα ή και άλλες προκειμένου να προσεγγιστεί καλύτερα το φαινόμενο της ζήτησης. Σε νεότερη εργασία προτείνεται η προσαρμογή της κατανομής Weibull στις παροχές του δικτύου (Μαυρόπουλος, 1992; Μανγορούλος, 1996). Σύμφωνα με την εργασία αυτή, η ζήτηση αρδευτικού νερού κατά την περίοδο αιχμής ακολουθεί την κατανομή Weibull, αλλά και τις κατανομές Erlang, Gamma και Normal, για τις συνθήκες του δικτύου που εξετάστηκε (στην περιοχή Γιαννιτσών) την περίοδο 1988-90. Ωστόσο, οι κατανομές Erlang και Gamma κρίνονται από τον ερευνητή δυσχερείς κατά τον υπολογισμό τους λόγω της πολυπλοκότητάς τους και ως εκ τούτου ακατάλληλες για το σχεδιασμό ενός αρδευτικού δικτύου. Η κατανομή Weibull προτείνεται έναντι της Normal, μιας και η εφαρμογή της στο δίκτυο που εξετάστηκε έδειξε ότι αποδίδει καλύτερα την πραγματική κατανομή του πληθυσμού των ζητούμενων παροχών, για τους παρακάτω λόγους (Μαυρόπουλος, 1992):

- a. Η εφαρμογή του μοντέλου στο οποίο οδηγεί η κατανομή Weibull επιτρέπει σε όλους τους κλάδους ενός δικτύου να λειτουργούν ο καθένας ανεξάρτητα από τον άλλον. Συνεπώς, επιτρέπει σε κάθε υδροστόμιο της υδροληψίας να λειτουργεί ή να αδρανεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα του δικτύου.
- b. Η ευελιξία που έχει το σχήμα της κατανομής Weibull επιτρέπει την καλύτερη προσέγγιση του φαινομένου της ζήτησης του αρδευτικού νερού την περίοδο αιχμής των αρδεύσεων.
- c. Η σχέση που συνδέει την πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός με το μέσο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών γεγονότων, σε συνδυασμό με την παραπάνω ιδιότητα, δίνει τη δυνατότητα στο μοντέλο που χρησιμοποιεί την κατανομή Weibull να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών.

Οι Rodriguez et al. (2007) αναφέρουν ότι η μέθοδος που προτείνεται από το Μαυρόπουλο, δεν είναι ικανοποιητική για μικρό αριθμό υδροστομιών, αλλά είναι αποδεκτή για δίκτυα με μεγάλο αριθμό υδροστομιών. Εναλλακτικά, προτείνουν τη χρήση

της κατανομής Gamma μιας και προσαρμόζεται καλύτερα στη ζήτηση σε σχέση με άλλες κατανομές. Ωστόσο, η χρήση της κατανομής Gamma, προϋποθέτει τον προσδιορισμό των παραμέτρων της κατανομής εκ των προτέρων για κάθε μήνα, γεγονός που δυσχεραίνει την εφαρμογή της στην πράξη.

Οι Monserrat et al. (2004) θέλοντας να εξετάσουν κατά πόσο ισχύουν οι υποθέσεις του νόμου του Clément, χρησιμοποίησαν τα πειραματικά δεδομένα από δύο συλλογικά αρδευτικά δίκτυα της Ισπανίας. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι παρόλο που οι προϋποθέσεις του πρώτου νόμου του Clément δεν ικανοποιούνται στην πράξη, οι πραγματικές παροχές δεν διέφεραν σημαντικά από αυτές που υπολογίζονται με τον 1^ο νόμο του Clément.

Οι Labye και Mongolfier (1971) πρότειναν ένα διαφορετικό μοντέλο προσομοίωσης των παροχών, εισάγοντας στα υδροστόμια ένα νόμο πιθανότητας λειτουργίας και ένα νόμο διάρκειας της λειτουργίας. Η χρήση τους έδειξε ότι τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο παρουσιάζουν απόκλιση 3-4% σε σύγκριση με εκείνα που δίνει ο νόμος του Clément, για την ίδια ποιότητα λειτουργίας. Οι Moreno et al. (2007) προτείνουν μια νέα μεθοδολογία εναλλακτικά του Clément που στηρίζεται στο τυχαίο άνοιγμα των υδροστομιών του δικτύου προκειμένου να υπολογιστεί η παροχή στην κεφαλή. Η νέα μεθοδολογία που προτείνουν υποθέτει ένα τυχαίο χρόνο έναρξης της άρδευσης σε κάθε αγροτεμάχιο. Υποθέτει επίσης ότι το υδροστόμιο παραμένει ανοιχτό καθ' όλη τη διάρκεια του απαραίτητου χρόνου προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες της καλλιέργειας. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής σε ένα δίκτυο της Ισπανίας έδωσε καλή προσαρμογή στις πραγματικές τιμές, σε αντίθεση με το νόμο του Clément που για το συγκεκριμένο δίκτυο έδινε χαμηλότερες από τις πραγματικές τιμές (κατά 35-40%).

Στη συνέχεια αναφέρονται οι δύο νόμοι του Clément, ωστόσο για τον προσδιορισμό των παροχών εντός των αγωγών ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου χρησιμοποιείται συνήθως ο 1^{ος} νόμος του Clément.

1^{ος} νόμος του Clément:

Ο πρώτος νόμος της ζήτησης προτάθηκε το 1955 από τον Clément (Clément, 1955) παρουσιάστηκε και εξετάστηκε από κάποιους ερευνητές στη συνέχεια (Bonnal, 1966; Μαυρόπουλος, 1978, 1992; Τζιμόπουλος, 1978; Clément et Galand, 1979; Dercas, 1989)

Ο υπολογισμός της παροχής αιχμής γίνεται για την περίοδο της εποχής άρδευσης με τις μεγαλύτερες ανάγκες, δηλ. την περίοδο αιχμής T.

Για την ανάπτυξη του πρώτου νόμου του Clément γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

1. Όλα τα υδροστόμια είναι όμοια και ανεξάρτητα μεταξύ τους
2. Η πιθανότητα λειτουργίας «p» κάθε υδροστομίου είναι σταθερή και ίση με

$$p = \frac{t}{T} = \frac{\text{Χρόνος λειτουργίας για να παράσχει την αναγκαία ποσότητα νερού}}{\text{Διαθέσιμος χρόνος}} \quad (2.3)$$

Η λειτουργία των υδροστομίων μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη χρήση του διωνυμικού νόμου. Υποθέτοντας ότι ο αριθμός των υδροστομίων είναι αρκετά μεγάλος και η πιθανότητα λειτουργίας «p» δεν είναι κοντά στο 0 και στο 1, μπορούμε να προσεγγίσουμε το διωνυμικό νόμο με τον κανονικό και να καταλήξουμε στον πρώτο νόμο του Clément:

$$Q = R \cdot p \cdot d + U(Pq) \sqrt{R \cdot p \cdot q \cdot d^2} \quad (2.4)$$

Όπου

Q: η παροχή αιχμής

R: ο συνολικός αριθμός υδροστομίων

d: η ονομαστική παροχή των υδροστομίων

p: η πιθανότητα λειτουργίας των υδροστομίων

q: η πιθανότητα αδράνειας (μη λειτουργίας) των υδροστομίων (1-p)

U: τυποποιημένη μεταβλητή

Pq: ποιότητα λειτουργίας του δικτύου

Η παραπάνω σχέση ισχύει για υδροστόμια ομοιογενή ως προς την παροχή και την πιθανότητα λειτουργίας. Μπορούμε ωστόσο να θεωρήσουμε κάθε υδροστόμιο «j» ξεχωριστά με παροχή d_j , πιθανότητα p_j και q_j . Σύμφωνα με το νόμο των μεγάλων αριθμών, το άθροισμα «R» τυχαίων μεταβλητών συγκλίνει προς το νόμο του Laplace και καταλήγουμε στη γενικευμένη μορφή του τύπου του Clément:

$$Q = \sum_{j=1}^{j=R} p_j \cdot d_j + U(Pq) \sqrt{\sum_{j=1}^{j=R} p_j \cdot q_j \cdot d_j^2} \quad (2.5)$$

2^{ος} νόμος του Clément:

Ο δεύτερος νόμος του Clément περιγράφει τη λειτουργία ενός δικτύου ως μια αλυσίδα MARKOV, μια στοχαστική διαδικασία γέννησης και θανάτου: μόνιμη, ασυνεχής και ομοιογενής μέσα στο χρόνο.

1. Ο αριθμός των υδροστομιών είναι R. Ο αριθμός των ανοικτών υδροστομιών είναι $N \leq R$
2. Όλα τα υδροστόμια είναι όμοια.
3. Οι διάρκειες άρδευσης των υδροστομιών είναι ανεξάρτητες
4. Οι διάρκειες άρδευσης ακολουθούν την ίδια κατανομή με μέση τιμή «Θ»
5. Το δίκτυο λειτουργεί μόνο ένα μέρος του συνολικού χρόνου της περιόδου αιχμής.

Η μορφή του δεύτερου νόμου του Clément μοιάζει με αυτή του πρώτου νόμου, όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$Q = \sum_{j=1}^{j=R} p_j \cdot d_j + U' \sqrt{\sum_{j=1}^{j=R} p_j \cdot q_j \cdot d_j^2} \quad (2.6)$$

με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή ο όρος U' δεν είναι μια σταθερά που εξαρτάται μόνο από την πιθανότητα μη ικανοποίησης που επιλέχθηκε (που αντιστοιχεί στην ποιότητα λειτουργίας του δικτύου), αλλά είναι συνάρτηση της πιθανότητας κορεσμού ενός δικτύου εξοπλισμένου με (R-1) υδροστόμια, της πιθανότητας λειτουργίας του υδροστομίου και του αριθμού των υδροστομιών του δικτύου (Dercas, 1989; Lamaddalena and Sagardoy, 2000). Επιπλέον, η παράμετρος p στο δεύτερο νόμο προσεγγιστικά μόνο εξομοιώθηκε με την πιθανότητα λειτουργίας των υδροστομιών (Dercas, 1989).

Το μοντέλο της ζήτησης που περιγράφεται από τον πρώτο νόμο του Clément υποθέτει ότι η πλεονάζουσα ζήτηση διατηρείται, ενώ στο δεύτερο τύπο αποκλείεται (Dercas, 1989). Κάτι τέτοιο ισχύει στην περίπτωση κορεσμένων δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπου ο χρήστης θα αναγκαστεί να καλέσει αργότερα εάν η γραμμή είναι κατελημμένη, αλλά δεν ισχύει στη συνήθη πρακτική άρδευσης στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα. Έτσι, ο

αγρότης που ανοίγει το υδροστόμιό του και δεν έχει πλήρη ικανοποίηση, το αφήνει συχνά ανοιχτό ακόμα και αν η παροχή ή η πίεση δεν φτάνουν τις ονομαστικές τους τιμές. Επιπλέον, και οι δύο νόμοι θεωρούν τη συμπεριφορά των αγροτών αμετάβλητη, κάτι που δεν αντικατοπτρίζει πάντα την πραγματικότητα, μιας και εάν ένας αγρότης δεν μπορέσει να ποτίσει μια δεδομένη χρονική στιγμή λόγω υπερφόρτωσης του δικτύου (πολύ χαμηλή πίεση), θα προσπαθήσει να ποτίσει μέσα στις επόμενες ώρες.

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαμέτρων υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία, ωστόσο η ασυνεχής μέθοδος του Labye είναι αυτή που ακολουθείται συνήθως στο σχεδιασμό συλλογικών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση.

Η ανάλυση λειτουργίας των δικτύων αυτών έχει στόχο τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του δικτύου σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας (πιεζομετρικού φορτίου και παροχής στην κεφαλή) κυρίως για τις παροχές που εμφανίζονται συχνότερα στο υπό ανάλυση δίκτυο. Για την ανάλυση των συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί τα οποία εξετάζουν τη λειτουργία τους σε επίπεδο δικτύου και σε επίπεδο υδροστομίου. Σε επίπεδο δικτύου, η ανάλυση πραγματοποιείται με τις **χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες** (Labye et al., 1975; Bethery et al., 1981; Bethery, 1991; CEMAGREF, 1983; Lamaddalena and Sagardoy, 2000) ενώ σε επίπεδο υδροστομίου διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί (CEMAGREF, 1983; Lamaddalena and Sagardoy, 2000; Khadra and Lamaddalena, 2010). Σε αντίθεση με τα παραπάνω, άλλα μοντέλα που υποθέτουν συνθήκες μη μόνιμης ροής, έχουν προταθεί όπως το GERSTAR (Estrada et al., 2009), το FLUCS (Lamaddalena and Ferreira, 2007) και το EPANET (Rossman, 2000). Τα μοντέλα που πραγματοποιούν ανάλυση λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων χρησιμοποιούν μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών με ομοιόμορφη κατανομή προκειμένου να δημιουργήσουν τυχαίους συνδυασμούς ανοιχτών υδροστομίων.

Πιο πρόσφατα, στα πλαίσια της ανάλυσης δικτύων αγωγών με βρόχους, οι Spiliotis και Tsakiris υιοθετούν μια προσέγγιση ασαφούς λογικής για να αντιμετωπίσουν την αβεβαιότητα των συστημάτων αυτών. Προτείνουν μια μεθοδολογία που στηρίζεται στην ασαφή λογική προκειμένου να προσδιορίσουν τις απαιτήσεις σε φορτίο πίεσης στα υδροστόμια (Spiliotis and Tsakiris, 2007), που συνήθως λαμβάνεται ως μια συγκεκριμένη τιμή. Επιπλέον, διαχειρίζονται την αβεβαιότητα στις ζητούμενες παροχές

στους κόμβους του δικτύου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton-Raphson (Spiliotis and Tsakiris, 2012)

Συλλογικά δίκτυα και παράμετροι σχεδιασμού

Οι παράμετροι που εμπλέκονται στη σχεδίαση ενός αρδευτικού δικτύου υπό πίεση που λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο ξεχωριστές κατηγορίες (Galand and Jean, 1979), τις παραμέτρους πλαισίου (*paramètres de contexte*) και τις παραμέτρους απόφασης (*paramètres de décision*). Οι **παράμετροι πλαισίου** είναι αποτέλεσμα της επίδρασης του κλίματος, του τύπου εδάφους, καθώς και των υδροτεχνικών και αγρονομικών χαρακτηριστικών της αρδευτικής περιμέτρου. Το κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω παραμέτρων είναι ότι λαμβάνουν συγκεκριμένες και προκαθορισμένες τιμές και κατά συνέπεια ο μελετητής δεν μπορεί να επέμβει στον καθορισμό των τιμών τους. Οι **παράμετροι απόφασης**, δεν είναι προκαθορισμένες. Αντίθετα, αποτελούν επιλογή του μελετητή και μάλιστα συχνά χωρίς να υπάρχει σαφής τεκμηρίωση της επιλογής αυτής (Bethery *et al.*, 1981). Οι παράμετροι αυτοί αφορούν την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (ποιότητα λειτουργίας του δικτύου, χρονική απόδοση του δικτύου) και τη σχεδίαση του δικτύου (πυκνότητα εγκατεστημένων υδροστομίων, μελλοντικά υδροστόμια, κα).

Σύμφωνα με τους Bethery *et al.* (1981) ένα συλλογικό αρδευτικό δίκτυο που λειτουργεί υπό πίεση μπορεί να αδυνατεί να εξυπηρετήσει τους χρήστες εξαιτίας ποικίλων αιτιών. Οι αιτίες αυτές μπορούν να συστηματοποιηθούν σε 3 διακριτές κατηγορίες, που περιγράφονται παρακάτω:

1. Ο εσφαλμένος προσδιορισμός της θεωρητικής λειτουργίας του δικτύου:

Κατά την αρχική μελέτη ενός δικτύου, ο μελετητής πρέπει πρώτα απ' όλα να προσδιορίσει τιμές για τις παραμέτρους απόφασης (*paramètres de décision*). Συχνά ο προσδιορισμός αυτός γίνεται σχετικά αυθαίρετα. Ένας τομέας που παρουσιάζει μεγάλες δυσκολίες στην εκτίμησή του είναι η μελλοντική συμπεριφορά των αγροτών. Έτσι, προκειμένου οι μελετητές να τοποθετηθούν από την πλευρά της ασφάλειας κατά την αρχική μελέτη του έργου οδηγούνται στην υπερδιαστασιολόγησή του.

2. Η αναπόφευκτη εξέλιξη των αρδευτικών διατάξεων: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την επέκταση της αρδευτικής περιμέτρου, την

αλλαγή των αρδευόμενων καλλιεργειών, την εισαγωγή νέων συστημάτων άρδευσης στο χωράφι τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της συμπεριφοράς των χρηστών. Επιπλέον, συχνά εγείρονται νέες απαιτήσεις σε νερό το οποίο προορίζεται για τη βιομηχανία ή για πόσιμο νερό. Σταχυολογώντας θα λέγαμε ότι με την πάροδο των χρόνων η πραγματική λειτουργική κατάσταση ενός δικτύου διαφοροποιείται σημαντικά συγκριτικά με την αρχική μελέτη.

3. **Άλλες αιτίες που προέρχονται από ακραία γεγονότα:** Η διαστασιολόγηση βασίζεται στη στατιστική εκτίμηση κάποιων παραμέτρων και στην αποδοχή κάποιας πιθανότητας αστοχίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το δίκτυο να μην ανταποκρίνεται σε κάποιες ακραίες καταστάσεις, πχ. ξηρασία και έντονος άνεμος σε περιοχές με καταιονισμό. Μόλις ο άνεμος μειωθεί, θα υπάρξει έντονη ζήτηση και πιθανή αδυναμία του δικτύου να ανταποκριθεί. Το παράδειγμα αυτό είναι αντίστοιχο με την κατάρρευση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας για παράδειγμα μετά από ένα σεισμό, όταν οι χρήστες αυξάνονται σημαντικά και ξαφνικά, πέραν των φυσιολογικών τιμών.

Οι δύο πρώτες κατηγορίες είναι αυτές που επιβάλλουν τον εκσυγχρονισμό ενός δικτύου. Η τρίτη κατηγορία δεν επιβάλλει τον εκσυγχρονισμό ενός δικτύου, ωστόσο θα μπορούσε να οδηγήσει στην ενίσχυση κάποιων τμημάτων του δικτύου που εμφανίζουν συχνότερα και σημαντικότερα προβλήματα. Στην περίπτωση που η αιτία της ανεπάρκειας ανήκει στις δύο πρώτες κατηγορίες, μια εμπειριστατωμένη ανάλυση είναι απαραίτητη προκειμένου να προσδιοριστούν με ασφάλεια οι νέες τιμές των παραμέτρων απόφασης που θα επιτρέψουν να γίνει ένας επιτυχημένος εκσυγχρονισμός στο δίκτυο.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι είναι απαραίτητη η ανάλυση της επάρκειας των συλλογικών αρδευτικών δικτύων και μάλιστα αυτή πρέπει να γίνεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, προκειμένου να προσδιοριστεί εάν οι αιτίες που προκάλεσαν την ανεπάρκεια ενός δικτύου είναι μόνιμες ή προσωρινές. Δηλαδή εάν η ανεπάρκεια ενός δικτύου οφείλεται σε κάποιο ακραίο γεγονός, εάν οφείλεται σε εσφαλμένη εκτίμηση των παραμέτρων απόφασης στην αρχική μελέτη ή εάν οφείλεται στη διαφοροποίηση των δεδομένων εντός της αρδευτικής περιμέτρου. Στη συνέχεια, η ανάλυση θα πρέπει να οδηγεί στον εντοπισμό των συγκεκριμένων τμημάτων των δικτύων που απαιτούν διορθωτικές επεμβάσεις.

2.2 Ανάλυση ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου

2.2.1 Ανάλυση σε επίπεδο δικτύου

Ένα υπό πίεση συλλογικό αρδευτικό δίκτυο που λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση συνίσταται από το έργο κεφαλής, ταμιευτήρας ή αντλιοστάσιο και το δίκτυο των σωληνώσεων το οποίο μεταφέρει αρδευτικό νερό στους χρήστες.

Το έργο κεφαλής μπορεί να είναι είτε ένας ταμιευτήρας, είτε ένα αντλιοστάσιο.

Στην περίπτωση που το έργο κεφαλής είναι ένας ταμιευτήρας, η χαρακτηριστική καμπύλη του έργου κεφαλής στο διάγραμμα (Z, Q) είναι μια οριζόντια ευθεία σε ορισμένη πιεζομετρική στάθμη που καθορίζει την ελεύθερη επιφάνεια του νερού στον ταμιευτήρα. Στην πραγματικότητα, η ελεύθερη επιφάνεια του νερού κυμαίνεται μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης στάθμης του ταμιευτήρα.

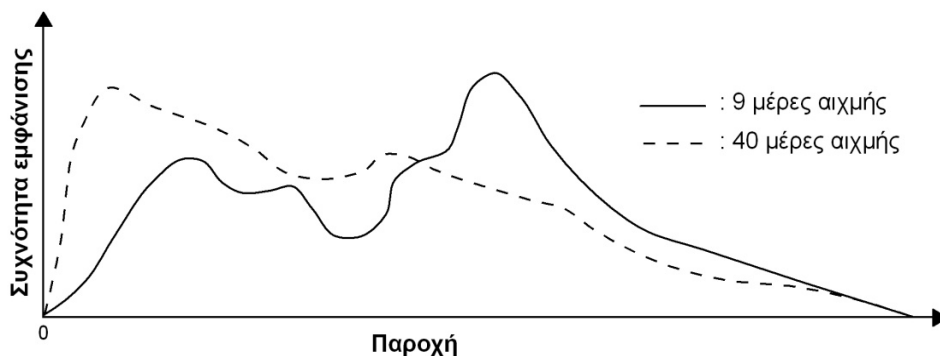
Στην περίπτωση που το αντλιοστάσιο περιλαμβάνει αντλίες σταθερής ταχύτητας τότε η χαρακτηριστική καμπύλη του αντλιοστασίου προκύπτει από τις χαρακτηριστικές καμπύλες των αντλιών του. Για πολλές αντλίες του ίδιου μανομετρικού, η παροχή θα προκύψει από την άθροιση των επιμέρους παροχών.

Στην περίπτωση που το αντλιοστάσιο έχει μία ή περισσότερες αντλίες μεταβλητής ταχύτητας είναι δυνατόν να προσαρμοστεί η χαρακτηριστική καμπύλη του αντλιοστασίου στη χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου, ώστε το αντλιοστάσιο να ακολουθήσει μια ανερχόμενη καμπύλη προκειμένου να γίνει οικονομία στην άντληση μικρών παροχών (Δέρκας, 2001).

Οι χρήστες δηλαδή οι καλλιεργητές είναι η πιο δύσκολη συνιστώσα από τις τρεις στο χειρισμό της. Στα ελληνικά συλλογικά αρδευτικά δίκτυα δεν γίνεται συνεχής καταγραφή των παροχών στην κεφαλή του δικτύου, έτσι είναι αδύνατο να έχουμε ακριβή και αξιόπιστη πληροφόρηση για την περίοδο και την ώρα αιχμής, την ημερήσια διακύμανση της ζήτησης νερού, και άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη της συνιστώσας της ζήτησης.

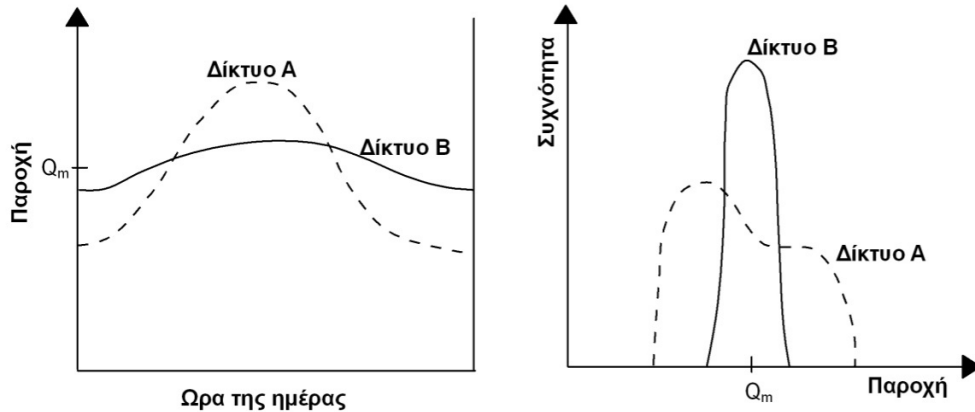
Τη σημασία των παραπάνω μεγεθών που χαρακτηρίζουν τη ζήτηση στην ανάλυση της λειτουργίας ενός δικτύου, περιέγραψαν οι Bethery *et al* (1981) στο γαλλικό δίκτυο Milles. Για να εξετάσουν τη σημασία της διάρκειας της περιόδου αιχμής κατέγραψαν τις παροχές που εμφανίστηκαν στην κεφαλή του δικτύου σε 40 και 9 μέρες περιόδου αιχμής

αντίστοιχα. Στο διάγραμμα που προέκυψε (Εικόνα 2), φαίνεται καθαρά ότι όσο μειώνεται η διάρκεια της περιόδου αιχμής, η καμπύλη που περιγράφει τη συχνότητα εμφάνισης των παροχών στην κεφαλή, μετακινείται προς μεγαλύτερες παροχές.



Εικόνα 2: Καμπύλη εμφάνισης παροχών ανάλογα με τη διάρκεια της περιόδου αιχμής

Προκειμένου να εξετάσουν τη σημασία που έχει η πληροφόρηση για τη διακύμανση της ζήτησης μέσα στην ημέρα, κατέγραψαν τις ζητούμενες παροχές στην κεφαλή σε όλο το 24ωρο για δύο γαλλικά δίκτυα, Chanas (Δίκτυο Α) και Saulce (Δίκτυο Β). Τα δίκτυα αυτά γειτνιάζουν και κατά συνέπεια δεν υπάρχει σημαντική γεωγραφική διαφοροποίηση. Από τα διαγράμματα που προέκυψαν, φαίνεται ότι η ημερήσια διακύμανση είναι ένας σημαντικός δείκτης που δείχνει εάν ένα δίκτυο πλησιάζει στον κορεσμό. Είναι λογικό, οι καλλιεργητές να επιλέγουν να ποτίζουν κατά τη διάρκεια της ημέρας και κυρίως το πρωί. Εάν ωστόσο η ζήτηση τις ώρες αυτές είναι ιδιαίτερα αυξημένη και κατά συνέπεια οι καλλιεργητές αδυνατούν να ποτίσουν με την επιθυμητή παροχή και πίεση, αναπόφευκτα θα αναγκαστούν να ποτίσουν σε ώρες που η ζήτηση μειώνεται. Τα διαγράμματα από τις καταγραφές στην κεφαλή για τα δύο εξεταζόμενα δίκτυα φαίνεται να επιβεβαιώνουν την παραπάνω υπόθεση (Εικόνα 3). Στο πρώτο διάγραμμα το δίκτυο Β φαίνεται πως δουλεύει καθ' όλη τη διάρκεια του 24 ωρου με αυξημένη παροχή στην κεφαλή, σε αντίθεση με το δίκτυο Α για το οποίο η ζήτηση εμφανίζεται αυξημένη τις ώρες πριν το μεσημέρι. Το δεύτερο διάγραμμα επιβεβαιώνει τον κορεσμό του δικτύου Β, μιας και η εμφάνιση παροχών κεφαλής γύρω στην παροχή μελέτης του δικτύου είναι σαφώς συχνότερη από το δίκτυο Α.



Εικόνα 3: Επίδραση της ημερήσιας διακύμανσης της παροχής κεφαλής στη συχνότητα εμφάνισης των παροχών

Το δίκτυο των σωληνώσεων που λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση, παρουσιάζει μια ιδιαιτερότητα που κάνει την απεικόνισή του σε ένα διάγραμμα ιδιαίτερα «λεπτή» υπόθεση: για την ίδια παροχή στην κεφαλή του δικτύου μπορεί να προκύψει ένας μεγάλος αριθμός συνδυασμών ανοιχτών υδροστομίων.

Στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα, ο αγρότης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει το υδροστόμιό του όποτε και για όσο επιθυμεί, γεγονός που οδηγεί στο σχηματισμό ενός μεγάλου αριθμού πιθανών τυχαίων συνδυασμών ανοιχτών υδροστομίων. Ένας συνδυασμός ανοιχτών υδροστομίων (r) είναι ένα σύνολο ανοιχτών υδροστομίων για τα οποία η συνολική τους παροχή αντιστοιχεί σε μια δεδομένη τιμή παροχής στην κεφαλή του δικτύου (Lamaddalena and Sagardoy, 2000).

Η μελέτη της λειτουργίας του δικτύου των σωληνώσεων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω γίνεται με τη μέθοδο των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες που περιγράφεται στη συνέχεια.

2.2.1.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (Τύπου I)

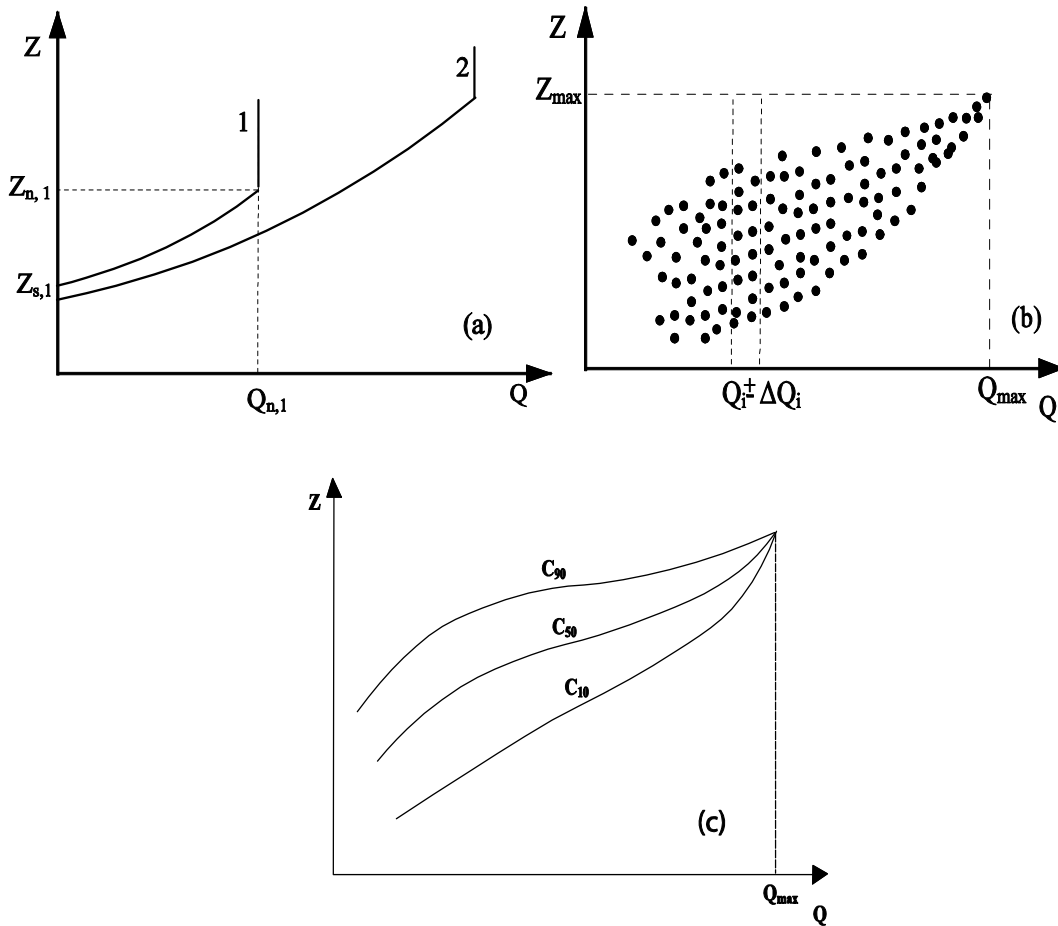
Η **μέθοδος των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες (C_i) (Τύπου I)** προσφέρει μια γενική εικόνα της λειτουργικής απόδοσης ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου ελεύθερης ζήτησης. Οι δείκτες στις χαρακτηριστικές καμπύλες αντιπροσωπεύουν το ποσοστό των συνδυασμών ανοιχτών υδροστομίων οι οποίοι δεν παρουσιάζουν

λειτουργικές αστοχίες. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (C_i) προκύπτουν από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του δικτύου μετά την απαραίτητη στατιστική επεξεργασία.

Το μοντέλο των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες προτάθηκε από τους Labye et al. το 1975. Μερικά χρόνια αργότερα το μοντέλο υλοποιήθηκε από το CEMAGREF (CTGREF, 1979; Bethery et al., 1981; Bethery, 1990) με τη δημιουργία του λογισμικού ICARE. Αργότερα, το μοντέλο ενσωματώθηκε στο λογισμικό COPAM που διατίθεται από τον FAO (Lamaddalena and Sagardoy, 2000) και χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση δικτύων ελεύθερης ζήτησης στην Ιταλία, τη Γαλλία και την Ισπανία. Στην Ελλάδα η ανάλυση της λειτουργίας συλλογικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης με τις Χαρακτηριστικές Καμπύλες με δείκτες δεν έχει χρησιμοποιηθεί, ωστόσο έχουν γίνει μεμονωμένες αναλύσεις στα πλαίσια πτυχιακών εργασιών στο ΓΠΑ (Γεροντίτης, 2007; Κανάκης, 2010; Φωκά, 2011; Ευθυμίου, 2013) .

Η χαρακτηριστική καμπύλη ενός δικτύου εξαρτάται από τα ανοιχτά υδροστόμια στο δίκτυο (τον αριθμό τους, τη θέση τους και την ονομαστική τους παροχή). Ας υποθέσουμε δύο χαρακτηριστικές καμπύλες (1, 2) του δικτύου που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικούς συνδυασμούς ανοιχτών υδροστομίων (Εικόνα 4a). Το πιεζομετρικό φορτίο Z_s είναι το ελάχιστο πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου προκειμένου να ξεκινήσει η ροή του νερού από το δίκτυο για το συνδυασμό ανοιχτών υδροστομίων (1). Από την άλλη μεριά, το πιεζομετρικό φορτίο Z_n στην κεφαλή είναι το απαιτούμενο φορτίο όταν όλα τα υδροστόμια του συνδυασμού ανοιχτών υδροστομίων (1) έχουν την ονομαστική τους παροχή. Η παροχή $Q_{n,1}$ είναι η αντίστοιχη παροχή για το συνδυασμό (1) στην κεφαλή του δικτύου. Είναι προφανές ότι ο αριθμός των χαρακτηριστικών καμπυλών του δικτύου ισούται με τον αριθμό των συνδυασμών ανοιχτών υδροστομίων. Προκειμένου να διαχειριστούμε την πληροφορία που παίρνουμε από το μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών καμπυλών του δικτύου, για τη δημιουργία των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες κρατάμε μόνο τα ζεύγη ($Z_{n,r}, Q_{n,r}$).

Τα ζεύγη ($Z_{n,r}, Q_{n,r}$) για όλους τους συνδυασμούς r των ανοιχτών υδροστομίων (Εικόνα 4b) αναλύονται στατιστικά και προσδιορίζονται τα πιεζομετρικά φορτία στην κεφαλή του δικτύου που επιτρέπουν την ικανοποίηση του 10, 20, 30, ...,70, 75, 90% των συνδυασμών ανοιχτών υδροστομίων που απαιτούν παροχή Q_i στην κεφαλή του δικτύου. Με αυτή τη στατιστική επεξεργασία προσδιορίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες του δικτύου (Χαρακτηριστική καμπύλη τύπου I).



Εικόνα 4: (α) Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ενός δικτύου για δύο συνδυασμούς ανοιχτών υδροστομίων (πχ. 1 και 2), (β) Τα ακραία σημεία ($Z_{n,r}$, $Q_{n,r}$) των χαρακτηριστικών καμπυλών ενός δικτύου, (γ) Οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες

Για τη δημιουργία των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες, και προκειμένου να προσομοιωθεί η τυχαία συμπεριφορά των αγροτών, τα υδροστόμια σε κάθε συνδυασμό ανοίγουν τυχαία μέχρι να ικανοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$|Q_{n,r} - Q_i| < \varepsilon_\tau, \quad (2.7)$$

όπου $Q_{n,r}$ είναι η συνολική παροχή των υδροστομίων που λειτουργούν ταυτόχρονα στο συνδυασμό r , Q_i είναι η απαιτούμενη παροχή στην κεφαλή του δικτύου για τη συγκεκριμένη προσομοίωση και ε_τ είναι η τιμή της αποδεκτής ανοχής ($\varepsilon_\tau = \Delta Q_i$, Εικόνα 4b). Σύμφωνα με τους Bethery et al. (1981) η τιμή της αποδεκτής ανοχής είναι ίση με την

τιμή της μικρότερης ονομαστικής παροχής υδροστομίου (Lamaddalena and Sagardoy 2000).

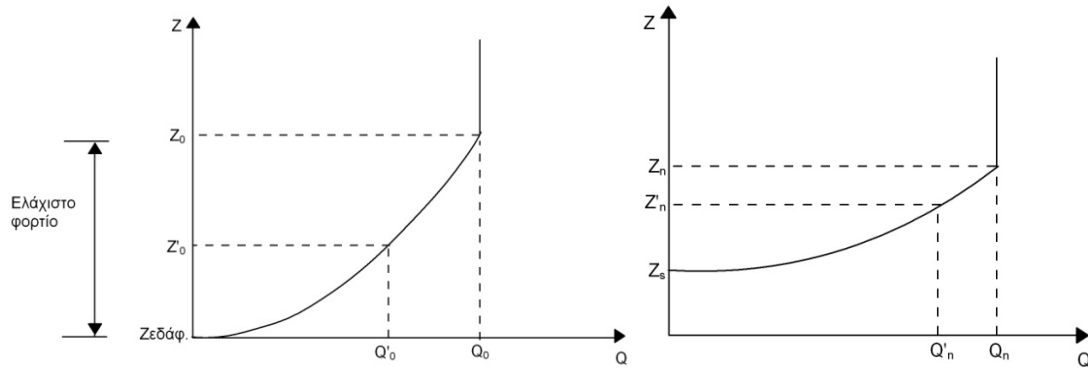
Η εμπειρία έχει δείξει ότι στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα που λειτουργούν με καθεστώς ελεύθερης ζήτησης, και έχουν σχεδιαστεί με τη μέθοδο του Clément για τον υπολογισμό των παροχών και την ασυνεχή μέθοδο του Labye για την οικονομική βελτιστοποίηση των διαμέτρων, παρουσιάζουν το σημείο της βέλτιστης λειτουργίας τους (Z_{opt} , $Q_{Clém}$) κοντά στη χαρακτηριστική καμπύλη C_{50} , όπου το δίκτυο δεν παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία του (Bethery, 1990; Steforoulou and Dercas, 2011a; b). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι η χαρακτηριστική καμπύλη C_{50} δεν αποτελεί χαμηλό ποσοστό ικανοποίησης μιας και κατά τη δημιουργία των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκε ένα αυστηρό κριτήριο. Συγκεκριμένα, κάθε συνδυασμός ανοιχτών υδροστομίων που παρουσιάζει έστω και μικρό έλλειμμα φορτίου θεωρείται ανεπιτυχής (CEMAGREF, 1983). Κοντά στη C_{50} υπάρχουν μερικές αστοχίες για ένα μικρό αριθμό υδροστομίων, για τα οποία το φορτίο πίεσης είναι μικρότερο από το ονομαστικό τους, αλλά η διαφορά φορτίου είναι μικρή και έτσι δεν γίνεται αντιληπτή από το χρήστη κατά τη διάρκεια της άρδευσης. (Tiercelin, 2006).

Εκτός από τον τύπο I που είναι και ο συνήθως χρησιμοποιούμενος υπάρχουν και άλλοι δύο τύποι χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες που σύμφωνα με αυτά που γνωρίζουμε μέχρι στιγμής δεν έχουν χρησιμοποιηθεί.

2.2.1.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (Τύπου II)

Στην περίπτωση αυτή οι δείκτες εκφράζουν ποσοστό συνδυασμών ανοικτών υδροστομίων στους οποίους κάποια υδροστόμια έχουν μειωμένη παροχή (έως ένα μέγιστο ποσοστό) ενώ τα υπόλοιπα διαθέτουν την ονομαστική τους παροχή.

Εξετάζοντας τη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης ενός υδροστομίου (Εικόνα 5a), γίνεται φανερό ότι μια σχετικά σημαντική μείωση στο φορτίο που διαθέτει η υδροληψία, θα οδηγήσει σε μικρότερη μείωση της παροχής του (σε σχέση με την ονομαστική του). Εάν λοιπόν η μείωση αυτή είναι μικρή, δε θα δημιουργηθεί σημαντικό πρόβλημα στη λειτουργία του υδροστομίου.



Εικόνα 5: (α) Χαρακτηριστική καμπύλη ενός υδροστομίου και (β) Χαρακτηριστική καμπύλη δικτύου

Με αυτή τη λογική, οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (II) προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας όχι τα ακραία σημεία (Z_n, Q_n) (Εικόνα 5b), αλλά τα σημεία (Z'_n, Q'_n) για τα οποία δεχόμαστε ότι σε ένα δεδομένο αριθμό υδροστομίων (ανάλογα με την επιλογή μας) η παροχή τους θα είναι μειωμένη έως ένα μέγιστο ποσοστό συγκριτικά με την ονομαστική τους παροχή (Δέρκας, 2000).

Στην προσέγγιση αυτή, το σημείο (Z_3, Q_3) αντιστοιχεί σε λειτουργία με μειωμένη ποιότητα που όμως μπορεί να εκτιμηθεί, ενώ το σημείο (Z_2, Q_2) αντιστοιχεί σε ποιότητα λειτουργίας 100%.

2.2.1.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (Τύπου III),

Στην περίπτωση αυτή, οι δείκτες εκφράζουν τον αριθμό των υδροστομίων με μειωμένη παροχή έως κάποιο ποσοστό (%) σε σχέση με την ονομαστική τους παροχή.

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών στην περίπτωση αυτή, υπολογίζεται ο μέσος αριθμός υδροστομίων που έχει μειωμένη παροχή χ (%) συγκριτικά με την ονομαστική του, για κάθε ζεύγος (Z, Q) . Με την επανάληψη της διαδικασίας για πολλά σημεία του διαγράμματος (Z, Q) μπορούν να χαραχθούν οι καμπύλες που αναπαριστούν το φορτίο που πρέπει να υπάρχει στην κεφαλή σε σχέση με τη ζητούμενη παροχή ώστε ένας συγκεκριμένος αριθμός υδροστομίων να έχει μειωμένη παροχή έως ένα ποσοστό σε σχέση με την ονομαστική τους παροχή.

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται φανερό ότι υπάρχουν πολλά είδη χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες και το καθένα από αυτά μας δίνει διαφορετική

πληροφόρηση για τη λειτουργία του δικτύου μας. Από τα είδη των χαρακτηριστικών καμπυλών που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιείται ευρέως ο πρώτος τύπος όπου οι δείκτες εκφράζουν το ποσοστό % συνδυασμών ανοικτών υδροστομίων που δεν παρουσιάζουν προβλήματα στη λειτουργία τους. Για τη δημιουργία των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών καμπυλών χρησιμοποιούνται τα ακραία σημεία των πραγματικών χαρακτηριστικών καμπυλών του δικτύου που εξασφαλίζουν λειτουργία ποιότητας 100% και άρα έχουμε τοποθετηθεί στην πλευρά της ασφάλειας.

2.2.1.4 Ανώτερη χαρακτηριστική καμπύλη

Με τη μεθοδολογία που έχει ήδη αναφερθεί μπορούν να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες που εκφράζουν το ποσοστό % των συνδυασμών ανοικτών υδροστομίων που δεν παρουσιάζουν προβλήματα στη λειτουργία τους. Ειδικότερα για την καμπύλη που δίνει ποσοστό ικανοποίησης 100%, αυτή δεν μπορεί να προσδιοριστεί όπως οι υπόλοιπες χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες, γιατί οι στατιστικές κατανομές που προσορμόζονται σε ένα δείγμα δίνουν άπειρη τιμή για πιθανότητα 100%. Για το λόγο αυτό, η ανώτερη χαρακτηριστική καμπύλη όπως ονομάζεται, η οποία θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι είναι η χαρακτηριστική καμπύλη 100%, προσδιορίζεται με μια διαφορετική μεθοδολογία από αυτή που βασίζεται στη στατιστική ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων της λειτουργίας του δικτύου.

Για τον προσδιορισμό της Ανώτερης Χαρακτηριστικής Καμπύλης κινούμαστε από τα κατάντη προς τα ανάντη προσδιορίζοντας σε κάθε κόμβο και για διάφορες παροχές τους συνδυασμούς ανοιχτών υδροστομίων με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις φορτίου. Τελικά για το σύνολο του δικτύου προσδιορίζεται η ανώτερη χαρακτηριστική καμπύλη που χωρίζει το διάγραμμα (Z, Q) σε δύο ημιχώρους. Κάθε σημείο (το οποίο χαρακτηρίζει ένα συνδυασμό ανοιχτών υδροστομίων) που βρίσκεται πάνω από την ανώτερη χαρακτηριστική καμπύλη μπορεί να λειτουργήσει χωρίς να παρουσιάζει κανένα πρόβλημα λειτουργίας. Στον ημιχώρο που δημιουργείται κάτω από την ανώτερη χαρακτηριστική καμπύλη τουλάχιστον ένας συνδυασμός ανοιχτών υδροστομίων παρουσιάζει πρόβλημα λειτουργίας.

2.2.2 Ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου

Η ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου επιτρέπει τον προσδιορισμό των υδροστομίων που παρουσιάζουν έλλειμμα πίεσης καθώς επίσης και τον προσδιορισμό των τμημάτων ενός δικτύου που παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες. Έτσι, με την ανάλυση σε επίπεδο

υδροστομίου μπορούν να προσδιοριστούν τα τμήματα του δικτύου που θα εμφανίσουν πρώτα ανεπάρκειες στη λειτουργία τους και θα χρειαστούν πρώτα επεμβάσεις ενίσχυσης ή ανάταξης. Τα μοντέλα που υλοποιούν ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου, υποθέτουν καθεστώς μόνιμης ροής (CEMAGREF, 1983; Lamaddalena and Sagardoy, 2000) ή καθεστώς μη μόνιμης ροής (Rossman, 2000; Lamaddalena and Ferreira, 2007; Estrada et al., 2009).

Μοντέλα που υιοθετούν καθεστώς μόνιμης ροής

Προκειμένου να υλοποιήσει την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου, το CEMAGREF (1983) υπολογίζει τις μόνιμες ροές (permanent regimes) για έναν προκαθορισμένο αριθμό παροχών στην κεφαλή του δικτύου και για ένα μεγάλο αριθμό τυχαίων συνδυασμών ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων. Για κάθε συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων, δημιουργείται ένας κατάλογος με τις παροχές που εμφανίζονται σε κάθε υδροστόμιο. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η παροχή που εμφανίζει κάθε υδροστόμιο σε ένα συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων μπορεί να κυμανθεί μεταξύ του μηδενός και της ονομαστικής παροχής του υδροστομίου. Η πραγματοποίηση ενός μεγάλου αριθμού τυχαίων συνδυασμών ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων, επιτρέπει τελικά τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Μέσω της στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων αυτών, μπορεί να εκτιμηθεί η πιθανότητα κάθε υδροστομίου να αστοχήσει ως προς την πίεση και την παροχή, αλλά και το μέγεθος της αστοχίας αυτής.

Το μοντέλο AKLA (Lamaddalena and Sagardoy, 2000) επίσης στηρίζεται στην υλοποίηση ενός αριθμού προσομοιώσεων προκειμένου να παραχθεί ένας αριθμός συνδυασμών ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων. Πρακτικά με τη βοήθεια μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών (γεννήτρια ομοιόμορφης κατανομής) ανοίγει ένας προκαθορισμένος αριθμός υδροστομίων K_r ,

$$K_r = \frac{Q_r}{d} \quad (2.8)$$

όπου Q_r (lt/s) είναι η εξεταζόμενη παροχή στην κεφαλή του δικτύου και d (lt/s) είναι η ονομαστική παροχή των υδροστομίων (περίπτωση δικτύου με υδροστόμια της ίδιας παροχής). Τα υδροστόμια που ανοίγουν συνολικά σε κάθε προσομοίωση λειτουργούν

ταυτόχρονα και η συνολική τους παροχή αντιστοιχεί στην παροχή που εξετάζεται στην κεφαλή του δικτύου.

Σε κάθε προσομοίωση, ένα υδροστόμιο j θεωρείται ότι λειτουργεί επιτυχώς εάν ισχύει γι' αυτό η παρακάτω σχέση:

$$H_{j,r} \geq H_{min,r} \quad , \quad (2.9)$$

όπου $H_{j,r}$ (m) είναι η πίεση του υδροστομίου j για το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων r και H_{min} (m) είναι το ονομαστικό φορτίο πίεσης του συγκεκριμένου υδροστομίου. Λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο φορτίο πίεσης στην κεφαλή του δικτύου και έχοντας υπολογίσει τις απώλειες φορτίου σε κάθε αγωγό του δικτύου, μπορεί να υπολογιστεί το διαθέσιμο φορτίο πίεσης για κάθε υδροστόμιο του δικτύου σε καθεστώς μόνιμης ροής. Το μοντέλο AKLA προσδιορίζει μέσω της παρακάτω σχέσης έναν όρο που ονομάζει σχετικό έλλειμμα φορτίου πίεσης ($\Delta H_{j,r}$) αλλά στην πραγματικότητα πρόκειται για τη σχετική μεταβολή του φορτίου πίεσης σε κάθε υδροστόμιο.

$$\Delta H_{j,r} = \frac{H_{j,r} - H_{min,r}}{H_{min,r}} \quad (2.10)$$

Το μοντέλο AKLA περιλαμβάνεται στο λογισμικό COPAM προκειμένου να υλοποιηθεί η ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου. Στο πλαίσιο της ανάλυσης αυτής υιοθετείται επίσης ένας δείκτης αξιοπιστίας του υδροστομίου (Hashimoto, 1980; Hashimoto et al., 1982) προκειμένου να περιγραφεί πόσο συχνά ένα υδροστόμιο αποτυγχάνει να προσφέρει την απαιτούμενη πίεση και παροχή. Προκειμένου να επιτευχθεί ο μαθηματικός ορισμός του παραπάνω δείκτη, γίνεται η παραδοχή ότι η λειτουργία ενός δικτύου μπορεί να περιγραφεί από μια σταθερή (stationary) στοχαστική διαδικασία (Lamaddalena and Sagardoy, 2000). Παρόλο που η παραδοχή αυτή είναι μια γενική προσέγγιση της λειτουργίας ενός δικτύου, στις περιόδους αιχμής όπου η ζήτηση αυξάνεται, η παραπάνω παραδοχή δεν απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα. Έτσι λοιπόν προσδιορίζεται ο συντελεστής αξιοπιστίας α_j για κάθε υδροστόμιο j , ο οποίος προσδιορίζει πόσο πιθανό είναι ένα υδροστόμιο να αποτύχει να μεταφέρει το ονομαστικό του φορτίο πίεσης. Ο δείκτης αυτός προσδιορίζεται μαθηματικά από τη σχέση που ακολουθεί.

$$a_j = \frac{\sum_{r=1}^C I_{h_{j,r}} \cdot I_{p_{j,r}}}{\sum_{r=1}^C I_{h_{j,r}}} \quad (2.11)$$

Όπου $I_{h_{j,r}} = 1$: εάν το υδροστόμιο j , είναι ανοιχτό στη συγκεκριμένη προσομοίωση r , $I_{h_{j,r}} = 0$: εάν το υδροστόμιο j , είναι κλειστό στη συγκεκριμένη προσομοίωση r , $I_{p_{j,r}} = 1$: εάν το φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο j , το οποίο είναι ανοιχτό στην προσομοίωση r , είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο πίεσης, $I_{p_{j,r}} = 0$: εάν το φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο j , το οποίο είναι ανοιχτό στην προσομοίωση r , είναι μικρότερο από το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο πίεσης και C είναι ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν.

Μοντέλα που υιοθετούν καθεστώς μη μόνιμης ροής

Τα περισσότερα από τα υφιστάμενα μοντέλα ανάλυσης της υδραυλικής λειτουργίας των αρδευτικών δικτύων υιοθετούν καθεστώς μόνιμης ροής. Στα αστικά δίκτυα διανομής νερού πολλά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί τα οποία υιοθετούν καθεστώς μη μόνιμης ροής (McInnis and Karney, 1995; Islam and Chaudry, 1998; Pezzinga, 1999; Walski et al., 2001). Η χρήση αυτού του είδους προσέγγισης στα αρδευτικά δίκτυα υλοποιείται από τους Lamaddalena και Perreira (2007) οι οποίοι προτείνουν το μοντέλο FLUCS το οποίο βασίζεται σε μια προκαθορισμένη παροχή στην κεφαλή του δικτύου, προκειμένου να παράξει τυχαία, γι' αυτή την παροχή διάφορα σενάρια καθεστώτων ροής εντός του δικτύου. Το μοντέλο αυτό βρίσκει εφαρμογή σε μικρά αρδευτικά δίκτυα (δενδρώδους διάταξης) έως 300 κόμβων και για την εφαρμογή του δεν απαιτείται η προϋπόθεση σταθερής παροχής στα υδροστόμια.

Η μετάβαση από ένα καθεστώς μόνιμης ροής σε ένα καθεστώς μη μόνιμης ροής και το αντίστροφο, οφείλεται στη διαφοροποίηση των οριακών συνθηκών εξαιτίας του ανοίγματος ή κλεισίματος ενός ή περισσότερων υδροστομίων. Τα μοντέλα μη μόνιμης ροής χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ζευγαριών πίεσης και παροχής σε κάθε κόμβο του δικτύου, όταν η παροχή στα υδροστόμια δεν είναι η ονομαστική, αλλά μεταβάλλεται και/ή όταν ο αριθμός των υδροστομίων που λειτουργούν ταυτόχρονα είναι μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο βάσει της εξεταζόμενης παροχής στην κεφαλή του δικτύου (Lamaddalena και Perreira, 2007). Η περίπτωση μη μόνιμης ροής σε ένα

υδρευτικό δίκτυο με βρόχους έχει μελετηθεί από αρκετούς ερευνητές (Messina, 1974; Poggi, 1985; Sharp, 1981; Castorani and Piccini, 1991).

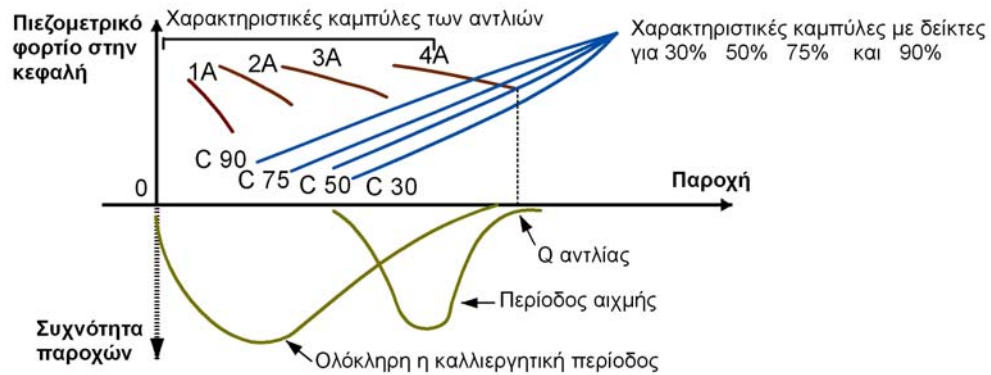
Σύμφωνα με τους Lamaddalena και Perreira (2007) τα υφιστάμενα μοντέλα ανάλυσης των αρδευτικών δικτύων δεν μπορούν να εφαρμοστούν στις περιπτώσεις που η παροχή των υδροστομιών εντός ενός αρδευτικού δικτύου μεταβάλλεται ανάλογα με τη διαθέσιμη πίεση. Η διαθέσιμη πίεση σε ένα υδροστόμιο εξαρτάται αφενός από τον αριθμό των ανοιχτών υδροστομιών εντός του δικτύου αλλά και από το καθεστώς ροής ανάντη του υδροστομίου. Καθεστώτα μη μόνιμης ροής διαμορφώνονται σε δίκτυα στα οποία δεν είναι εγκατεστημένοι περιοριστές παροχής ή ρυθμιστές πίεσης, αλλά και σε δίκτυα στα οποία παρόλο που έχουν εγκατασταθεί περιοριστές παροχής και ρυθμιστές πίεσης, η διαθέσιμη πίεση δεν είναι αρκετή ώστε να εξασφαλιστεί η λειτουργία των υδροστομιών στην ονομαστική τους παροχή και πίεση.

Σύμφωνα με τους Lamaddalena (1997) και Calejo (2003) μοντέλα που υιοθετούν καθεστώς μόνιμης ροής δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε δίκτυα που δεν είναι εξοπλισμένα με περιοριστές παροχής και ρυθμιστές πίεσης παρά μόνο στην περίπτωση που μόλις λίγα υδροστόμια ανοίγουν ταυτόχρονα και κατά συνέπεια επιτυγχάνεται σύντομα στο δίκτυο καθεστώς μόνιμης ροής (Lamaddalena και Perreira, 2007). Ωστόσο αυτό βρίσκει εφαρμογή μόνο σε περιόδους χαμηλής ζήτησης νερού από τους χρήστες.

2.2.3 Ολοκληρωμένη ανάλυση του δικτύου

Η διαχείριση των υδατικών πόρων περιλαμβάνει τη συστηματική χωροχρονική παρακολούθηση και την πρόβλεψη δύο βασικών παραμέτρων, της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων και των απαιτήσεων σε νερό (Sofios *et al.*, 2008). Σύμφωνα με τους Mimikou and Baltas (2013) η διαχείριση των υδατικών πόρων είναι σε πολλές περιοχές προβληματική, λόγω ελλείμματος επικοινωνίας μεταξύ των υπευθύνων για τη χάραξη πολιτικής, των εμπλεκόμενων παραγόντων και των χρηστών.

Η εξέταση των τριών συνιστωσών (έργο κεφαλής, δίκτυο σωληνώσεων και χρήστες) ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου που λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση μπορεί να οδηγήσει στο σχεδιασμό ενός συνολικού γραφήματος το οποίο θα αποτυπώνει και τις τρεις συνιστώσες του δικτύου. Η μορφή ενός τέτοιου γραφήματος δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Bethery *et al.*, 1981):



Εικόνα 6: Ολοκληρωμένη ανάλυση ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου

Στο διάγραμμα αυτό, η συμπεριφορά των αγροτών περιγράφεται από τις δύο καμπύλες συχνότητας εμφάνισης των παροχών για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο και για την περίοδο αιχμής. Η συμπεριφορά του έργου κεφαλής περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του αντλιοστασίου, ενώ το δίκτυο σωληνώσεων περιγράφεται από τη δέσμη των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες του δικτύου. Στο παραπάνω διάγραμμα, φαίνεται πως το σύστημα λειτουργεί ικανοποιητικά, μιας και οι παροχές που συνήθως καλούνται επιτρέπουν ένα βαθμό ικανοποίησης των συνδυασμών ανοικτών υδροστομίων μεγαλύτερο από 90% ενώ στην περίοδο αιχμής το ποσοστό ικανοποίησης πέφτει στο 50%. Ωστόσο ακόμα και αυτό το ποσοστό ικανοποίησης στην περίοδο αιχμής μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των καλλιεργητών χωρίς σημαντικά προβλήματα στην παρεχόμενη πίεση και παροχή στο υδροστόμιο, μιας και όπως έχει ήδη αναφερθεί για τη δημιουργία των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες έχουμε ήδη τοποθετηθεί στην πλευρά της ασφάλειας θεωρώντας ότι ένα και μόνο υδροστόμιο που δεν ικανοποιείται αρκεί για να χαρακτηρίσει το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοικτών υδροστομίων ανεπιτυχή.

Με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες μπορεί να προσδιοριστεί μια καμπύλη για την καλή λειτουργία του δικτύου σε επίπεδο μελέτης. Για τα δίκτυα που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία, μπορούν να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα, τόσο για τη γενική λειτουργία του δικτύου όσο και για συγκεκριμένα σημεία του δικτύου.

Η σημασία ενός τέτοιου εργαλείου για τους διαχειριστές των συλλογικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης είναι μεγάλη, καθώς τους επιτρέπει διαφοροποιώντας τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου να έχουν εικόνα της λειτουργίας του δικτύου για διάφορα σενάρια

λειτουργίας. Μέσω της ανάλυσης, οι διαχειριστές του δικτύου παίρνουν πληροφορίες για τη γενική λειτουργική κατάσταση του δικτύου, μέσω των μόνιμων ροών και με τον προσδιορισμό των απωλειών ανά τρέχον μέτρο εντοπίζονται οι αγωγοί που πλησιάζουν τον κορεσμό.



Εικόνα 7: Η σημασία της ολοκληρωμένης ανάλυσης ενός συλλογικού δικτύου άρδευσης ελεύθερης ζήτησης

Όταν έχει πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός ενός δικτύου, όταν δηλαδή έχει γίνει ο υπολογισμός των παροχών και η βελτιστοποίηση των διαμέτρων, είναι γνωστή η λειτουργία του δικτύου για ένα συγκεκριμένο σημείο του διαγράμματος (Z, Q). Αντίθετα, όταν έχουν χαραχθεί οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες ενός δικτύου, είναι γνωστή η συμπεριφορά του για κάθε σημείο ($Z > 0, Q > 0$) του διαγράμματος (Δέρκας, 2001).

Έχοντας χαράξει τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες ενός δικτύου και την ανώτερη χαρακτηριστική μπορούμε να επιλέξουμε την *αντιπροσωπευτική χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου*. Για κάθε σημείο πάνω από την καμπύλη αυτή, η λειτουργία του δικτύου θα θεωρείται ικανοποιητική, ενώ για κάθε σημείο κάτω από αυτή το δίκτυο θα λειτουργεί με κάποια προβλήματα στην προσφερόμενη παροχή και πίεση στα υδροστόμια.

Η επιλογή της αντιπροσωπευτικής καμπύλης του δικτύου είναι θέμα του μελετητή και των προδιαγραφών του έργου. Ο μελετητής μπορεί να επιλέξει υψηλή ικανοποίηση για τις παροχές που εμφανίζονται συχνότερα στο δίκτυο και χαμηλότερη ικανοποίηση για τις υπόλοιπες παροχές.

2.2.4 Σημασία της ανάλυσης της λειτουργίας ενός δικτύου

Η ανάλυση της λειτουργίας ενός δικτύου είναι εξαιρετικά σημαντική τόσο για ένα δίκτυο που πρόκειται να κατασκευαστεί, όσο και για ένα δίκτυο που βρίσκεται ήδη σε λειτουργία. Στην περίπτωση που το δίκτυο βρίσκεται υπό μελέτη, διακρίνουμε δύο περιπτώσεις: το δίκτυο να πρόκειται να κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου από την αρχή, και στη δεύτερη περίπτωση το δίκτυο να πρόκειται να κατασκευαστεί σταδιακά με τη λογική των προοδευτικών ενισχύσεων ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη προσαρμογή του έργου στις μεταβαλλόμενες ανάγκες της αρδευτικής περιμέτρου.

Στην περίπτωση που το δίκτυο κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου από την αρχή, εάν υπάρχει ήδη ταμιευτήρας που πρόκειται να τροφοδοτήσει το δίκτυο, η βελτιστοποίηση των διαμέτρων θα γίνει για τη στάθμη που επιβάλλει ο υφιστάμενος ταμιευτήρας, και θα πρέπει να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του δικτύου για διάφορες παροχές στην κεφαλή. Στην περίπτωση που ο ταμιευτήρας πρόκειται να κατασκευαστεί, η επιλογή της θέσης και του αντίστοιχου φορτίου του ταμιευτήρα θα πρέπει να ελαχιστοποιεί το κόστος ταμιευτήρα και το κόστος του δικτύου. Τέλος, εάν το δίκτυο πρόκειται να τροφοδοτηθεί από αντλιοστάσιο, ο καθορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες είναι πολύ σημαντικός προκειμένου να καθοριστούν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του αντλιοστασίου.

Στην περίπτωση που το υπό μελέτη δίκτυο πρόκειται να κατασκευαστεί με τη λογική των προοδευτικών ενισχύσεων, η ανάλυση του δικτύου είναι απαραίτητη προκειμένου να γίνουν οι κατάλληλες ενισχύσεις και να αποφευχθούν σχεδιαστικά σφάλματα. Με την ανάλυση του δικτύου, θα εντοπιστούν οι αγωγοί που χρήζουν ενίσχυσης και θα αναδειχθούν οι προτεραιότητες. Επιπλέον, με τη βοήθεια της ανάλυσης μπορούν να προβλεφθούν οι απαιτούμενες ενισχύσεις των αντλιοστασίων ή η εγκατάσταση νέων αντλιών για την ικανοποίηση της μελλοντικής ζήτησης.

Η ανάλυση ενός δικτύου που ήδη λειτουργεί είναι εξαιρετικά σημαντική διαδικασία καθώς θα οδηγήσει στην ορθή και ακριβή αντιμετώπιση των υφιστάμενων προβλημάτων και τελικά στη βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών. Με την ανάλυση του δικτύου μπορούν να εντοπιστούν τα υδροστόμια που παρουσιάζουν ανεπάρκειες πίεσης και παροχής και η συχνότητα με την οποία εμφανίζουν αυτή την ανεπάρκεια, οι υποδιαστασιοποιημένοι αγωγοί, και άλλα προβλήματα του δικτύου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο σχεδιασμός ενός δικτύου πραγματοποιείται για ένα συγκεκριμένο σημείο που προσδιορίζεται από την $Q_{Clém}$ (είναι η παροχή που προσδιορίζεται με τον 1ο νόμο του Clément) και το πιεζομετρικό φορτίο $Z_{optimal}$ στην κεφαλή του δικτύου. Έτσι, στην πραγματικότητα δεν ξέρουμε πώς θα συμπεριφερθεί το δίκτυο σε άλλες καταστάσεις λειτουργίας (πχ. για άλλους συνδυασμούς πιεζομετρικού φορτίου και παροχής στην κεφαλή).

Οι ανεπάρκειες του δικτύου σε επίπεδο υδροστομίου γίνονται αρχικά αντιληπτές από την εμφάνιση παραπόνων από τους αγρότες για την κακή ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχει το δίκτυο. Δεδομένου ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να εντοπίσουμε που ακριβώς βρίσκονται οι αιτίες των ανεπαρκειών ελέγχουμε την πραγματική κατάσταση του δικτύου μέσω προσομοίωσης. Με τη βοήθεια της προσομοίωσης, για ένα σημαντικό αριθμό περιπτώσεων που μοιάζουν με αυτές που εμφάνισαν ανεπάρκειες, υπολογίζεται η πραγματική παροχή που δίνει σε κάθε υδροστόμιο το έργο κεφαλής. Η προσομοίωση αυτή μπορούσε να γίνει μέχρι τώρα με προγράμματα όπως το ICARE και COPAM.

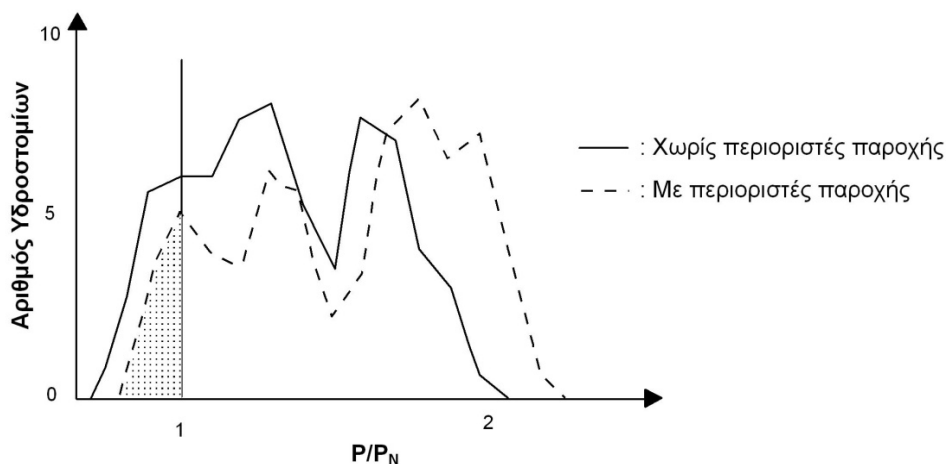
Για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας των υπηρεσιών του κάθε υδροστομίου το ICARE ομαδοποιεί τα υδροστόμια με βάση το λόγο

$$\frac{Q}{Q_N} = \frac{\text{Παροχεταιύμενη παροχή υδροστομίου}}{\text{Ονομαστική παροχή υδροστομίου}} \quad (2.12)$$

Το πρόγραμμα δίνει επίσης τους κόμβους με τα υδροστόμια που είναι οριακά όσον αφορά το φορτίο πίεσης.

Οι Bethery et al (1981) δίνουν ένα διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνονται οι συνέπειες που έχει στη λειτουργία ενός δικτύου, η απουσία περιοριστών παροχής. Το διάγραμμα (Εικόνα 8) αφορά ένα γαλλικό δίκτυο (Marmande, Lot et Garonne) και περιγράφει τον

αριθμό των υδροστομιών που δεν ικανοποιούνται (βάσει του λόγου $\frac{P}{P_N}$) στην περίπτωση που στα υδροστόμια του δικτύου λειτουργούν περιοριστές παροχής και στην περίπτωση που στο δίκτυο δεν λειτουργούν περιοριστές παροχής στα υδροστόμια. Είναι προφανές, ότι για τιμές του λόγου $\frac{P}{P_N}$ μικρότερες του 1, έχουμε υδροστόμια τα οποία δεν ικανοποιούνται και παρουσιάζουν ανεπάρκειες. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο αριθμός των υδροστομιών που δεν ικανοποιούνται (δηλ. τα υδροστόμια για τα οποία ο λόγος $\frac{P}{P_N}$ είναι μικρότερος της μονάδας) αυξάνεται σημαντικά όταν στο δίκτυο δεν λειτουργούν περιοριστές παροχής. Η απουσία περιοριστών παροχής είναι γεγονός για το μεγαλύτερο μέρος των ελληνικών δικτύων.



Εικόνα 8: Ο αριθμός των υδροστομιών για διάφορες τιμές του λόγου P/P_N σε δίκτυο με ή χωρίς περιοριστές παροχής

Σταχυολογώντας, θα λέγαμε ότι η ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου παρέχει σημαντική πληροφόρηση για τη φυσιογνωμία του δικτύου και την πραγματική του κατάσταση, αλλά δεν μας πληροφορεί για το είδος των διαρθρωτικών μέτρων που πρέπει να μελετηθούν προκειμένου να βελτιωθούν οι παρεχόμενες υπηρεσίες του συλλογικού αρδευτικού δικτύου. Γι' αυτά, χρειαζόμαστε ένα εργαλείο που θα αποτυπώνει τη συνολική εικόνα του δικτύου.

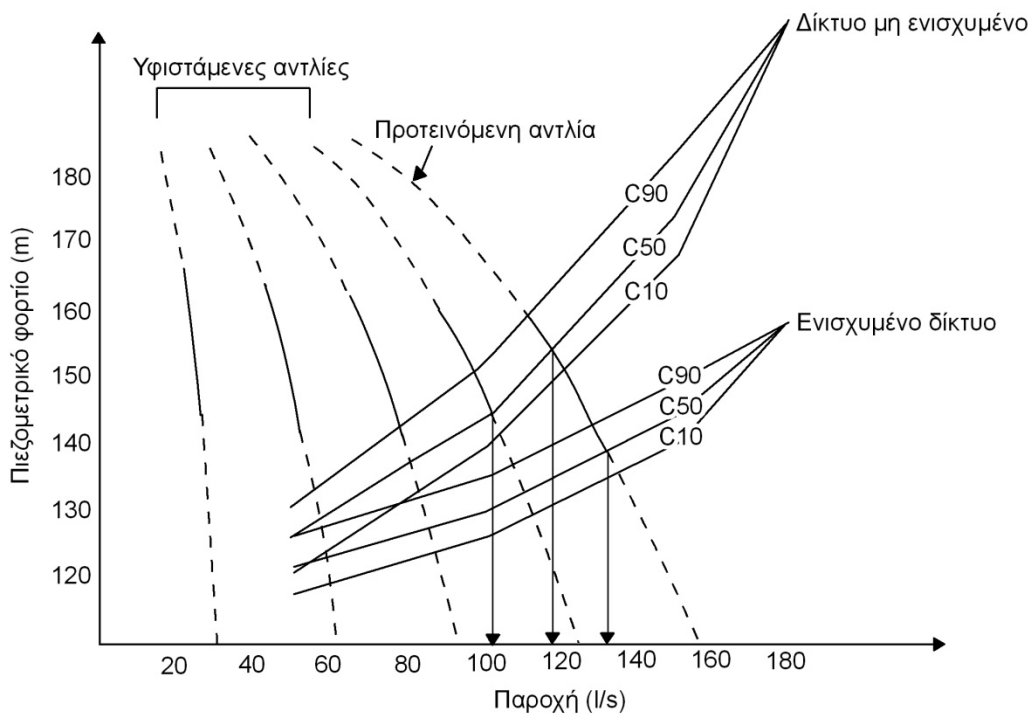
Η σημασία της ολοκληρωμένης ανάλυσης ενός δικτύου φαίνεται στο παράδειγμα που ακολουθεί (Δέρκας, 2001):

Πρόκειται για ένα δίκτυο της ΝΔ Γαλλίας (Δίκτυο GOOS, Landes) το οποίο σύμφωνα με τις διαμαρτυρίες των αγροτών ήταν έντονα κορεσμένο. Όταν η καλούμενη παροχή στην κεφαλή υπερέβαινε τα 100l/s παρουσιαζόταν μια έντονη πτώση της πίεσης. Δεδομένης της ανάπτυξης των καλλιεργειών στην περιοχή και των εγκατεστημένων υδροστομιών, ο διαχειριστής εκτίμησε ότι το δίκτυο πρέπει να μπορεί να ανταποκρίνεται σε παροχή 115l/s ενώ στο άμεσο μέλλον θα χρειαστεί να ανταποκρίνεται σε 140l/s.

Η λύση που προτάθηκε ήταν σε δύο επίπεδα ενίσχυσης:

- Σε πρώτο επίπεδο, προτάθηκε η προσθήκη μιας επιπλέον (πέμπτης) αντλίας, που θα επιτρέψει στο δίκτυο να ικανοποιήσει παροχή αιχμής 115-120l/s.
- Σε δεύτερο επίπεδο, προτάθηκε η ενίσχυση του δικτύου (διπλασιασμός ορισμένων αγωγών) προκειμένου να μειωθεί η κλίση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες και να επιτευχθεί επαρκές ποσοστό ικανοποίησης.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 9) φαίνεται η εξέλιξη των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες του δικτύου μετά την ενίσχυση του δικτύου, όπου η παροχή του δικτύου έχει φτάσει τα 130-133l/s (5 αντλίες, χαρακτηριστική C₅₀).



Εικόνα 9: Χαρακτηριστικές καμπύλες των αντλιών και χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες για ένα δίκτυο στη ΝΔ Γαλλία πριν και μετά τη σχεδιαζόμενη ενίσχυση

Στοιχεία που μπορούμε να εξάγουμε από τη μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών:

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες είναι ανιούσες καμπύλες, η κλίση τους εξαρτάται από την τοπογραφία και αυξάνει με την αύξηση των απωλειών ενέργειας. Η γενική μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών μπορεί να επιτρέψει να διαπιστωθεί άμεσα εάν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου που εξετάζεται.

Σε ένα κατερχόμενο δίκτυο, δηλαδή σε ένα δίκτυο όπου το αντλιοστάσιο βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο από αυτό του δικτύου, οι χαρακτηριστικές καμπύλες έχουν μικρότερη κλίση, ιδιαίτερα στις μέσες παροχές, μιας και η διαφορά υψομέτρου αντισταθμίζει ένα μέρος των απωλειών. Αντίθετα, σε ένα ανερχόμενο δίκτυο, δηλαδή σε ένα δίκτυο όπου το αντλιοστάσιο βρίσκεται σε χαμηλότερο υψόμετρο από το υπόλοιπο δίκτυο, οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες είναι ιδιαίτερα ανιούσες. Έτσι, ένα κατερχόμενο δίκτυο με έντονα ανιούσες χαρακτηριστικές καμπύλες δείχνει σημαντικές απώλειες ενέργειας (Δέρκας, 2001).

Ένα δίκτυο πολύ διακλαδισμένο έχει μια δέσμη χαρακτηριστικών καμπυλών αρκετά απομακρυσμένων, μιας και κανένα κομμάτι του δικτύου δεν είναι κυρίαρχο, και ανάλογα με το που θα εκδηλωθεί η απαιτούμενη ζήτηση, η συμπεριφορά του δικτύου θα είναι διαφορετική. Αντίθετα, σε ένα επίμηκες δίκτυο ή σε ένα δίκτυο με μεγάλου μήκους αγωγό μεταφοράς ή σε ένα δίκτυο όπου κάποιο τμήμα του είναι έντονα υπερυψωμένο από το υπόλοιπο, οι χαρακτηριστικές καμπύλες θα είναι αρκετά κοντά η μία στην άλλη. Αυτό συμβαίνει γιατί το συγκεκριμένο τμήμα είναι το πιο απαιτητικό και καθορίζει πάντα τη συμπεριφορά του συστήματος.

2.3 Δείκτες αξιολόγησης της λειτουργίας των αρδευτικών δικτύων

2.3.1 Γενικά

Είναι γνωστό ότι στις Μεσογειακές περιοχές και σε άλλες με έντονα ξηροθερμικό κλίμα, το μεγαλύτερο κομμάτι του καταναλισκόμενου νερού χρησιμοποιείται από τη γεωργία. Στην Ελλάδα το ποσοστό του νερού που χρησιμοποιείται από τη γεωργία αγγίζει το 80-85%, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά για άλλες χώρες είναι 68% στην Ισπανία, 57% στην Ιταλία και 52% στην Πορτογαλία (ΕΕΑ, 1999). Ο ανταγωνισμός μεταξύ των διαφορετικών χρήσεων του νερού σε συνδυασμό με τη μείωση της γεωργικής γης λόγω της επέκτασης του αστικού και βιομηχανικού ιστού, αποτελούν μία σημαντική «πρόκληση» για τους διαχειριστές των μεγάλων αρδευτικών δικτύων.

Ήδη η πλειοψηφία των μεγάλων αρδευτικών δικτύων αδυνατεί να προσφέρει στους χρήστες το επίπεδο των υπηρεσιών για το οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε. Εκ των πραγμάτων, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή του νερού με σκοπό την άρδευση των καλλιεργειών πρέπει να βελτιωθεί. Επιπλέον, η λειτουργία των αρδευτικών δικτύων πρέπει να αξιολογείται και να παρακολουθείται συνεχώς, ακόμα και σε καινούργια αρδευτικά δίκτυα που λειτουργούν βάσει των προδιαγραφών τους και που δεν παρουσιάζουν προβλήματα στη λειτουργία τους. Με τη συνεχή παρακολούθηση και αξιολόγηση της λειτουργίας τους, δίνεται η δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου να προγραμματίζει με ακρίβεια και έγκαιρα τις επεμβάσεις εκσυγχρονισμού του δικτύου καθώς επίσης και να οργανώνει τη λειτουργία του δικτύου με τρόπο που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των χρηστών σε κάθε καλλιεργητική περίοδο. Η απόδοση της λειτουργίας των αρδευτικών δικτύων είναι μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρος για την αύξηση της παραγωγής και κατά συνέπεια του εισοδήματος των παραγωγών, ιδιαίτερα σε συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων και ανταγωνισμού μεταξύ διαφορετικών χρήσεων (γεωργία, βιομηχανία, τουρισμός, κα).

Για την αρδευόμενη γεωργία, ο στόχος είναι να συνεισφέρει στην αύξηση της παραγωγής αγροτικών προϊόντων υψηλής ποιότητας, κατά συνέπεια και στην αύξηση τους εισοδήματος των παραγωγών, εξασφαλίζοντας παράλληλα την αειφορία του φυσικού πόρου και φροντίζοντας να μην αυξάνει το περιβαλλοντικό κόστος. Σημείο εκκίνησης για την επίτευξη των παραπάνω στόχων είναι η βελτίωση της εφαρμογής του αρδευτικού νερού εντός των αρδευτικών συστημάτων. Για να γίνει αυτό πρέπει να

αξιολογηθεί η λειτουργία των αρδευτικών δικτύων. Με τον όρο «αξιολόγηση της λειτουργίας» (performance assessment) εννοούμε τη συστηματική παρακολούθηση, καταγραφή και ερμηνεία των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του δικτύου με στόχο τη βελτίωση της λειτουργίας τους. Τελικά, η αξιολόγηση της λειτουργίας των αρδευτικών δικτύων θα πρέπει να προσφέρει χρήσιμα και αξιόπιστα στοιχεία για τη χρήση του νερού σε όλα τα επίπεδα της διαχείρισης του αρδευτικού δικτύου (από το χρήστη μέχρι το διαχειριστή του συστήματος). Σύμφωνα με τους Murrey-Rust και Snellen (1993) οι πληροφορίες που προκύπτουν από την αξιολόγηση της λειτουργίας ενός αρδευτικού συστήματος πρέπει να απαντούν σε δύο ερωτήματα:

1. Διαχειρίζομαι το δίκτυο όπως θα έπρεπε;
2. Κάνω τις σωστές επεμβάσεις/παρεμβάσεις στη λειτουργία του δικτύου;

Το πρώτο ερώτημα εξασφαλίζει την εύρυθμη επιχειρησιακή λειτουργία του δικτύου και στόχος του είναι να αναδείξει εάν το επίπεδο των υπηρεσιών που προσφέρει το δίκτυο ανταποκρίνεται στους στόχους και στις ανάγκες που έχουν διαμορφωθεί. Το δεύτερο ερώτημα στοχεύει στον επιτυχή στρατηγικό σχεδιασμό των μελλοντικών επεμβάσεων από τους διαχειριστές του δικτύου. Το ερώτημα αυτό στοχεύει στην αποτελεσματική αναθεώρηση των μακροπρόθεσμων στόχων του δικτύου (πχ. αλλαγή κτηματολογίου, διαφοροποίηση των αναγκών των αγροτών, κα).

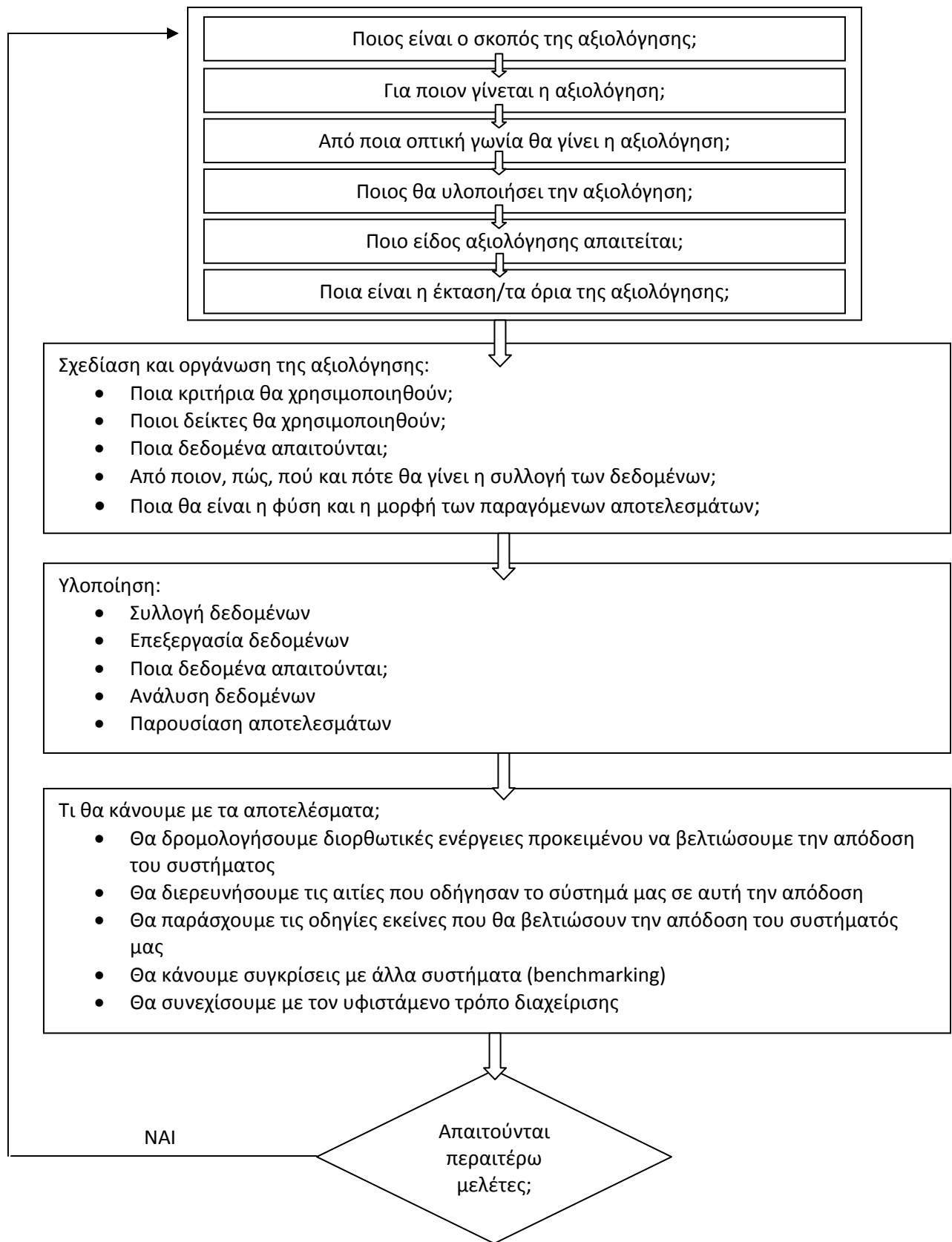
2.3.2 Πλαίσιο για την αξιολόγηση της λειτουργίας

Ο προσδιορισμός ενός γενικού προτεινόμενου πλαισίου για τη λειτουργική αξιολόγηση των αρδευτικών έργων γίνεται προκειμένου να δοθούν κατευθυντήριες οδηγίες που θα βοηθήσουν στην υλοποίηση της αξιολόγησης της λειτουργίας. Με τον προσδιορισμό του πλαισίου αξιολόγησης έχει ασχοληθεί ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών (Bottral, 1981; Abernethy, 1984; Oad και McCornick, 1989; Svendsen, 1990; Small και Svendsen, 1992; Murray-Rust και Snellen, 1993; Burton et al., 2000; Burton και Mututwa, 2002).

Τα στάδια ενός πλαισίου αξιολόγησης αναφέρονται στη συνέχεια (Bos et al., 2004):

1. Σκοπός και στρατηγική
2. Σχεδιασμός και προγραμματισμός
3. Υλοποίηση
4. Εφαρμογή
5. Περαιτέρω ενέργειες

Τα στάδια αυτά περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια (Εικόνα 10):



Εικόνα 10: Τα στάδια ενός πλαισίου αξιολόγησης

Σκοπός και στρατηγική: Το πρώτο στάδιο στη δημιουργία του πλαισίου αξιολόγησης της λειτουργίας είναι να προσδιοριστεί με σαφήνεια ο **σκοπός** της αξιολόγησης. Έτσι, αρχικά πρέπει να αποφασιστεί ο σκοπός της αξιολόγησης, να οριστούν οι **στόχοι** της και να γίνει ξεκάθαρο για ποιον γίνεται η αξιολόγηση (πχ. για τους αγρότες, για τους διαχειριστές των έργων, για τους φορείς της δημόσιας διοίκησης που ασχολούνται με τα έργα αυτού του είδους, για ερευνητικούς φορείς, κα). Επιπλέον πρέπει να αποφασιστεί από ποιον θα γίνει η αξιολόγηση και ποιο θα είναι το **είδος** της. Οι Small και Svendsen (1992) διακρίνουν πέντε διαφορετικά είδη αξιολόγησης:

1. Λειτουργική (Operational): Σχετίζεται με τον καθημερινό (ή σε επίπεδο καλλιεργητικής περιόδου) έλεγχο και την αξιολόγηση του έργου.
2. Λογοδοσίας (Accountability): Γίνεται αξιολόγηση των υπευθύνων για τη διαχείριση του έργου.
3. Παρεμβατική (Intervention): Γίνεται για να βοηθηθούν οι υπεύθυνοι ώστε να αποφασίσουν ενισχύσεις προκειμένου να βελτιώσουν τη λειτουργία και την αποδοτικότητα του έργου.
4. Βιωσιμότητας (Sustainability): Εστιάζεται στη βιώσιμη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων και τις συνέπειες από τη χρήση τους.
5. Διαγνωστική (Diagnostic): Στόχος της είναι να καταγράψει τις αιτίες που προκαλούν συγκεκριμένες συμπεριφορές του έργου. Με τον εντοπισμό και την καταγραφή τους γίνεται ευκολότερη η διαχείρισή τους.

Επίσης είναι εξαιρετικά σημαντικό να οριστεί από την αρχή εάν το πλαίσιο αξιολόγησης που δημιουργείται αφορά ένα συγκεκριμένο έργο (internal analysis) ή ένα μεγαλύτερο αριθμό έργων που συγκρίνονται ως προς τη λειτουργία τους (external analysis). Η εσωτερική ή εξωτερική αξιολόγηση θα καθορίσει την επιλογή των κριτηρίων αξιολόγησης.

Τέλος, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν η έκταση και τα όρια του πλαισίου αξιολόγησης. Τα όρια του πλαισίου μπορεί να είναι χωρικά ή χρονικά.

Σχεδιασμός και προγραμματισμός:

Στο στάδιο αυτό πρέπει να προσδιοριστούν τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν, οι δείκτες αξιολόγησης που θα υιοθετηθούν, τα δεδομένα που θα χρειαστούν, πώς θα γίνεται η συλλογή τους και τέλος πώς θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Παραδείγματα ευρέως χρησιμοποιούμενων κριτηρίων είναι η επάρκεια (Adequacy), η αποδοτικότητα (Efficiency), η αξιοπιστία (Dependability) και άλλα. Η σύνδεση μεταξύ των κριτηρίων και των δεικτών αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθούν είναι πολύ σημαντική και εξαρτάται από τον τύπο της αξιολόγησης που επιδιώκεται. Ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων (γραφήματα, πίνακες, κα) εξαρτάται όπως είναι λογικό από το κοινό στο οποίο απευθύνεται η ανάλυση.

Υλοποίηση: Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη συλλογή των δεδομένων, την επεξεργασία τους, την ανάλυση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Εφαρμογή: Στο στάδιο αυτό και ανάλογα με τα αποτελέσματα της υλοποίησης, μπορούν να γίνουν διορθωτικές παρεμβάσεις όπως για παράδειγμα να οριστούν εκ νέου οι στρατηγικοί και λειτουργικοί στόχοι του πλαισίου αξιολόγησης. Επιπλέον στο στάδιο αυτό ανήκει η εφαρμογή των κατάλληλων διορθωτικών μέτρων για τη βελτίωση της λειτουργίας του αρδευτικού συστήματος βάσει των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης. Έτσι, στο στάδιο αυτό προγραμματίζονται και πραγματοποιούνται έργα ανάταξης και εκσυγχρονισμού του δικτύου καθώς επίσης και έργα ενίσχυσης του δικτύου, αλλά και επιπλέον εκπαίδευσης του προσωπικού.

Στο στάδιο αυτό ανήκει η σχετικά πρόσφατη διαδικασία της συγκριτικής αξιολόγησης (benchmarking), η οποία ορίζεται ως η διαδικασία που μας επιτρέπει να βελτιώνουμε τη λειτουργική επάρκεια ενός έργου βασιζόμενοι στη λειτουργική επάρκεια που εμφάνισε αυτό ή άλλα παρόμοια έργα στο παρελθόν (Malano and Burton, 2001). Όπως είναι λογικό, το βασικό εργαλείο για την συγκριτική αξιολόγηση είναι οι **δείκτες αξιολόγησης της λειτουργίας**. Η επιλογή των δεικτών άλλωστε θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να αναδείξει τις διαφορές μεταξύ των αρδευόμενων περιοχών που συγκρίνονται. Συγκριτική αξιολόγηση κάποιων περιοχών έχει εφαρμοστεί για αρδευόμενες περιοχές της Ισπανίας (Rodríguez-Díaz et al., 2004; Rodríguez-Díaz et al., 2008) αλλά και για άλλες περιοχές του κόσμου (Murray-Rust and Snellen, 1993; LWRRDC, 1998; Molden et al., 1998; Sakthivadivel et al., 1999; Malano and Burton, 2001).

Περαιτέρω ενέργειες: Σε κάποιες περιπτώσεις η αξιολόγηση ενός έργου μπορεί να αναδείξει προβλήματα ή κινδύνους που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν απλώς με τη λήψη πρόσθετων μέτρων, αλλά μπορεί να χρειάζεται σύνταξη μελέτης και τη διενέργεια επιπλέον ερευνών.

2.3.3 Επιθυμητά χαρακτηριστικά των δεικτών αξιολόγησης

Είναι σημαντικό με τη βοήθεια των δεικτών αξιολόγησης που επιλέγονται, να περιγράφεται αντικειμενικά η λειτουργία του δικτύου σε σχέση με τους επιδιωκόμενους στόχους που έχουν οριστεί. Ένας αποτελεσματικός δείκτης αξιολόγησης δίνει πληροφορία στο διαχειριστή για την υφιστάμενη λειτουργική κατάσταση του δικτύου και σε συνδυασμό με άλλους δείκτες τον βοηθά να αποφασίσει το είδος των διορθωτικών ενεργειών προκειμένου να βελτιώσει την λειτουργική κατάσταση του δικτύου. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός δείκτη αξιολόγησης περιγράφονται στη συνέχεια (Bos et al., 1994):

Επιστημονική βάση (Scientific basis):

Ο δείκτης αξιολόγησης θα πρέπει να στηρίζεται σε κάποιο μοντέλο που να περιγράφει το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό κομμάτι της αρδευτικής διαδικασίας. Το μοντέλο αυτό θα πρέπει να είναι εμπειρικά ποσοτικοποιημένο και στατιστικά ελεγμένο. Αποκλίσεις μεταξύ της θεωρητικής και εμπειρικής βάσης του δείκτη αξιολόγησης θα πρέπει να φαίνονται ξεκάθαρα, και όχι να αποκρύπτονται από τη μορφή του δείκτη. Επιπλέον, προκειμένου να διευκολυνθεί η διεθνής σύγκριση μελετών αξιολόγησης λειτουργίας, οι δείκτες που προτείνονται θα πρέπει να είναι όμοιοι ή όσο το δυνατόν ανάλογοι ως προς τη μορφή τους (ICID, 1978; Bos and Nugteren, 1990; Wolters, 1992).

Δυνατότητα ποσοτικοποίησης (The indicator must be quantifiable):

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την ποσοτικοποίηση του δείκτη πρέπει να είναι διαθέσιμα ή να μπορούν να αποκτηθούν (ή να μετρηθούν) με τη διαθέσιμη τεχνολογία. Η μέτρηση θα πρέπει να μπορεί να επαναλαμβάνεται.

Αναφορά σε μια τιμή στόχο ή μια κρίσιμη τιμή (Reference to a critical or intended value):

Αυτό σημαίνει ότι για το δείκτη αυτό μπορεί να οριστεί το εύρος των τιμών που λαμβάνει ο δείκτης, η κρίσιμη και η ιδανική τιμή του καθώς και ανοχή αυτών.

Να προσφέρει αμερόληπτη πληροφορία (Provide information without bias):

Ιδανικά, ένας δείκτης αξιολόγησης θα πρέπει να διατυπώνεται εντός ενός ευρύτερου πλαισίου ώστε να είναι όσο γίνεται αντικειμενικός και να αποφεύγονται μεροληπτικά λάθη.

Να δίνει πληροφορίες για αντιστρέψιμες και διαχειρίσιμες διαδικασίες (Provide information on reversible and manageable processes):

Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κυρίως για τους διαχειριστές του δικτύου αφού τους επιτρέπει να αξιολογούν διάφορα σενάρια για τη διαχείριση του έργου. Ωστόσο, στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι κάποιες «μη αναστρέψιμες» διαδικασίες μπορούν εξίσου να προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες, αλλά η χρήση τους για τη δημιουργία δεικτών αξιολόγησης μπορούν να έχουν μόνο προγνωστικό χαρακτήρα. Για παράδειγμα, η συχνότητα και το ύψος της βροχόπτωσης δεν αποτελούν ένα διαχειρίσιμο μέγεθος, αλλά η πληροφορία που μπορούμε να αντλήσουμε από μια μεγάλη χρονοσειρά δεδομένων θα βοηθήσει τους διαχειριστές του δικτύου να αποφύγουν ελλείψεις νερού σε συγκεκριμένες περιόδους.

Η φύση του δείκτη (Nature of the indicator):

Η ίδια η φύση του δείκτη αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την επιλογή του. Ένας δείκτης μπορεί να περιγράψει μια συγκεκριμένη δραστηριότητα ή ένα σύνολο δραστηριοτήτων. Οι δείκτες αξιολόγησης ιδανικά παρέχουν πληροφορία για μια συγκεκριμένη δραστηριότητα για την οποία η τιμή του δείκτη μπορεί να συγκριθεί με μια τιμή στόχο ή με μια κατώτατη τιμή. Τέτοιοι δείκτες μπορούν να συνδυαστούν και να δημιουργήσουν ένα γενικότερο, συγκεντρωτικό δείκτη.

Ευκολία στη χρήση και στην κατανόηση των αποτελεσμάτων και αποδοτικότητα σε σχέση με το κόστος τους (Ease of use and understanding, cost effectiveness):

Για διαχειριστικά ζητήματα που άπτονται της καθημερινής διαχείρισης των δικτύων, οι δείκτες αξιολόγησης που υιοθετούνται θα πρέπει να μπορούν να προσδιοριστούν με ευκολία και να αξιολογηθούν με σαφήνεια από το προσωπικό που διαχειρίζεται αυτά τα έργα. Επιπλέον, το κόστος για τον προσδιορισμό και τη χρήση των δεικτών που υιοθετούνται θα πρέπει να είναι εντός των οικονομικών δυνατοτήτων του συγκεκριμένου δικτύου.

Ο Garcés (1983) συγκεντρώνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας δείκτης αξιολόγησης (Bos *et al.*, 2004). Έτσι, ένας δείκτης αξιολόγησης πρέπει να μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, για τη δημιουργία του να απαιτούνται δεδομένα που μπορούν να συλλεχθούν σε συστηματική βάση από τους διαχειριστές του δικτύου, να είναι αρκετά ευσταθής (robust) ώστε να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σε διάφορες

χρονικές περιόδους, και τέλος να μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους τύπους συστημάτων (Rao, 1993).

2.3.4 Ανασκόπηση των εξελίξεων στο χώρο των δεικτών αξιολόγησης της άρδευσης

Για να αξιολογηθεί και να περιγραφεί η λειτουργία των αρδευτικών έργων στο σύνολό της απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός δεικτών αξιολόγησης προκειμένου να καλυφθούν όλα τα επίπεδα λειτουργίας και διαχείρισης του έργου. Ο Levine (1982) κάνει μια λεπτομερή περιγραφή του όρου «σχετική παροχή νερού» (Relative water supply-RWS) την οποία ορίζει ως το λόγο του παρεχόμενου όγκου νερού προς το ζητούμενο όγκο νερού. Τόσο ο διαθέσιμος όγκος νερού όσο και οι απαιτούμενες ποσότητες νερού αποτελούν τους βασικότερους παράγοντες για το σχεδιασμό και τη λειτουργία των αρδευτικών συστημάτων, ωστόσο από μόνοι τους οι όροι αυτοί δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση της αποδοτικότητας των αρδευτικών συστημάτων. Εάν όμως συνδυαστούν προσφέρουν πολύτιμη πληροφορία για τη λειτουργία των συστημάτων αυτών. Ο Levine (1982) επισημαίνει ότι ο αντίστροφος λόγος της σχετικής παροχής νερού (RWS), είναι ο δείκτης «αποδοτικότητας χρήσης νερού» (Water Use Efficiency-WUE).

Άλλοι ερευνητές κάνουν εκτενή χρήση αδιάστατων δεικτών αξιολόγησης, όπως ο Garcés (1983) ο οποίος διακρίνει το αρδευτικό σύστημα σε τέσσερις συνιστώσες ως εξής: νερό, άνθρωπος, περιβάλλον και οικονομία. Για την αξιολόγηση κάθε μίας από αυτές τις συνιστώσες προτείνει τη χρήση διαφορετικών δεικτών. Συγκεκριμένα, για τη συνιστώσα νερό ορίζει τρεις δείκτες αξιολόγησης: την παραγωγικότητα (productiveness), την ευθυδικία (equity), και την απόδοση (efficiency). Για τη συνιστώσα άνθρωπος προτείνει τη χρήση ενός δείκτη, τον οποίο ονομάζει απόκριση (response). Με τον όρο «απόκριση» προσδιορίζεται η ικανότητα της συνιστώσας να αποκρίνεται στις δυναμικές διεργασίες που αφορούν τη λήψη αποφάσεων και κατά συνέπεια η ικανότητα της συνιστώσας αυτής να υλοποιεί ένα σύνολο αποφάσεων που θα οδηγήσουν στη βελτίωση της λειτουργικής κατάστασης του αρδευτικού συστήματος. Για την αξιολόγηση της συνιστώσας «περιβάλλον», προτείνεται η χρήση δεικτών που προσδιορίζουν τις συνέπειες που έχουν στο περιβάλλον οι αρδευτικές πρακτικές που υιοθετούνται. Τέλος,

για τη συνιστώσα «οικονομία» προτείνει τη χρήση του δείκτη «κάλυψη του κόστους» (cost recovery).

Οι Merriam et al. (1983) προτείνουν μεθόδους για την αξιολόγηση των αρδευτικών συστημάτων και των πρακτικών άρδευσης, ενώ οι Malhotra et al. (1984) προτείνουν μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση μεγάλων αρδευτικών συστημάτων χρησιμοποιώντας σαν case study ένα μεγάλο αρδευτικό σύστημα στη βορειοδυτική Ινδία. Στη μεθοδολογία αυτή βασίστηκαν οι Seckler et al. (1988) οι οποίοι προτείνουν ένα δείκτη για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας σε επίπεδο διαχείρισης του δικτύου. Οι κανόνες στους οποίους στηρίζονται για τον ορισμό του δείκτη είναι αυτοί που περιγράφονται στη συνέχεια:

- Τα «θετικά» σφάλματα, δηλαδή μεγαλύτερη παροχέτευση νερού από την απαιτούμενη, εξετάζονται όμοια με τα «αρνητικά» σφάλματα (μικρότερη παροχέτευση νερού από την απαιτούμενη).
- Τα μεγάλα σφάλματα (είτε θετικά, είτε αρνητικά) έχουν μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας από τα μικρότερα σφάλματα.
- Ο δείκτης που προτείνεται πρέπει να δίνεται με τη μορφή ποσοστού, για να είναι περισσότερο εύληπτος
- Για τον προσδιορισμό του δείκτη καλό θα ήταν οι επιμέρους παράμετροι να μπορούν να εκτιμηθούν στο χωράφι από το προσωπικό που ασχολείται με τη διαχείριση του έργου

Ο Lenton (1984) προσδιορίζει το δείκτη απόδοσης της διανομής νερού ενός συστήματος (water delivery performance-WDP). Για να προσδιορίσει το δείκτη αυτό ξεκινά προσεγγίζοντας το δείκτη σε επίπεδο αγροτεμαχίου και τελικά καταλήγει να εφαρμόζει το δείκτη σε ολόκληρο το αρδευτικό σύστημα. Η μαθηματική σχέση που προσδιορίζει τον παραπάνω δείκτη είναι:

$$WDP_i = \sum_{t=1}^n \frac{K(t)V_i(t)}{V_i^*(t)} \quad (2.13)$$

Όπου

$V_i(t)$: Ο όγκος του νερού που διανέμεται στο αγροτεμάχιο i κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου t της καλλιεργητικής περιόδου.

$V_i(t)$: Ο όγκος του νερού που θα έπρεπε να διανέμεται στο αγροτεμάχιο i κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου t της καλλιεργητικής περιόδου, βάσει των αρδευτικών αναγκών της καλλιέργειας και των υφιστάμενων συνθηκών του περιβάλλοντος (τύπος εδάφους, βροχόπτωση, κ.α).

$K(t)$: Συντελεστής βαρύτητας που δείχνει τη σημασία της άρδευσης στα διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Στη συνέχεια και προκειμένου να ενσωματώσει στον παραπάνω δείκτη τις αρνητικές συνέπειες της υπεράρδευσης, πρότεινε την παρακάτω παραλλαγή του δείκτη:

$$WDP_i = \sum_{t=1}^n \varepsilon_i(t) \quad (2.14)$$

όπου

$$\varepsilon_i(t) = \frac{K(t)V_i(t)}{V_i(t)}, \text{ εφ' όσον } V_i(t) \leq V_i(t) \quad \text{και}$$

$$\varepsilon_i(t) = \frac{K(t)V_i(t)}{V_i(t)}, \text{ εφ' όσον } V_i(t) > V_i(t)$$

Ο Plusquellec (1989, 1990) έχει ασχοληθεί με την αξιολόγηση μεγάλων αρδευτικών συστημάτων που λειτουργούν με τη βαρύτητα. Διάφοροι δείκτες αξιολόγησης εφαρμόζονται σε έξι διαφορετικές χώρες με διαφορετικές κλιματικές και κοινωνικο-οικονομικές συνθήκες.

Οι Clemmens και Bos (1990) διακρίνουν δύο συνιστώσες της λειτουργικής επάρκειας ενός αρδευτικού έργου. Την απόδοση του προγράμματος διανομής και την απόδοση της λειτουργίας του δικτύου. Ο λόγος των πραγματικών προς τις επιδιωκόμενες ποσότητες (παροχής, πίεσης, κλπ) περιγράφουν κατά πόσο ο τρόπος διαχείρισης του έργου και οι υφιστάμενες υποδομές είναι σε θέση να διανείμουν αξιόπιστα το αρδευτικό νερό. Ο λόγος των επιδιωκόμενων τιμών προς αυτές που απαιτούνται σε επίπεδο αγροτεμαχίου χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του προγράμματος διανομής. Τέλος το προϊόν αυτών των δύο λόγων είναι ένα μέτρο αξιολόγησης της συνολικής λειτουργικής απόδοσης του αρδευτικού έργου. Στο πλαίσιο αυτών των συνιστωσών περιγράφουν τα δεδομένα που πρέπει να συλλέγονται για την αξιολόγηση της απόδοσης των δικτύων, τις στατιστικές μεθόδους για την ανάλυση των δεδομένων αυτών και τέλος τον τρόπο με τον

οποίο πρέπει να «μεταφράζονται» τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Οι δείκτες αξιολόγησης που προτείνονται έχουν σαν στόχο την ανάδειξη των δυνατών και αδύνατων σημείων στη λειτουργία του έργου και κατά συνέπεια λειτουργούν σαν ένας τρόπος εκτίμησης της ποιότητας της λειτουργίας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Τα τμήματα του δικτύου που εμφανίζουν χαμηλή λειτουργική απόδοση είναι προφανώς αυτά για τα οποία θα πρέπει να γίνουν αλλαγές προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση της λειτουργίας τους.

Οι Molden και Gates (1990) αναπτύσσουν δείκτες αξιολόγησης της λειτουργίας αρδευτικών συστημάτων προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό νέων συστημάτων ή για τον εκσυγχρονισμό υφιστάμενων αρδευτικών δικτύων. Προκειμένου να ορίσουν τους κατάλληλους δείκτες, ξεκινούν από τον προσδιορισμό των στόχων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαχείριση των αρδευτικών δικτύων διανομής νερού. Συγκεκριμένα, ορίζονται τέσσερα κριτήρια όπως περιγράφονται στη συνέχεια:

- **Επάρκεια (Adequacy):** Βασικός στόχος ενός αρδευτικού συστήματος είναι να διανείμει τις απαιτούμενες ποσότητες νερού προκειμένου να αρδευτούν με επάρκεια οι καλλιέργειες. Η ποσότητα νερού που απαιτείται είναι συνάρτηση των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών, της έκτασης που αρδεύεται, των γεωργικών πρακτικών, των υδραυλικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται, των απωλειών νερού κατά την εφαρμογή, τη μεταφορά και τη διανομή, και άλλων παραγόντων.
- **Αποδοτικότητα (Efficiency):** Η σωστή χρήση των υδατικών πόρων για άρδευση, οδηγεί σε μείωση του κόστους για αρδευτικές υποδομές, ενώ η εξοικονόμηση νερού έχει σαν συνέπεια να υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο νερό για την κάλυψη των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Η αποδοτικότητα στη μεταφορά του αρδευτικού νερού για παράδειγμα, περιγράφει την ποσότητα του νερού που χάνεται κατά τη μεταφορά του.
- **Αξιοπιστία (Dependability):** Αξιοπιστία του δικτύου επιτυγχάνεται όταν υπάρχει χρονική ομοιομορφία στο λόγο της ποσότητας του νερού που μεταφέρεται προς αυτή που απαιτείται. Βάσει αυτού του κριτηρίου, ένα αρδευτικό σύστημα που λειτουργεί με συνέπεια, θεωρείται και αξιόπιστο. Έτσι, ένα αρδευτικό σύστημα που συστηματικά διανέμει ποσότητες νερού μικρότερες από τις απαιτούμενες, είναι περισσότερο επιθυμητό από ένα σύστημα που κατά μέσο όρο διανέμει τις απαραίτητες ποσότητες νερού αλλά με μη προβλέψιμο τρόπο. Στην πράξη, ο

χρήστης μπορεί πιο εύκολα να προγραμματίσει τις εργασίες του εντός ενός αρδευτικού συστήματος που παρουσιάζει μια συστηματική και προβλέψιμη συμπεριφορά.

- Δικαιοσύνη (Equity): Με τον όρο αυτό ορίζεται η διανομή του νερού με δίκαιο τρόπο σε όλους τους χρήστες του συστήματος. Ο στόχος αυτός εμφανίζει σημαντικές δυσκολίες στην ποσοτικοποίησή του, καθώς μεταφράζεται συνήθως υποκειμενικά ανάλογα με την προσέγγιση που ακολουθείται. Ο όρος δικαιοσύνη, ορίζεται ως η χωρική ομοιομορφία του λόγου της μεταφερόμενης ποσότητας νερού προς αυτή που απαιτείται.

Με βάση τους παραπάνω τέσσερις στόχους, οι Molden και Gates (1990) προσδιορίζουν ένα σύνολο δεικτών προκειμένου να περιγράψουν και να ποσοτικοποιήσουν τους παραπάνω στόχους.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι δείκτες για την αρδευτική αποδοτικότητα έχουν προταθεί από τους Bos και Nugteren (1990). Το σύνολο των δεικτών που προτάθηκαν αποτελούν το αποτέλεσμα μια κοινής προσπάθειας τριών φορέων, του ICID (International Commission on Irrigation and Drainage, του Πανεπιστημίου του Wageningen και του ILRI (International Institute for Land Reclamation and Improvement). Οι Bos και Nugteren διαχωρίζουν τη συνολική αποδοτικότητα ενός αρδευτικού έργου σε συνιστώσες και στη συνέχεια περιγράφουν την αποδοτικότητα των διαφορετικών τμημάτων του συστήματος διανομής νερού. Διακρίνουν λοιπόν τρεις συνιστώσες του συστήματος διανομής νερού, τη μεταφορά, τη διανομή και την εφαρμογή του νερού στο χωράφι. Σ' αυτό το πλαίσιο, ορίζουν διάφορους δείκτες όπως για παράδειγμα την αποδοτικότητα στη μεταφορά (e_c), στη διανομή (e_d) και στην εφαρμογή του νερού στο χωράφι (e_a). Παρουσιάζουν επίσης συνδυαστικούς δείκτες όπως είναι η τριτεύουσα αποδοτικότητα (tertiary unit efficiency) που αποτελεί ένα συνδυασμό της αποδοτικότητας διανομής και εφαρμογής του νερού, την αποδοτικότητα του αρδευτικού δικτύου που αποτελεί συνδυασμό της αποδοτικότητας μεταφοράς και διανομής και τέλος τη συνολική αποδοτικότητα του αρδευτικού έργου (overall project efficiency) ο οποίος περιγράφει τη συνολική απόδοση του συστήματος από την πηγή του νερού μέχρι τη ζώνη των καλλιεργειών.

Ο Rao (1993) συγκέντρωσε ένα μεγάλο αριθμό δεικτών αξιολόγησης που αφορούν την ποιότητα των υπηρεσιών άρδευσης που προσφέρονται από τους διαχειριστές των συστημάτων διανομής, την ίδια τη γεωργική παραγωγή που είναι και το τελικό προϊόν

της αρδευόμενης γεωργίας και σε κάποιο βαθμό τις συνέπειες στο ευρύτερο γεωργο-οικονομικό πλαίσιο. Για την παρουσίαση των δεικτών αξιολόγησης, χρησιμοποίησε το πλαίσιο των εμπειροχόμενων συστημάτων που προτάθηκε από τους Small και Svendsen (1992).

Ο Bos (1997) προτείνει ένα σύνολο 40 δεικτών αξιολόγησης οι οποίοι καλύπτουν τη διανομή του αρδευτικού νερού, την απόδοση στην εφαρμογή του νερού, τη συντήρηση, τη βιωσιμότητα της άρδευσης, περιβαλλοντικές και σοσιο-οικονομικές πτυχές της άρδευσης, και τέλος τη διαχείριση των αρδευτικών δικτύων. Προτείνεται η χρήση μέρους των δεικτών αξιολόγησης που περιγράφονται ανάλογα με τις ανάγκες της αξιολόγησης. Ο αριθμός των δεικτών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από το επίπεδο της λεπτομέρειας που επιδιώκεται καθώς επίσης και τον αριθμό των παραγόντων που τίθενται προς αξιολόγηση (πχ. υδατικό ισοζύγιο, περιβάλλον, διαχείριση, κα).

Οι Molden et al. (1998) προτείνουν εννέα δείκτες αξιολόγησης των αρδευτικών συστημάτων. Οι δείκτες στους οποίους καταλήγουν απαιτούν περιορισμένο όγκο δεδομένων, τα οποία είναι συνήθως άμεσα διαθέσιμα και μπορούν να αναλυθούν με ευκολία. Εφαρμόζουν τους δείκτες που προτείνουν σε 18 αρδευτικά συστήματα και τα αποτελέσματα δείχνουν μεγάλη ετερογένεια στην αξιοπιστία των συστημάτων αυτών. Οι δείκτες που προτείνουν στοχεύουν στην ανάδειξη των τάσεων εντός ενός αρδευτικού συστήματος, ώστε να προκύψουν τα τμήματα του έργου που χρειάζονται περαιτέρω ανάλυση.

Αργότερα, οι Clemmens και Molden (2007) ασχολήθηκαν με την ομοιομορφία στην άρδευση και εξέτασαν την αλληλοσυσχέτιση μεταξύ ομοιομορφίας σε επίπεδο αρδευτικού έργου και νερού που παροχετεύεται σε επίπεδο αγροτεμαχίου καθώς επίσης και με τη συνδυασμένη επίδραση αυτών στην παραγωγικότητα του έργου. Για να το κάνουν αυτό διακρίνουν δύο προσεγγίσεις στην αξιολόγηση της λειτουργίας ενός έργου, η πρώτη απαντά στο ερώτημα πόσο καλά γίνεται η μεταφορά του νερού ενώ η δεύτερη ασχολείται με τα αποτελέσματα της άρδευσης σε ότι αφορά την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα των υδατικών πόρων. Αυτές τις δύο συνιστώσες τις αναφέρουν ως εσωτερική και εξωτερική λειτουργία αντίστοιχα. Επιπλέον, η πρώτη συνιστώσα, αυτή της μεταφοράς νερού αντιμετωπίζεται με τους όρους που προσδιορίζουν την επάρκεια, τη δικαιοσύνη στη διανομή του νερού και την αξιοπιστία των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η

δεύτερη συνιστώσα ασχολείται με την ποσότητα της παραγωγής από μια έκταση ανάλογα με τις εισροές νερού στο τμήμα αυτό.

Οι Urrestarazu et al (2009) προτείνουν μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών σε ένα αρδευτικό σύστημα διανομής νερού. Η μεθοδολογία αυτή στηρίζεται σε ένα σύνολο δεικτών που έχουν αναπτύξει βασιζόμενοι σε δείκτες που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση υδρευτικών δικτύων και διακρίνονται σε αυτούς που περιγράφουν το ίδιο το δίκτυο και σε αυτούς που περιγράφουν τη λειτουργία του δικτύου. Οι δείκτες αυτοί υπολογίζονται περιοδικά ή σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, χρησιμοποιούν τη μεθοδολογία αυτή σε ένα αρδευτικό δίκτυο της Ισπανίας.

2.3.5 Η έννοια της αξιοπιστίας (reliability)

Η αξιοπιστία ενός συστήματος είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει την απόδοση των γεωργικών δραστηριοτήτων. Η έννοια της αξιοπιστίας κατά τον Rao (1993) σηματοδοτεί το βαθμό στον οποίο ένα σύστημα ικανοποιεί τις προκαθορισμένες προσδοκίες των χρηστών του.

Ως αξιοπιστία ορίζεται η πιθανότητα ενός συστήματος ή μιας συνιστώσας να φέρει εις πέρας μια συγκεκριμένη λειτουργία για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο όταν χρησιμοποιείται σε προκαθορισμένες λειτουργικές καταστάσεις (Ebeling, 1997). Για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας οι Burnham et al. (1997) δίνουν έναν ευρύτερο ορισμό προκειμένου να συμπεριλάβουν και το χρήστη του εξεταζόμενου συστήματος. Έτσι, γι' αυτούς η αξιοπιστία είναι ένα μέτρο που δείχνει εάν η πραγματική λειτουργία του συστήματος πλησιάζει την αναμενόμενη λειτουργία. Η αναμενόμενη λειτουργία μπορεί να είναι είτε η πραγματικά αναμενόμενη (από τεχνικής άποψης) είτε η αντιληπτά αναμενόμενη, οπότε εστιάζουμε στο πώς οι χρήστες αντιλαμβάνονται τη λειτουργία του συστήματος. Είναι φανερό ότι η ποσοτικοποίηση αυτού του μεγέθους είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Οι Hashimoto et al (1982a, b) χρησιμοποιούν τρεις στατιστικούς δείκτες για να περιγράψουν τη λειτουργική απόδοση ενός συστήματος. Οι δείκτες που χρησιμοποιούν είναι ο δείκτης αξιοπιστίας (reliability indicator), ο δείκτης ελαστικότητας του συστήματος (resilience indicator) και ο δείκτης ευαισθησίας του συστήματος (vulnerability indicator). Οι προαναφερθέντες δείκτες χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της λειτουργίας ενός

συστήματος δεξαμενών τροφοδοσίας σε διάφορα σενάρια υδατικών απαιτήσεων. Ο δείκτης αξιοπιστίας (reliability indicator) μετρά πόσο συχνά ένα σύστημα αποτυγχάνει, ο δείκτης ελαστικότητας του συστήματος (resilience indicator) δίνει μια ένδειξη σχετικά με το πόσο γρήγορα το σύστημα ανακάμπτει από μια αποτυχία και ο δείκτης ευαισθησίας του συστήματος (vulnerability indicator) μετρά την έκταση της αστοχίας του συστήματος.

Η χρονοσειρά X_t των τιμών που προσομοιώνονται για μια παράμετρο του συστήματος, αξιολογείται σε μια μελλοντική στιγμή T . Τότε το εξεταζόμενο σύστημα θα χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο τιμών S (satisfactory) που αντιπροσωπεύουν την επιτυχία του συστήματος και ένα σύνολο τιμών U (unsatisfactory) που αντιπροσωπεύουν την αποτυχία του συστήματος. Έστω C το κριτήριο που θα καθορίσει πότε μία τιμή θα συμπεριληφθεί στο σύνολο S ή στο σύνολο U , τότε:

$$\begin{array}{llll} \text{Εάν } & X_t \geq C & \text{τότε } & X_t \in S & \text{και } & Z_t = 1 \\ & X_t < C & \text{τότε } & X_t \in U & \text{και } & Z_t = 0 \end{array}$$

Ορίζεται επίσης ο δείκτης W_t , που δείχνει τη μετακίνηση από το σύνολο U στο σύνολο S , δηλαδή τη μετακίνηση από το σύνολο των καταστάσεων κατά τις οποίες το σύστημα αποτυγχάνει στο σύνολο των καταστάσεων κατά τις οποίες επιτυγχάνει.

$$W_t = \begin{cases} 1, & \text{εάν } X_t \in U \text{ και } X_{t+1} \in S \\ 0, & \text{εάν } X_t \in S \text{ και } X_{t+1} \in U \end{cases}$$

Τέλος εάν ορίσουμε κάθε περίοδο αστοχίας X_t του συστήματος ως J_1, J_2, \dots, J_N μπορούμε να ορίσουμε τους τρεις δείκτες (reliability, resilience, και vulnerability) ως εξής:

Δείκτης αξιοπιστίας (Reliability indicator):

$$C_R = \frac{\sum_{t=1}^T Z_t}{T} \quad (2.15)$$

Η αξιοπιστία ενός συστήματος είναι η πιθανότητα μη αστοχίας ενός συστήματος για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Αν και η αξιοπιστία του συστήματος είναι μια έννοια που χρησιμοποιείται ευρέως στη διαχείριση των υδατικών πόρων, δεν περιγράφει την έκταση ή τις ενδεχόμενες συνέπειες αυτής της αστοχίας (Jain and Bhunya, 2008). Η σοβαρότητα της αστοχίας περιγράφεται από τους παρακάτω δείκτες.

Δείκτης ελαστικότητας του συστήματος (resilience indicator):

$$C_{RS} = \frac{\sum_{t=1}^T W_t}{T - \sum_{t=1}^T Z_t} \quad (2.16)$$

Σύμφωνα με τους Moy et al. (1986), ο δείκτης ελαστικότητας του συστήματος ορίζεται ως η μέγιστη διάρκεια κατά την οποία το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση αστοχίας.

Δείκτης ευαισθησίας του συστήματος (vulnerability indicator):

$$C_V = \max \left\{ \sum_{t \in J_i} C - X_t, \quad i = 1, \dots, N \right\} \quad (2.17)$$

Ο παραπάνω δείκτης είναι ένα μέτρο της προκαλούμενης ζημιάς μιας αστοχίας και περιγράφει την έκταση της αστοχίας. Ο δείκτης αυτός περιγράφεται και ως βιωσιμότητα (survivability) του συστήματος (Jain and Bhunya, 2008).

Οι Burt και Plusquellec (1990) προκειμένου να τονίσουν τη σημασία της αξιοπιστίας στη μεταφορά του αρδευτικού νερού, παραλληλίζουν τη λειτουργία ενός μη αξιόπιστου συστήματος με τη βροχόπτωση η οποία εμφανίζεται ακανόνιστα και δε μπορεί να ελεγχθεί από τους χρήστες.

Οι Clemmens και Bos (1990) αναφέρουν τον όρο «αξιοπιστία» τον οποίο ορίζουν ως τη χρονική διακύμανση στην παροχή του νερού για κάποια περιοχή. Σύμφωνα με τους Renault και Vehmeyer (1999) ο όρος «αξιοπιστία» εμφανίζεται στην εργασία των Molden και Gates (1990) ως “dependability” και ορίζεται για μια περιοχή R ως η διακύμανση στο χρόνο του λόγου της ποσότητας του νερού που μεταφέρεται (Q_d) προς την ποσότητα του νερού που απαιτείται (Q_R):

$$P_D = \frac{1}{R} \sum_R CV_T \left(\frac{Q_d}{Q_R} \right) \quad (2.18)$$

Όπου $CV_T \left(\frac{Q_d}{Q_R} \right)$ είναι ο χρονικός συντελεστής της διακύμανσης του πηλίκου $\frac{Q_d}{Q_R}$ (ο λόγος της τυπικής απόκλισης του πηλίκου $\frac{Q_d}{Q_R}$ προς τον αριθμητικό μέσο του πηλίκου $\frac{Q_d}{Q_R}$) κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου T.

Ένας ακόμα δείκτης αξιοπιστίας προσδιορίζεται από τους Makin et al. (1991) οι οποίοι διακρίνουν τις παρατηρούμενες ροές αρδευτικού νερού σε δύο κατηγορίες βάσει μιας τιμής στόχου που θεωρείται προκαθορισμένη. Έτσι όταν η παρατηρούμενη παροχή απέχει λιγότερο από 10% από την τιμή στόχο, θεωρείται επιτυχής, ενώ στην αντίθετη περίπτωση θεωρείται αποτυχημένη.

Οι Bos et al (1994) ορίζουν επίσης τον όρο “dependability”, αλλά με διαφορετικό τρόπο από αυτόν που χρησιμοποιούν οι Molden και Gates (1990). Έτσι ορίζουν δύο δείκτες όπως περιγράφονται στη συνέχεια:

$$\text{Dependability of irrigation interval} = \frac{\text{Πραγματική διάρκεια για τη μεταφορά του νερού}}{\text{Επιθυμητή διάρκεια για τη μεταφορά του νερού}} \quad (2.19)$$

και

$$\text{Dependability of irrigation interval} = \frac{\text{Πραγματική διάρκεια άρδευσης}}{\text{Επιθυμητή διάρκεια άρδευσης}} \quad (2.20)$$

Παρόλο που οι παραπάνω δείκτες αναφέρονται στην αξιολόγηση ενός γεγονότος, θα μπορούσαν να τροποποιηθούν κατάλληλα προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για ένα σύνολο γεγονότων ή για μια ολόκληρη χρονική περίοδο (Renault και Vehmeyer, 1999).

Πιο πρόσφατα, οι Yannopoulos and Spiliotis (2012) αναπτύσσουν μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος διανομής νερού (minimum cut-set approach). Στη μεθοδολογία αυτή, το διαθέσιμο φορτίο πίεσης στον κόμβο αντιμετωπίζεται ως ένα ασαφές σύνολο.

2.3.6 Επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός δείκτη αξιολόγησης για την ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου

Μέχρι σήμερα ο δείκτης που χρησιμοποιείται κυρίως στην ανάλυση λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων σε επίπεδο υδροστομίου είναι ο δείκτης αξιοπιστίας

του Hashimoto που περιγράφηκε παραπάνω. Ο δείκτης αυτός είναι εύκολος στη χρήση και δίνει εύληπτα αποτελέσματα, ωστόσο αδυνατεί να αναδείξει το εύρος της επιτυχίας ή αποτυχίας ενός υδροστομίου, δηλ. την έκταση του ελλείμματος ή της περίσσειας φορτίου που εμφανίζει ένα υδροστόμιο. Στην πράξη, η πραγματική απόδοση ενός υδροστομίου προσδιορίζεται από άπειρο αριθμό καταστάσεων που κυμαίνονται από το απόλυτο έλλειμμα φορτίου έως την απόλυτη λειτουργική επάρκεια.

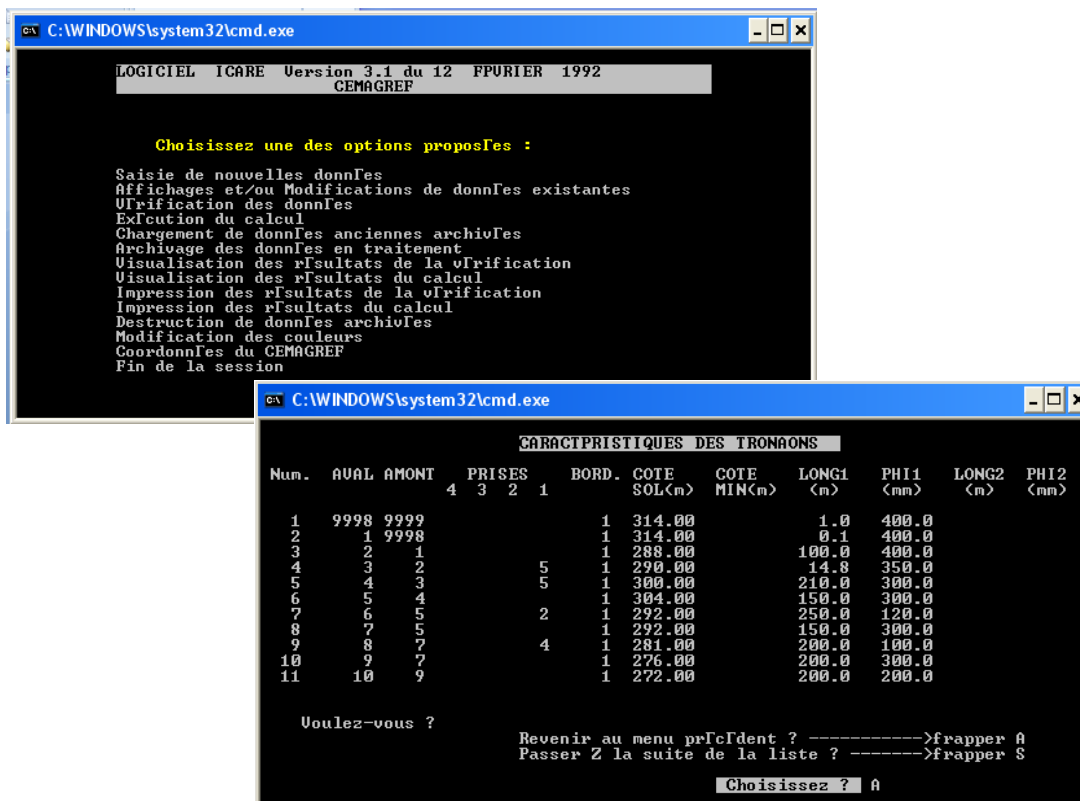
Ένας δείκτης αξιολόγησης της λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων σε επίπεδο υδροστομίου θα πρέπει να παρουσιάζει τα παρακάτω επιθυμητά χαρακτηριστικά:

1. Να είναι εύκολος στη χρήση
2. Να δίνει εύληπτα αποτελέσματα
3. Να παρουσιάζει το εύρος του ελλείμματος ή του πλεονάσματος φορτίου και
4. Να αναδεικνύει τις περιπτώσεις υδροστομίων που ενώ δεν αστοχούν, εμφανίζουν αυξημένη πιθανότητα αστοχίας.

2.4 Προγράμματα για την υδραυλική ανάλυση συλλογικών αρδευτικών δικτύων

Τα πιο διαδεδομένα προγράμματα Η/Υ που υλοποιούν ανάλυση λειτουργίας σε αρδευτικά δίκτυα υπό πίεση που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση είναι το ICARE και το COPAM. Το λογισμικό **ICARE** έχει αναπτυχθεί από το CEMAGREF (CTGREF, 1979; Bethery et al., 1981; Bethery, 1990). Το ICARE πραγματοποιεί υπολογισμό της ανώτερης χαρακτηριστικής καμπύλης και υπολογισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες. Επίσης υπολογίζει διάφορα είδη μόνιμων ροών (μόνιμη ροή που αντιστοιχεί σε ορισμένο ή σε τυχαίο συνδυασμό ανοιχτών υδροστομιών) και πραγματοποιεί την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου. Συγκεκριμένα, κάνει μια στατιστική ανάλυση στο σύνολο των προσομοιώσεων και προσδιορίζει ποια υδροστόμια λειτουργούν με διάφορα ποσοστά της ονομαστικής τους πίεσης.

Στην εικόνα 11 φαίνεται το περιβάλλον εργασίας του ICARE.



Εικόνα 11: Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού ICARE

Το λογισμικό ICARE είναι ένα εμπορικό πακέτο που λειτουργεί σε περιβάλλον MS-DOS και δεν παρουσιάζει ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον εργασίας. Η γλώσσα που χρησιμοποιείται στο περιβάλλον εργασίας του ICARE είναι τα γαλλικά, δίνει αναλυτικά raw data, αλλά παρουσιάζει προβλήματα συνεργασίας με τα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα με αποτέλεσμα να μην εμφανίζονται τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες.

Το πρόγραμμα **COPAM**-Combined Optimization and Performance Analysis Model (Lamaddalena and Sagardoy, 2000) έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Windows από τους FAO και CIHEAM-Bari Institute, και περιλαμβάνει γραφικό περιβάλλον. Το COPAM δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των παροχών, οικονομικής βελτιστοποίησης των διαμέτρων και ανάλυσης λειτουργίας τόσο σε επίπεδο δικτύου όσο και σε επίπεδο υδροστομίου. Συγκεκριμένα, υλοποιεί την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου με τη χρήση του μοντέλου AKLA (Lamaddalena, 1997; Lamaddalena and Sagardoy, 2000) το οποίο δίνει πληροφορίες για τα υδροστόμια που παρουσιάζουν ανεπάρκεια φορτίου πίεσης, το μέγεθος της ανεπάρκειας αυτής, το δείκτη αξιοπιστίας τους, όπως επίσης και το ποσοστό των υδροστομίων που παρουσιάζουν μειωμένο φορτίο πίεσης. Μετά την υλοποίηση της ανάλυσης, απεικονίζει γραφικά τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες του δικτύου υπό μελέτη, το σχετικό έλλειμμα – περίσσεια φορτίου πίεσης ($\Delta H_{j,r}$) και το δείκτη αξιοπιστίας για κάθε υδροστόμιο.

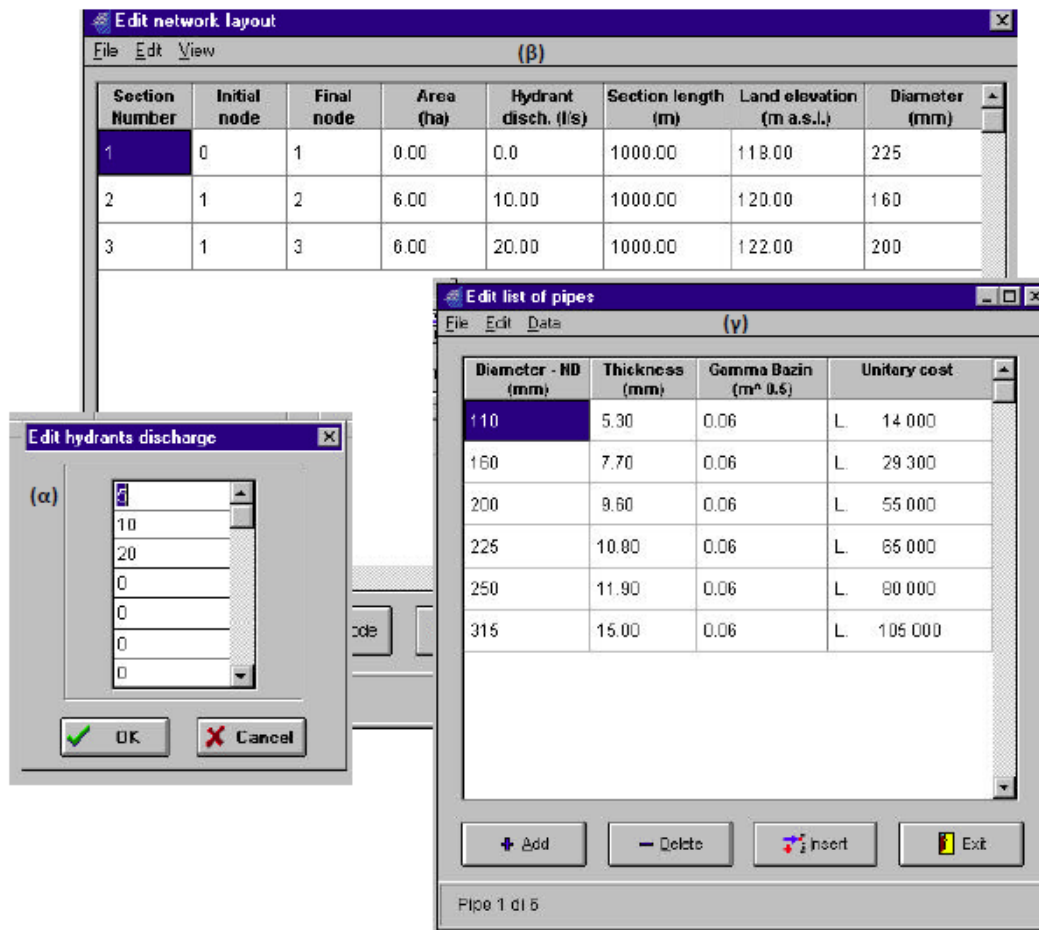
Συγκεντρωτικά, το COPAM υλοποιεί τις εξής εφαρμογές :

1. Υπολογισμός των παροχών σχεδιασμού με δύο μεθοδολογίες:
 - a. Clément (1ος και 2ος νόμος)
 - b. Random (τυχαίο άνοιγμα των υδροστομίων βάσει γεννήτριας τυχαίων αριθμών)
2. Βελτιστοποίηση των διαμέτρων των αγωγών.

Βελτιστοποίηση που γίνεται σύμφωνα με την ασυνεχή μέθοδο του LABYE.

3. Ανάλυση που γίνεται σε δύο επίπεδα :
 - a. Σε επίπεδο δικτύου
 - b. Σε επίπεδο υδροστομίου

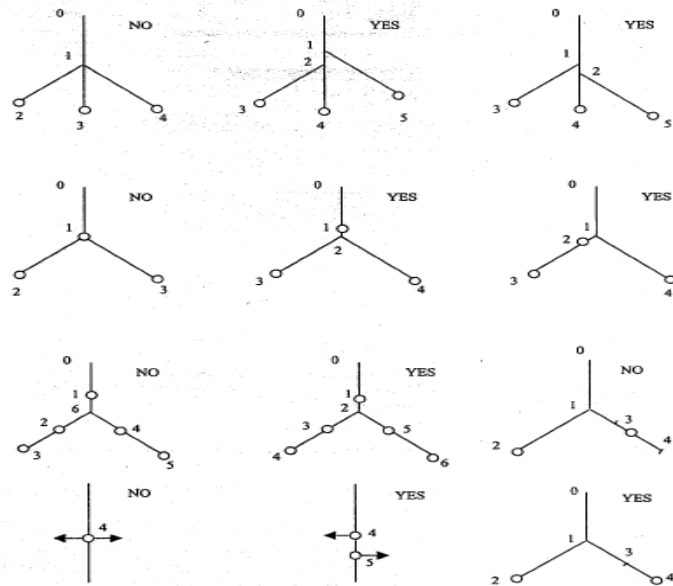
Στην εικόνα 12 φαίνεται παράδειγμα από την εισαγωγή παροχών, διαμέτρων και ολόκληρου του δικτύου στο COPAM.



Εικόνα 12: Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού COPAM

Το λογισμικό COPAM, απαιτεί συγκεκριμένο τρόπο αρίθμησης του δικτύου (ιδιαίτερα περίπλοκο) για να τρέξει το δίκτυο. Στην εικόνα 13 παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα με τους κανόνες αρίθμησης σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του COPAM. Στην πρώτη εικόνα φαίνεται ότι από ένα κατάντη κόμβο δεν μπορούν να ξεκινούν παραπάνω από δύο αγωγοί. Στην περίπτωση που υπάρχει στο δίκτυό μας τρίτος αγωγός θα πρέπει να προστεθεί ένας υποθετικός αγωγός και να συνδεθεί σ' αυτόν ο τρίτος αγωγός. Επίσης, δεν επιτρέπεται η ύπαρξη υδροστομίου κατάντη αγωγού απ' όπου ξεκινούν δύο αγωγοί. Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται και εδώ με την προσθήκη ενός υποθετικού αγωγού. Κάθε ακραίος κόμβος του δικτύου θα πρέπει να φέρει υδροστόμιο. Τέλος, κάθε υδροληψία μπορεί να φέρει μόνο ένα υδροστόμιο. Στην περίπτωση περισσότερων του ενός υδροστομίων θα πρέπει να προστίθονται υποθετικοί αγωγοί για κάθε επιπλέον υδροστόμιο.

Το λογισμικό παρουσιάζει συχνά δυσκολίες στο τρέξιμό του και μπλοκαρίσματα που πιθανώς να οφείλονται στο γεγονός ότι αφενός δεν γίνεται σωστή διαχείριση σφαλμάτων (error handling) γεγονός που δυσχεραίνει τη χρήση του και αφετέρου στο ότι δεν γίνεται επαρκής τεκμηρίωση στο εγχειρίδιο χρήσης του προκειμένου να αποφεύγονται τα λάθη στην εισαγωγή των δεδομένων. Τέλος, δεν δίνει αναλυτικά αποτελέσματα (raw data) παρά μόνο διαγράμματα, τα οποία ωστόσο ο χρήστης μπορεί να τα διαχειριστεί μόνο ως εικόνες.



Εικόνα 13: Παραδείγματα κανόνων αριθμησης σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του COPAM (Lamaddalena και Sagardoy, 2000)

Συνοψίζοντας, τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός μοντέλου για την ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών αρδευτικών δικτύων περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

1. Να συνοδεύεται από ένα λογισμικό με περιβάλλον εργασίας **φιλικό προς το χρήστη**
2. Να προσφέρει δυνατότητες **περαιτέρω ανάπτυξης**
3. Να προσφέρει τον πλήρη έλεγχο των λειτουργιών του και **πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα** που προκύπτουν από την ανάλυση
4. Να δίνει τη δυνατότητα να **ελέγξουμε ορισμένες παραμέτρους** που σχετίζονται με την αξιοπιστία της προσομοίωσης, κάτι που δεν έχουμε τη δυνατότητα να κάνουμε με έτοιμα πακέτα που είναι «**μαύρα κουτιά**»

2.5 Προσομοίωση και τυχαίοι αριθμοί

Για τη δημιουργία τυχαίων συνδυασμών ανοιχτών υδροστομίων, τα μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούν μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (Random Number Generator). Η γεννήτρια αυτή παράγει ανεξάρτητους τυχαίους αριθμούς οι οποίοι κατανέμονται συνεχώς και ομοιόμορφα μεταξύ 0 και 1. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η τυχειότητα που απαιτείται από ένα μοντέλο προσομοίωσης.

Ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης οι παραγόμενοι τυχαίοι αριθμοί μπορούν στη συνέχεια να μετατραπούν με τη βοήθεια διαφόρων μεθόδων σε τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες να ακολουθούν μια επιθυμητή κατανομή. Τυπικά παραδείγματα τυχαίων μεταβλητών είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών κλήσεων (interarrival time) σε ένα τηλεφωνικό κέντρο, ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι να συντελεστεί μια επεξεργασία (processing time), κα.

Η αξιοπιστία κάθε μοντέλου προσομοίωσης στηρίζεται σε σημαντικό βαθμό στην υπόθεση της ομοιομορφίας και ανεξαρτησίας των αριθμών που παράγονται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Η υπόθεση όμως αυτή είναι εν μέρει λανθασμένη (L'Ecuyer, 1998) καθώς οι γεννήτριες τυχαίων αριθμών είναι αιτιοκρατικά (deterministic) προγράμματα που προσπαθούν να «ξεγελάσουν» το χρήστη με μια αιτιοκρατική (deterministic) ακολουθία αριθμών που μοιάζει να είναι τυχαία. Έτσι, οι αριθμοί που παράγονται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών δεν είναι πραγματικά τυχαίοι, αλλά «ψευδοτυχαίοι».

Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες συσκευές που παράγουν τυχαίο θόρυβο (Good, 1969; L'Ecuyer, 1992a). Οι συσκευές αυτές περιλαμβάνουν μετρητές ακτινοβολίας γάμμα, δίοδους θορύβου, κα. Ωστόσο, είναι αρκετά δύσχρηστες και μπορεί να παράγουν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα, και πιο συγκεκριμένα ακολουθίες με σημαντική συσχέτιση μεταξύ των διαδοχικών παραγόμενων αριθμών. Ο Marsaglia (1996) εφάρμοσε μια συστοιχία από στατιστικά τεστ σε τρεις από τις παραπάνω εμπορικές συσκευές και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και οι τρεις αποτυγχάνουν και μάλιστα θεαματικά.

Σύμφωνα με τον L'Ecuyer (1998) ο πιο εύκολος και αξιόπιστος τρόπος για την παραγωγή τυχαίων αριθμών κατάλληλων για χρήση σε μοντέλα προσομοίωσης, είναι η χρήση αιτιοκρατικών αλγορίθμων με στέρεα μαθηματική βάση. Οι αλγόριθμοι αυτοί παράγουν μια ακολουθία τυχαίων αριθμών, οι οποίοι στην πραγματικότητα δεν είναι καθόλου τυχαίοι, αλλά φαίνεται να συμπεριφέρονται όπως οι ανεξάρτητοι τυχαίοι

αριθμοί. Μια τέτοια ακολουθία καλείται «ψευδοτυχαία» και το πρόγραμμα που την παράγει καλείται «γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών». Για λόγους απλοποίησης ωστόσο έχει υιοθετηθεί διεθνώς ο όρος «τυχαίος».

(Ψευδο)Τυχαίοι Αριθμοί και Γεννήτριες Τυχαίων Αριθμών

Η έννοια της «τυχειότητας» υπεισέρχεται σε πολλά επιστημονικά πεδία (Στατιστική, Θεωρία Πιθανοτήτων, Κρυπτογραφία, Θεωρία Παιγνίων, Κβαντομηχανική, Θεωρία του Χάους, κα). Πρέπει να τονιστεί ωστόσο ότι τα κριτήρια για την υιοθέτηση τυχαίων αριθμών είναι διαφορετικά στην κρυπτογραφία απ' ότι στην προσομοίωση.

Οι τυχαίοι αριθμοί είναι απαραίτητοι σε διάφορες εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται σε προσομοιώσεις φυσικών φαινομένων, στην αριθμητική ανάλυση, στον προγραμματισμό, στην κρυπτογραφία, στη λήψη αποφάσεων, σε στατιστικά πειράματα και γενικότερα σε περιπτώσεις όπου είναι χρήσιμο αλλά πρακτικά αδύνατο να δοκιμαστεί ένας μεγάλος αριθμός πιθανών καταστάσεων και είναι ανάγκη να γίνει προσομοίωση.

Το 1927 ο L. H. C. Tippett δημοσίευσε ένα πίνακα με 41.600 τυχαία ψηφία, τα οποία είχαν προέλθει «τυχαία από στοιχεία απογραφών» (Tippett, 1927). Το 1955 η RAND Corporation δημοσίευσε έναν ευρέως χρησιμοποιούμενο πίνακα ενός εκατομμυρίου τυχαίων ψηφίων (<http://www.rand.org>), ενώ ο G. Marsaglia (1996) παρουσίασε ένα CDROM (“The Marsaglia Random Number CDROM”) με 4.8 δισεκατομμύρια τυχαία bits, οργανωμένα σε 60 αρχεία των 10MB.

Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών δημιουργήθηκαν υπολογιστικές μέθοδοι για την παραγωγή τυχαίων αριθμών. Μια από τις πρώτες μεθόδους ήταν η λεγόμενη “middle-square method” που προτάθηκε από τον John Von Neumann το 1946. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ένας τυχαίος αριθμός παράγεται παίρνοντας τα μεσαία ψηφία του τετραγώνου του προηγούμενου αριθμού. Για παράδειγμα, εάν απαιτούνται δεκαψήφιοι τυχαίοι αριθμοί και έχει παραχθεί ο αριθμός 5772156649, ο επόμενος αριθμός είναι: $(5772156649)^2=33317792380594909201 \rightarrow 7923805949$ (Kernighan and Ritchie, 1990).

Μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών είναι ένα πρόγραμμα που παράγει έναν αριθμό κάθε φορά που καλείται. Ο αριθμός αυτός θεωρείται «τυχαίος» για ένα σημαντικό εύρος εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα, δεν μπορεί να προβλεφθεί και έχει την ίδια πιθανότητα

να επιλεγεί όπως και οποιοσδήποτε άλλος αριθμός μπορεί να παραχθεί από τη συγκεκριμένη γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

Σύμφωνα με τον **μαθηματικό ορισμό** που δίνεται από τον L'Ecuyer (1994), μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών έχει τη δομή $G = (S, S_0, T, U, G)$, όπου S είναι ένα πεπερασμένο σύνολο καταστάσεων, $S_0 \in S$ είναι η αρχική κατάσταση (initial state or seed), η απεικόνιση $T: S \rightarrow S$ είναι η μεταβατική συνάρτηση (transition function), U είναι ένα πεπερασμένο σύνολο συμβόλων εξόδου (output symbols), και $G: S \rightarrow U$ είναι η συνάρτηση εξόδου (output function).

Η κατάσταση μιας γεννήτριας είναι αρχικά S_0 και εξελίσσεται σύμφωνα με την επαναφορά $S_n = T(S_{n-1})$, για $n=1,2,3,\dots$. Στο βήμα n , η γεννήτρια παράγει ως αποτέλεσμα τον αριθμό $U_n = G(S_n)$. Τα $U_n, n \geq 0$ που προκύπτουν, είναι παρατηρήσεις και καλούνται τυχαίοι αριθμοί που παράγονται από τη γεννήτρια. Προφανώς, η ακολουθία των καταστάσεων S_n είναι τελικά περιοδική, αφού ο χώρος S των (πιθανών) καταστάσεων είναι πεπερασμένος. Πράγματι, η γεννήτρια πρέπει να επιστρέψει σε μια προηγούμενη κατάσταση. Δηλ. $S_j = S_i$ για κάποιο $j > i \geq 0$. Από εκεί και μετά, θα έχουμε $S_{j+n} = S_{i+n}$ και $U_{j+n} = U_{i+n}$ για όλα τα $n \geq 0$. Η **περίοδος της γεννήτριας** είναι ο μικρότερος ακέραιος $\rho > 0$, τέτοιος ώστε για κάποιο ακέραιο $r \geq 0$ και για όλους τους ακεραίους $n \geq r$, να ισχύει $S_{r+n} = S_n$. Ο μικρότερος ακέραιος r με αυτή την ιδιότητα καλείται transient. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μήκος της περιόδου δεν μπορεί να ξεπερνά το $|S|$, το σύνολο των στοιχείων του συνόλου των (πιθανών) καταστάσεων. Για τις καλές γεννήτριες τυχαίων αριθμών, το ρ πλησιάζει το $|S|$ (διαφορετικά έχουμε σπατάλη υπολογιστικής μνήμης).

Οι **επιθυμητές ιδιότητες των ψευδοτυχαίων αριθμών** φαίνονται στη συνέχεια (Ρούσκας Α., 2008):

1. Ομοιόμορφα κατανεμημένοι στο διάστημα $[0, 1]$
2. Στατιστικά ανεξάρτητοι: Οι αριθμοί που παράγονται δεν θα πρέπει να εμφανίζουν συσχετίσεις μεταξύ τους.
3. Επαναλήψιμοι, δηλαδή η ακολουθία να μπορεί να αναπαραχθεί: Η ικανότητα μιας γεννήτριας να επαναλάβει ακριβώς την ίδια σειρά τυχαίων αριθμών καλείται επαναληψιμότητα (repeatability) και είναι σημαντικό χαρακτηριστικό στην

περίπτωση που απαιτείται επαλήθευση μιας προσομοίωσης. Η επαναληψιμότητα είναι το κύριο πλεονέκτημα των ψευδοτυχαίων ακολουθιών σε σύγκριση με τις ακολουθίες τυχαίων αριθμών που προέρχονται από φυσικές πηγές. Φυσικά μια ακολουθία πραγματικά τυχαίων αριθμών μπορεί να αποθηκευτεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί όπου και όταν απαιτείται αλλά κάτι τέτοιο δυσχεραίνει τη διαδικασία. Το να μπορούμε να ξαναπάρουμε μια δεδομένη ακολουθία τυχαίων αριθμών, με την ίδια ακριβώς μορφή είναι σημαντικό για δύο κυρίως λόγους: Πρώτον, με τη χρήση της ίδιας ακολουθίας, μπορεί να γίνει ευκολότερη η επιβεβαίωση και η διόρθωση λαθών του προσομοιωτή και δεύτερον, με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει σύγκριση της προσομοίωσης διαφορετικών συστημάτων (Γαροφαλλάκης, 1999).

4. Ένας κώδικας που υλοποιεί μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών θεωρείται «φορητός» εάν μπορεί να λειτουργήσει και να παράγει ακριβώς τις ίδιες ακολουθίες αριθμών σε όλους τους τυπικούς compilers.
5. Η παραγωγή του να γίνεται με μια υπολογιστική μέθοδο και ανεξάρτητα από το hardware του Η/Υ
6. Γρήγορη διαδικασία παραγωγής: Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές η ταχύτητα μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών (αναφορες) δεν είναι και τόσο σημαντικό χαρακτηριστικό για μια προσομοίωση μιας και ο χρόνος που απαιτείται συνήθως για την παραγωγή των αριθμών είναι ένα πολύ μικρό κομμάτι του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Ωστόσο, το επιχείρημα αυτό καταρρίπτεται στην περίπτωση προσομοιώσεων που απαιτούν για την υλοποίησή τους ένα μεγάλο αριθμό παραγόμενων τυχαίων αριθμών. Επιπλέον, εάν το 5% του χρόνου μιας προσομοίωσης είναι ο χρόνος που απαιτείται από μια γρήγορη γεννήτρια τυχαίων αριθμών, η αλλαγή της με μια πιο αργή γεννήτρια (πχ. 20 φορές πιο αργή) τελικά θα διπλασιάσει το χρόνο της προσομοίωσης.
7. Μεγάλη περίοδο επανάληψης

Το μέγεθος της περιόδου μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό μιας και καθορίζει τον αριθμό των τυχαίων αριθμών που παράγει με βάση μια συγκεκριμένη αρχική τιμή. Στην πράξη, εάν ένα πείραμα

προσομοίωση χρησιμοποιεί N τυχαίους αριθμούς από μια σειρά τυχαίων αριθμών με μήκος ρ , τότε θα πρέπει να ισχύει $\rho \gg N$

Σύμφωνα με τους L'Ecuyer (1998) και τον Hellekalek (1998) μήκος περιόδου ίσο με 2^{32} ή μικρότερο, είναι συνηθισμένο στις τυπικές γεννήτριες που είναι ενσωματωμένες σε λειτουργικά συστήματα και πακέτα εφαρμογών, αλλά θεωρείται υπερβολικά μικρό για τις σύγχρονες απαιτήσεις. Ένα τέτοιο εύρος περιόδου μπορεί να εξαντληθεί μέσα σε λίγα λεπτά από τους σύγχρονους υπολογιστές.

Η βέλτιστη γεννήτρια τυχαίων αριθμών, εκτός από τις βασικές ιδιότητες που οφείλει να παρουσιάζει, είναι αυτή που παράγει τα καλύτερα «ποιοτικά» αποτελέσματα, όμως η «ποιότητα» είναι πολλές φορές υποκειμενικός παράγοντας (Klimasauskas, 2003). Για παράδειγμα, στην κρυπτογραφία ο όρος «ποιότητα» εκφράζεται, μεταξύ άλλων, από την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται για την υλοποίησή της. Αντίθετα, σε εφαρμογές προσομοίωσης συστημάτων η ποιότητα εκφράζεται από το πόσο καλά η κατανομή των αποτελεσμάτων ταιριάζει με την θεωρητικά αναμενόμενη κατανομή.

2.5.1 Αξιολόγηση γεννήτριας τυχαίων αριθμών

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητας των γεννητριών τυχαίων αριθμών μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

1. Θεωρητικοί έλεγχοι, που περιλαμβάνουν μεθόδους για την ανάλυση της δομής. Ανάλογα με το είδος των παραγόμενων τυχαίων αριθμών, ο Knuth (1969) προτείνει δύο γνωστούς στατιστικούς ελέγχους που κατατάσσει στην κατηγορία των θεωρητικών ελέγχων: τον έλεγχο του χ^2 και τον έλεγχο Kolmogorov-Smirnoff. Ωστόσο, σύμφωνα με τον L'Ecuyer (1998) κανένας από τους προαναφερθέντες ελέγχους δεν μπορεί από μόνος του να αποδείξει ότι μια συγκεκριμένη γεννήτρια τυχαίων αριθμών είναι «τέλεια» τυχαία ή ότι είναι πλήρως αξιόπιστη για μια προσομοίωση. Στην καλύτερη περίπτωση μπορεί απλά να ενισχύσει την εμπιστοσύνη μας στη γεννήτρια που εξετάζεται.
2. Εμπειρικοί έλεγχοι, που περιλαμβάνουν στατιστικές μεθόδους ανάλυσης. Ένας εμπειρικός έλεγχος θεωρεί την υπό εξέταση γεννήτρια τυχαίων αριθμών, ένα «μαύρο κουτί» (L'Ecuyer, 1998). Εξετάζει τους τυχαίους αριθμούς που παράγει,

και εφαρμόζει στατιστικούς ελέγχους που ελέγχουν μια αρχική υπόθεση προκειμένου να εντοπίσουν σημαντικές στατιστικές αστοχίες της γεννήτριας.

2.5.2 Διαθέσιμα σύνολα υλοποιημένων εμπειρικών ελέγχων (Batteries of tests)

Η βασική ιδέα για την ανάπτυξη στατιστικών ελέγχων είναι ότι η παραγόμενη ακολουθία αριθμών της γεννήτριας θα πρέπει να διέπεται από τις ιδιότητες μιας ακολουθίας που παράγεται από ομοιόμορφη κατανομή. Η τυχαιότητα εδώ είναι μια πιθανοτική ιδιότητα, που σημαίνει ότι οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της τυχαιάς ακολουθίας καθορίζονται από την πιθανότητα επιλογής των αριθμών.

Οι στατιστικοί έλεγχοι που περιγράφονται από τον Knuth (1969), θεωρούνται τυπικοί έλεγχοι για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Το πακέτο TESTRAND (Dudewicz, 1981; L'Ecuyer, 1998) είναι μια υλοποίηση των παραπάνω ελέγχων σε FORTRAN.

Ένα πιο πρόσφατο πακέτο ελέγχων, το DIEHARD σχεδιάστηκε από τον Marsaglia (1996). Το πακέτο αυτό θεωρείται ότι περιλαμβάνει πιο αυστηρούς ελέγχους στους οποίους αποτυγχάνουν πολλές από τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Τα Diehard τεστ θεωρούνται αρκετά αυστηρά και ικανά να ανακαλύπτουν στατιστικές ατέλειες στην ακολουθία των αριθμών. Ταυτόχρονα αποτελούν και πρότυπο έλεγχο για μια απαιτητική και αξιόπιστη διαδικασία ελέγχου ψευδοτυχαίων γεννητριών, δεδομένου ότι πολλές γεννήτριες που παρουσιάστηκαν σαν γεννήτριες τυχαίων αριθμών απέτυχαν να περάσουν όλα τα Diehard τεστ.

Ένα ακόμα πιο σύγχρονο πακέτο ελέγχων προτάθηκε από τους L'Ecuyer και Simard (2007) το TESTU01, στο οποίο υλοποιούνται οι περισσότεροι στατιστικοί έλεγχοι που έχουν προταθεί μέχρι τώρα, ενώ διαθέτει και αρκετούς τύπους γεννητριών στη γενική τους μορφή. Οι Rukhin et al., (2008) ανέπτυξαν το πακέτο NIST για τον έλεγχο των γεννητριών τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές κρυπτογράφησης. Πρόκειται για ένα σύνολο στατιστικών ελέγχων που έχουν στόχο τον εντοπισμό μειωμένης τυχαιότητας σε ακολουθίες δυαδικών αριθμών. Το πακέτο ENT (Walker, 2008) υλοποιεί διάφορους ελέγχους σε σειρές από bytes και παρουσιάζει τις αναφορές με τα αποτελέσματα των ελέγχων αυτών. Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση γεννητριών τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούνται στην κρυπτογραφία.

Για τον έλεγχο μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, ο έλεγχος της ομοιομορφίας και ο έλεγχος για εμφάνιση ζευγών συσχετίσεων δεν είναι αρκετός. Είναι απαραίτητο να γίνουν περεταίρω έλεγχοι που εντοπίζουν συσχετίσεις μεγαλύτερης τάξης ή την εμφάνιση γεωμετρικών μοτίβων σε διαδοχικούς αριθμούς που προκύπτουν από τις γεννήτριες. Τέτοιου είδους μοτίβα και συσχετίσεις έχουν παρουσιαστεί σε πολλές κατηγορίες γεννητριών τυχαίων αριθμών που θεωρούνται ότι δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα (Ferrenberg et al, 1992). Το ερώτημα ποιοι είναι οι κατάλληλοι έλεγχοι τους οποίους πρέπει να περνά μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών είναι πολύ δύσκολο να απαντηθεί γιατί όταν σχεδιάζεται μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών ο δημιουργός της σπανίως γνωρίζει τις συγκεκριμένες εφαρμογές που θα την υλοποιήσουν (L'Ecuyer, 1992b). Για το λόγο αυτό, ο στόχος είναι να περνά διάφορους ελέγχους προκειμένου να εντοπίζονται αστοχίες διαφορετικής προέλευσης.

2.5.3 Γεννήτριες τυχαίων αριθμών

Ένας σημαντικός αριθμός γεννητριών τυχαίων αριθμών είναι διαθέσιμες, αλλά το ερώτημα που τίθεται είναι εάν οι γεννήτριες αυτές είναι επαρκώς αξιόπιστες. Σύμφωνα με τον L'Ecuyer (2001) παρόλες τις συστηματικές προειδοποιήσεις για συγκεκριμένες κατηγορίες γεννητριών και παρόλο που έχουν προταθεί πολύ πιο αξιόπιστες γεννήτριες, πολλά εμπορικά προγράμματα εξακολουθούν να χρησιμοποιούν γεννήτριες που θεωρούνται πολύ απλοϊκές και μη ασφαλείς ως προς τα παραγόμενα αποτελέσματα.

Υπάρχουν πολλά είδη γεννητριών τυχαίων αριθμών, οι οποίες ανάλογα με τη μαθηματική τους διατύπωση ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες. Από αυτές, θα εστιάσουμε σε τρεις ξεχωριστές γεννήτριες τυχαίων αριθμών, ευρέως διαδεδομένες, οι οποίες έχουν επανειλημμένα αξιολογηθεί ως προς την ποιότητά τους.

Linear Congruential Generators – LCGs: Από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες γεννήτριες τυχαίων αριθμών (L'Ecuyer, 1998) είναι αυτές που ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των γεννητριών απλής γραμμικής σύγκλισης (Linear Congruential Generators - LCGs). Η κατάσταση στο βήμα n είναι ένας ακέραιος x_n και η μεταβατική συνάρτηση ορίζεται από την επαναφορά

$$x_n = (a x_{n-1} + c) \bmod m, \quad x_{n-1} \geq 0 \quad (2.21)$$

όπου $m > 0$, $a > 0$ και c είναι ακέραιοι που καλούνται αντίστοιχα, «διαίρετης» (modulus), «πολλαπλασιαστής» (multiplier), και «αύξηση» (additive constant). Δηλαδή,

πολλαπλασιάζουμε το x_{n-1} με a , προσθέτουμε τον όρο c και διαιρούμε το αποτέλεσμα της πράξης αυτής με m . Τότε, το x_n ισούται με το υπόλοιπο της διαίρεσης αυτής. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση αυτή το πεπερασμένο σύνολο των καταστάσεων είναι το σύνολο $\{0, \dots, m-1\}$. Προκειμένου να παράγουμε τιμές στο διάστημα $[0,1)$, πρέπει απλά να ορίσουμε ως συνάρτηση εξόδου G ως εξής: $u_n = G(x_n) = x_n/m$.

Στην περίπτωση που το c είναι ίσο με το μηδέν, η γεννήτρια καλείται πολλαπλασιαστική γεννήτρια γραμμικής σύγκλισης (multiplicative linear congruential generator - MLCG). Το μέγιστο μήκος περιόδου για μια απλή γεννήτρια γραμμικής σύγκλισης είναι ίσο με m . Αντίθετα, για τις πολλαπλασιαστικές γεννήτριες γραμμικής σύγκλισης, η μέγιστη περίοδος δεν μπορεί να ξεπερνά την τιμή $m-1$, μιας και η κατάσταση για την οποία $x_n = 0$ πρέπει να αποφεύγεται.

Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών (System.Random) που εμφανίζεται στο λογισμικό της Microsoft Visual Studio ανήκει σ' αυτή την κατηγορία. Η συγκεκριμένη γεννήτρια έχει περίοδο 2^{24} και ορίζεται ως εξής:

$$x_1 = (x_0 \cdot 214013 + 2531011) \bmod 2^{24}, \quad (2.22)$$

Όπου

x_1 είναι ο νέος τυχαίος αριθμός

x_0 είναι ο προηγούμενος τυχαίος αριθμός που παράχθηκε

Ο τελεστής MOD επιστρέφει το ακέραιο υπόλοιπο μετά τη διαίρεση ακεραίων.

Σύμφωνα με τους L'Ecuyer και Simard (2007) οι γεννήτριες αυτής της μορφής αποτυγχάνουν σε πολλά τεστ και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή.

Fast Random (Xorshift RNG): Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών Fast Random αποτελεί υλοποίηση της γεννήτριας XOR-shift (Marsaglia, 2003). Για την υλοποίηση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί η Xorshift γεννήτρια τυχαίων αριθμών με περίοδο $2^{128}-1$.

Οι Xorshift γεννήτριες αναλύθηκαν από τους Brent (2004) και Panneton and L'Ecuyer (2005). Σε μια Xorshift γεννήτρια τυχαίων αριθμών, μια λέξη (ένα μπλοκ από bits) γίνεται

“xored” (διαδικασία αποκλειστικού ή) με μια μετατόπιση (είτε αριστερά είτε δεξιά του αντιγράφου του εαυτού της (L’Ecuyer and Simard, 2007)).

Το πλεονέκτημα της παραπάνω γεννήτριας είναι η ταχύτητά της και η ευκολία στη χρήση της μιας και μπορεί άμεσα να χρησιμοποιηθεί, αντικαθιστώντας τη System.Random. Επιπλέον, είναι έως και 8 φορές γρηγορότερη από αυτή. Οι γεννήτριες αυτής της μορφής παρόλο που στα τεστ εμφανίζουν καλύτερες αποδόσεις από τη System.Random, αποτυγχάνουν σε μια σειρά από τεστ για τη γραμμική πολυπλοκότητα μιας και λόγω κατασκευής, οι ακολουθίες των bit που παράγουν υπακούουν σε διαδικασίες γραμμικής επαναφοράς (linear recurrence).

Mersenne Twister

Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών Mersenne Twister (MT19937) προτάθηκε το 1998 από τους Matsumoto και Nishimura. Πρόκειται για βελτιωμένη εξέλιξη των γεννητριών Tausworthe, GFSR, TGSFR (Twisted Generalized Feedback Register). Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί η γεννήτρια αυτή στηρίζεται στους Mersenne Πρώτους αριθμούς (Mersenne Primes).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι Mersenne αριθμός καλείται ο αριθμός της μορφής $2^n - 1$, όπου n ένας ακέραιος αριθμός. Όταν ο M_n είναι πρώτος αριθμός, καλείται Mersenne πρώτος αριθμός. Οι Mersenne πρώτοι αριθμοί θεωρούνται οι μεγαλύτεροι πρώτοι αριθμοί που είναι γνωστοί μέχρι σήμερα.

Ο αλγόριθμος Mersenne Twister έχει περίοδο $2^{19937} - 1$ και ισοκατανομή σε 623 διαστάσεις. Η μορφή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται ευρέως, παράγει μια σειρά ψευδοτυχαίων ακεραίων αριθμών 32-bit. Εάν η σειρά περιλαμβάνει ακεραίους από 0 έως $2^w - 1$ (όπου w , πχ ακρίβεια 32-bit), τότε διαιρώντας σε ένα επόμενο βήμα με $2^w - 1$, παίρνουμε ψευδοτυχαίους πραγματικούς αριθμούς από 0 έως 1.

Η γεννήτρια αυτή παρουσιάζει ένα σύνολο από επιθυμητές ιδιότητες που συνοψίζονται στα παρακάτω:

- a. Έχει περίοδο ίση με $2^{19937} - 1$ λόγω της χρήσης Mersenne πρώτων αριθμών. Η περίοδος αυτή θεωρείται πολύ μεγάλη, παρόλο που από μόνο του το μέγεθος της περιόδου μιας γεννήτριας δεν εξασφαλίζει ικανοποιητική τυχαιότητα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε πολλά εμπορικά πακέτα έχουν πολύ μικρότερη περίοδο (2^{32}).

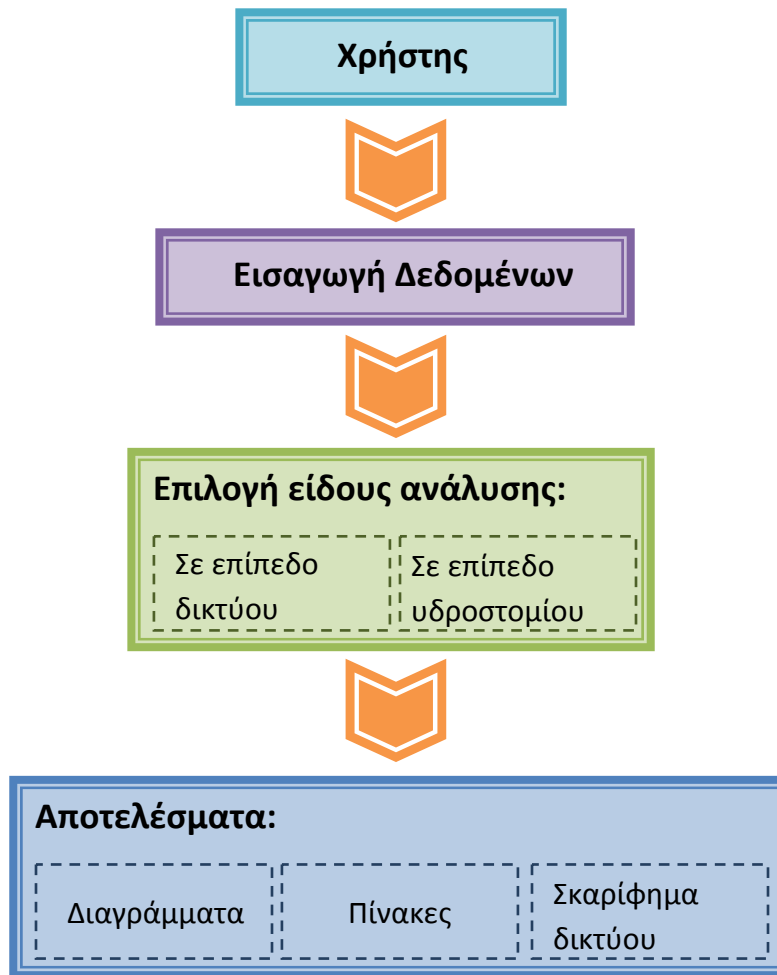
- b. Παρουσιάζει ανεξαρτησία σε k -διαστάσεις, για 32-bit ακρίβεια, για κάθε $1 \leq k \leq 623$.
- c. Έχει αποδειχθεί ότι περνά με επιτυχία ένα μεγάλο αριθμό στατιστικών ελέγχων, συμπεριλαμβανομένου του πακέτου DIEHARD. Περνά επίσης με επιτυχία τους περισσότερους ελέγχους, ωστόσο όχι όλους, που περιλαμβάνονται στο πακέτο TESTU01.

3. Ανάπτυξη νέου μοντέλου

Ένα νέο μοντέλο δημιουργήθηκε για την ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών αρδευτικών δικτύων που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση σε επίπεδο δικτύου και σε επίπεδο υδροστομίου, με τη χρήση τεχνικών αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (Object Oriented Programming) και με τη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. NET. Με το μοντέλο αυτό διευκολύνεται η χρήση των επιμέρους δυνατοτήτων του, προκειμένου αυτές να υλοποιηθούν σε νέες εφαρμογές, ενώ παράλληλα το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την μελλοντική του εξέλιξη.

Το μοντέλο επιτρέπει την ανάλυση της λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης, σε επίπεδο δικτύου με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες και την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα οι παραπάνω αναλύσεις να υλοποιηθούν με τη χρήση διαφορετικών εξισώσεων και τύπων για τον υπολογισμό των απωλειών φορτίου. Αντίστοιχα, δίνεται η δυνατότητα επιλογής της γεννήτριας τυχαίων αριθμών που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση. Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας σκαριφήματος του δικτύου που εισάγεται προς ανάλυση προκειμένου να είναι εύκολος ο εντοπισμός σφαλμάτων κατά την εισαγωγή των δεδομένων.

Οι βασικές λειτουργίες του μοντέλου που αναπτύχθηκε, παρουσιάζονται σχηματικά στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 14).

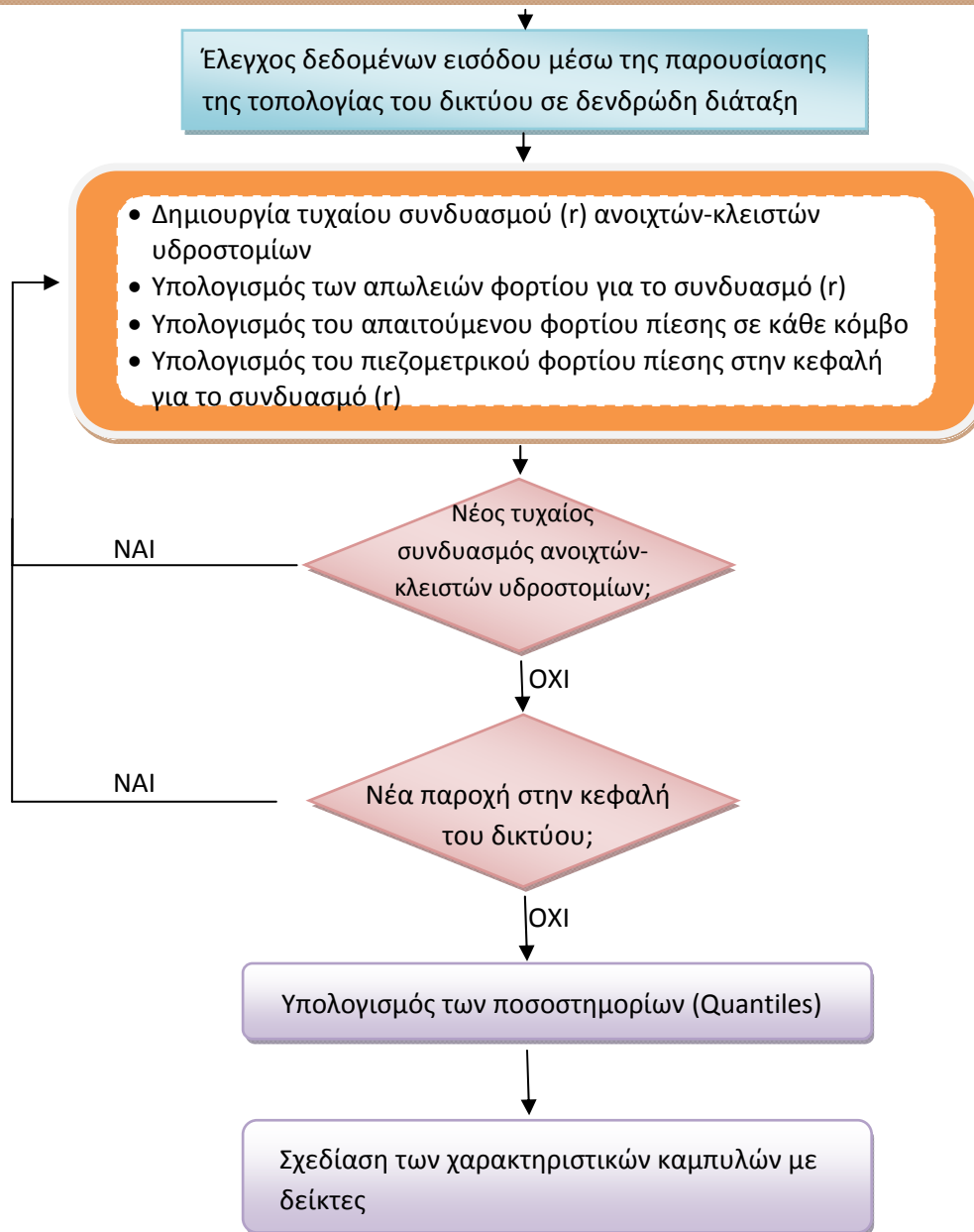


Εικόνα 14: Βασικές λειτουργίες του μοντέλου

Οι βασικές λειτουργίες του μοντέλου που αναπτύχθηκε είναι η υδραυλική ανάλυση σε επίπεδο δικτύου και η υδραυλική ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου. Η βασική δομή καθεμιάς από τις δύο βασικές λειτουργίες του μοντέλου που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Εισαγωγή δεδομένων:

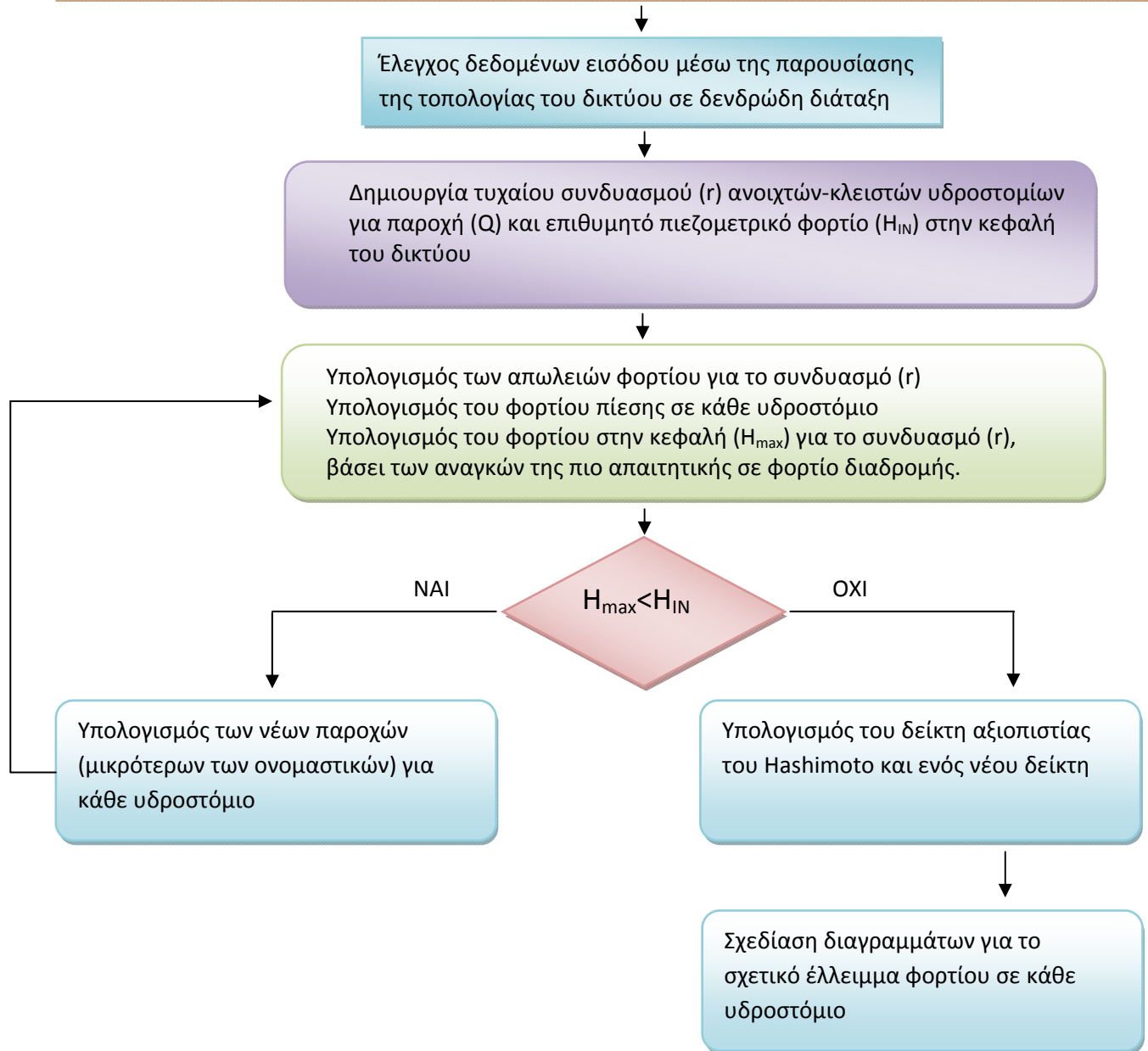
- Γεωμετρία του δικτύου (αρχικός και τελικός κόμβος, μήκος αγωγού, υψόμετρο, υφιστάμενα υδροστόμια)
- Υδραυλικά χαρακτηριστικά (διάμετροι, συντελεστές τραχύτητας, ονομαστικές παροχές υδροστομίων και ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο)
- Έξτρα: Επιλογή τύπου γραμμικών απωλειών



Εικόνα 15: Διάγραμμα ροής για την ανάλυση σε επίπεδο δικτύου

Εισαγωγή δεδομένων:

- Γεωμετρία του δικτύου (αρχικός και τελικός κόμβος, μήκος αγωγού, υψόμετρο, υφιστάμενα υδροστόμια)
- Υδραυλικά χαρακτηριστικά (διάμετροι, συντελεστές τραχύτητας, ονομαστικές παροχές υδροστομίων, πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή και ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο)
- Έξτρα: Επιλογή τύπου γραμμικών απωλειών



Εικόνα 16: Διάγραμμα ροής για την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου

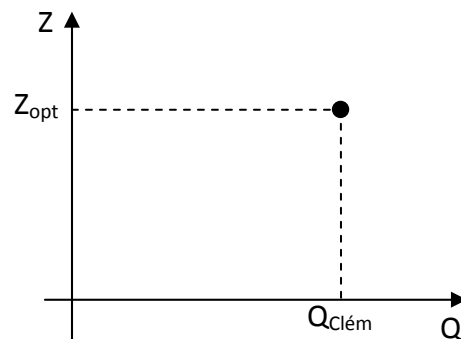
3.1 Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα εισάγονται απευθείας από το χρήστη και διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Δεδομένα για τη γεωμετρία του δικτύου: Τα δεδομένα αυτά αφορούν στην αρίθμηση των κόμβων του δικτύου και περιλαμβάνουν τον αρχικό και τελικό κόμβο κάθε αγωγού, το μήκος του αγωγού, το υψόμετρο του κάθε κατάντη κόμβου και τα υδροστόμια που τυχόν υπάρχουν σε κάθε κόμβο του δικτύου
- Δεδομένα για τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του δικτύου: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν δεδομένα όπως οι διάμετροι των αγωγών, η τραχύτητά τους, οι παροχές των υδροστομίων, το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο στα υδροστόμια και το πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου.
- Επιπλέον δεδομένα για την επιλογή της εξίσωσης γραμμικών απωλειών που θα χρησιμοποιηθεί.

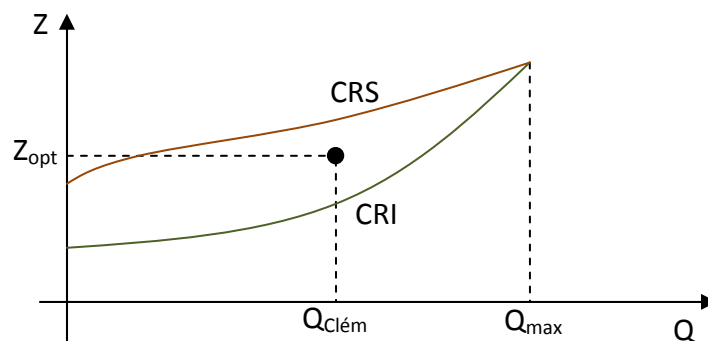
3.2 Μοντέλο για την ανάλυση της λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες

Στα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα οι παροχές σχεδιασμού εντός των αγωγών υπολογίζονται με το νόμο του Clément ενώ η βελτιστοποίηση των διαμέτρων γίνεται με την ασυνεχή μέθοδο του Labye. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ωστόσο, από τη χρήση των δύο αυτών μεθόδων προκύπτει ένα και μοναδικό σημείο (Z_{opt} , $Q_{Clém}$) πάνω στο διάγραμμα Z,Q (Εικόνα 17).



Εικόνα 17: Το σημείο λειτουργίας (Z_{opt} , $Q_{Clém}$) που προκύπτει από τη χρήση του νόμου του Clément και τη μέθοδο του Labye

Έτσι, προκειμένου να προκύψει ένα διάγραμμα που να είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικό, έγινε μια προσπάθεια ώστε να προσδιοριστούν οι καμπύλες εντός των οποίων βρίσκονται όλα τα σημεία λειτουργίας ενός δικτύου (Labye, 1971; Labye et al., 1975). Σαν σημεία λειτουργίας ορίζονται τα ζεύγη των παροχών στην κεφαλή και τα αντίστοιχα αναγκαία φορτία πίεσης. Οι καμπύλες αυτές είναι η Ανώτερη Χαρακτηριστική Καμπύλη και η Κατώτερη Χαρακτηριστική Καμπύλη (Εικόνα 18).



Εικόνα 18: Η ανώτερη και κατώτερη χαρακτηριστική καμπύλη

Μεταξύ των πολλών συνδυασμών ανοιχτών υδροστομιών που απαιτούν μια δεδομένη παροχή Q στην κεφαλή του δικτύου, υπάρχει ένας που απαιτεί το μεγαλύτερο φορτίο στην κεφαλή. Όταν η πιεζομετρική στάθμη στην κεφαλή του δικτύου είναι ίση ή μεγαλύτερη του φορτίου αυτού όλοι οι συνδυασμοί ανοικτών υδροστομιών ικανοποιούνται, ενώ όταν είναι μικρότερη υπάρχει ένας τουλάχιστον συνδυασμός ανοικτών υδροστομιών που δεν ικανοποιείται (Δέρκας, 2001). Η καμπύλη που προκύπτει από την ανώτερη πιεζομετρική στάθμη για κάθε παροχή Q , ονομάζεται ανώτερη χαρακτηριστική καμπύλη (*caractéristique réseau supérieure – CRS*) και χωρίζει το διάγραμμα (Z, Q) σε δύο τμήματα. Στο ανώτερο τμήμα όπου κάθε συνδυασμός ανοικτών υδροστομιών ικανοποιείται και στο κατώτερο τμήμα όπου υπάρχει τουλάχιστον ένας συνδυασμός ανοικτών υδροστομιών που δεν ικανοποιείται. Αντίστοιχα, μεταξύ των πολλών συνδυασμών ανοιχτών υδροστομιών που απαιτούν μια δεδομένη παροχή Q στην κεφαλή του δικτύου, υπάρχει ένας που απαιτεί το μικρότερο φορτίο στην κεφαλή. Όταν η πιεζομετρική στάθμη στην κεφαλή του δικτύου είναι ίση ή μικρότερη, τότε κανένας συνδυασμός ανοικτών υδροστομιών δεν ικανοποιείται ενώ εάν είναι μεγαλύτερη του φορτίου αυτού υπάρχει ένας τουλάχιστον συνδυασμός ανοικτών υδροστομιών που ικανοποιείται. Η καμπύλη που προκύπτει από την κατώτερη πιεζομετρική στάθμη για κάθε παροχή Q , ονομάζεται κατώτερη χαρακτηριστική καμπύλη (*caractéristique réseau inférieure – CRS*).

Μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης χαρακτηριστικής καμπύλης ενός δικτύου, βρίσκονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες του δικτύου. Η χαρακτηριστική καμπύλη $C_i (Z=C_i(Q))$ είναι η καμπύλη εκείνη για την οποία εάν $Z=C_i(Q)$ και ζητούμενη παροχή Q , υπάρχει ένα ποσοστό i συνδυασμών ανοιχτών-κλειστών υδροστομιών που ζητούν την παροχή Q που ικανοποιείται. Όπως είναι λογικό, για $Z=C_i(Q)$ και ζητούμενη παροχή Q υπάρχει ένα ποσοστό συνδυασμών ανοιχτών-κλειστών υδροστομιών ίσο με $(100-i)$ το οποίο δεν ικανοποιείται.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες προσφέρουν μια γενική εικόνα της λειτουργικής απόδοσης ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου ελεύθερης ζήτησης. Οι καμπύλες αυτές μας επιτρέπουν να γνωρίζουμε το ποσοστό ικανοποίησης μιας ζητούμενης παροχής Q , για ένα δεδομένο φορτίο Z στην κεφαλή του δικτύου.

3.3 Ποσοστημότητα (Quantiles)

Στην πράξη, προκειμένου να υπολογιστούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες, πρέπει να προσδιοριστούν τα αναγκαία πιεζομετρικά φορτία στην κεφαλή του δικτύου, που προκύπτουν από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανοιχτών υδροστομίων για παροχή στην κεφαλή που κυμαίνεται από πολύ μικρή τιμή μέχρι την αθροιστική παροχή. Από το σύνολο αυτό των τιμών των πιεζομετρικών φορτίων στην κεφαλή, υπολογίζοντας τα ποσοστημότητα (quantiles) προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες $Z=C_i(Q)$.

Τα ποσοστημότητα δίνουν αναλυτικότερη περιγραφή της θέσης της κατανομής των παρατηρήσεων. Το ποσοστημότητα C_i είναι το σημείο της κατανομής για το οποίο το $i\%$ των παρατηρήσεων είναι μικρότερες ή ίσες από αυτό και το υπόλοιπο $(1-i)\%$ των παρατηρήσεων είναι ίσες ή μεγαλύτερες από αυτό.

Τα ποσοστημότητα υποδιαιρούν την κατανομή των παρατηρήσεων σε «ίσα» τμήματα, όχι με όρους μονάδων μέτρησης (δηλαδή απόστασης) των παρατηρήσεων αλλά με όρους ποσοστών. Δηλαδή τα τμήματα αυτά είναι «ίσα» με την έννοια ότι περιέχουν ίσα ποσοστά παρατηρήσεων. Έτσι, ίσες αποστάσεις μπορεί να περιέχουν διαφορετικά ποσοστά παρατηρήσεων. Τα ποσοστημότητα επομένως είναι μέτρα σχετικής θέσης και όχι σχετικής απόστασης. Τα ποσοστημότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα γιατί μας βοηθούν να απαντήσουμε σε ερωτήσεις που αφορούν συγκεκριμένες παρατηρήσεις. Για παράδειγμα, μια συγκεκριμένη παρατήρηση βρίσκεται κοντά στα άκρα ή κοντά στο κέντρο της κατανομής ή πόσες παρατηρήσεις είναι μικρότερες από μια συγκεκριμένη παρατήρηση (Παπαδόπουλος Γ., 2008).

Στην πράξη, επειδή δεν είναι εφικτό να προσδιοριστούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί τυχαίων ανοιχτών υδροστομίων, τα ποσοστημότητα προσδιορίζονται βάσει των πιεζομετρικών φορτίων στην κεφαλή που προκύπτουν από έναν αριθμό τυχαίων προσομοιώσεων. Έστω ένα δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει υδροστόμια διαφορετικής ονομαστικής παροχής. Ανοίγουμε τυχαία υδροστόμια προκειμένου να προκύψει στην κεφαλή του δικτύου μια συγκεκριμένη παροχή Q . Στη συνέχεια, γι' αυτό το συνδυασμό ανοιχτών υδροστομίων, προσδιορίζεται το φορτίο που απαιτείται στην κεφαλή προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι τα υδροστόμια αυτά λειτουργούν ικανοποιητικά. Έτσι, προκύπτει μια τιμή πιεζομετρικού φορτίου στην κεφαλή Z_r που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη παροχή Q που εξετάζεται για το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών

υδροστομίων. Εάν επαναλάβουμε τη διαδικασία αυτή L φορές, θα προκύψουν L ζευγάρια τιμών (Z_r, Q) . Από το σύνολο των τιμών Z_r που προέκυψαν από τον αριθμό των προσομοιώσεων που έγιναν, μπορούν να προσδιοριστούν τα ποσοστημόρια $Z_r(Q)$, δηλαδή οι τεταγμένες των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες για παροχή Q .

3.4 Αριθμός προσομοιώσεων

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να εξεταστεί το θέμα της ακρίβειας των καμπυλών που προέκυψαν, δηλαδή το θέμα της ακρίβειας των ποσοστημορίων που προέκυψαν από την κατανομή των φορτίων Z στην κεφαλή του δικτύου από κάθε προσομοίωση. Το ερώτημα που τίθεται δηλαδή, είναι για μια δεδομένη παροχή Q στην κεφαλή του δικτύου, ποιος πρέπει να είναι ο αριθμός των προσομοιώσεων που θα γίνουν ώστε να προσεγγιστεί ικανοποιητικά η κατανομή $Z_i(Q)$.

Ο συνολικός αριθμός των δυνατών συνδυασμών ανοιχτών-κλειστών υδροστομιών για μια συγκεκριμένη εξεταζόμενη παροχή στην κεφαλή του δικτύου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_N^M = \frac{N!}{M!(N-M)!} \quad (3.1)$$

όπου N ο αριθμός των υδροστομιών του δικτύου και

M είναι ο αριθμός των συγχρόνως λειτουργούντων ανοιχτών υδροστομιών για μια παροχή Q στην κεφαλή του δικτύου. Εάν όλα τα υδροστόμια του δικτύου έχουν την ίδια παροχή d , τότε $M = Q/d$. Στην περίπτωση που τα υδροστόμια έχουν διαφορετική παροχή d , ο αριθμός των υδροστομιών που θα ανοίξουν ταυτόχρονα θα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τα υδροστόμια που ανοίγουν μέχρι να ικανοποιηθεί η σχέση

$|Q_s - Q| < \varepsilon_r$ όπου Q_s είναι η συνολική παροχή στην κεφαλή του δικτύου που προκύπτει με το άνοιγμα M υδροστομιών και ε_r είναι η τιμή της αποδεκτής ανοχής, η οποία σύμφωνα με τους Bethery et al. (1981) είναι ίση με την τιμή της χαμηλότερης ονομαστικής παροχής υδροστομίου του δικτύου (Lamaddalena and Sgardoy, 2000).

Σύμφωνα με τον Bethery (1990) ο αριθμός C των προσομοιώσεων που θα γίνουν για κάθε εξεταζόμενη παροχή στην κεφαλή του δικτύου πρέπει να πλησιάζει το συνολικό αριθμό των υδροστομιών R του δικτύου. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Labye et al (1975), καθώς το μέγεθος C_N^M μεγιστοποιείται για $M=N/2$, θεωρούν ότι ο μέγιστος αριθμός προσομοιώσεων για ένα δίκτυο με 40-50 υδροστόμια, υπολογίζεται ικανοποιητικά στο

διπλάσιο του αριθμού των υδροστομίων του δικτύου. Ωστόσο, για δικτυα με πολύ μεγαλύτερο αριθμό υδροστομίων θεωρούν ότι η αναλογία αυτή θα πρέπει να μειώνεται. Οι Lamaddalena and Sagardoy (2000) αναφέρουν ότι ο αριθμός των προσομοιώσεων που πρέπει να υλοποιηθούν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό από τον αριθμό των υδροστομίων του εξεταζόμενου δικτύου εάν το δίκτυο που εξετάζεται είναι εξοπλισμένο με λιγότερα από 200 υδροστόμια, ενώ ο αριθμός των προσομοιώσεων θα μπορούσε να είναι μικρότερος από τον αριθμό των υδροστομίων του δικτύου εάν το εξεταζόμενο δίκτυο είναι εξοπλισμένο με περισσότερα από 600 υδροστόμια.

3.5 Μοντέλο για την ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών δικτύων σε επίπεδο υδροστομίου

Για την αξιολόγηση της ποιότητας λειτουργίας ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου ελεύθερης ζήτησης, έχει ενδιαφέρον να υπολογίσουμε τις παροχές και τις πιέσεις που θα προσφέρονται στην πραγματικότητα από τα υδροστόμια του δικτύου, δεδομένης μιας συγκεκριμένης ζητούμενης παροχής στην κεφαλή του δικτύου. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να βασιστούμε σε ένα σημαντικό αριθμό προσομοιώσεων για διάφορους τυχαίους συνδυασμούς ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων.

Αυτό που ενδιαφέρει στις περισσότερες περιπτώσεις είναι να προσομοιωθεί η λειτουργία του δικτύου για μια ζητούμενη παροχή στην κεφαλή που να είναι ίση με την παροχή αιχμής. Για να γίνει αυτό, υπολογίζεται μέσω προσομοιώσεων ένας μεγάλος αριθμός μόνιμων ροών που ζητούν μια συγκεκριμένη παροχή Q στην κεφαλή του δικτύου. Από κάθε προσομοίωση, προκύπτουν οι παροχές των υδροστομίων για το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων οι οποίες μπορεί να είναι ίσες ή μικρότερες της ονομαστικής τους παροχής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υλοποίηση ενός σημαντικού αριθμού προσομοιώσεων, μπορούν να επεξεργαστούν στατιστικά και να προκύψει με τον τρόπο αυτό η πιθανότητα ενός υδροστομίου να αποτύχει να δώσει την ονομαστική του παροχή και πίεση, αλλά και η έκταση αυτής της αποτυχίας.

Σε επίπεδο υδροστομίου διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί (CEMAGREF, 1983; Lamaddalena and Sagardoy, 2000; Khadra and Lamaddalena, 2010) που υιοθετούν συνθήκες μόνιμης ροής ενώ κάποια άλλα μοντέλα υποθέτουν συνθήκες μη μόνιμης ροής, όπως το GERSTAR (Estrada et al., 2009), FLUCS (Lamaddalena and Perreira, 2007) και το EPANET (Rossman, 2000).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο AKLA (Lamaddalena and Sagardoy, 2000) επίσης στηρίζεται στην υλοποίηση ενός αριθμού προσομοιώσεων προκειμένου να παραχθεί ένας αριθμός συνδυασμών ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων (Calejo et al., 2008). Το μοντέλο AKLA περιλαμβάνεται στο λογισμικό COPAM προκειμένου να υλοποιηθεί η ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου. Στο πλαίσιο της ανάλυσης αυτής υιοθετείται ο δείκτης αξιοπιστίας του υδροστομίου (Hashimoto, 1980; Hashimoto et al., 1982) προκειμένου να περιγραφεί πόσο συχνά ένα υδροστόμιο αποτυγχάνει να προσφέρει την απαιτούμενη πίεση και παροχή (Εξίσωση 2.11).

Ο δείκτης αξιοπιστίας του Hashimoto παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα, μιας και εξετάζει τη λειτουργική απόδοση ενός υδροστομίου μέσω μιας προσέγγισης «όλα ή τίποτα». Συγκεκριμένα, στην εξίσωση (Εξίσωση 2.11) ο όρος $I_{j,r}$ παίρνει την τιμή 1 εάν το φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο είναι μεγαλύτερο από το ονομαστικό φορτίο πίεσης και την τιμή 0 εάν το φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο είναι μικρότερο από το ονομαστικό φορτίο πίεσης. Έτσι, η έκταση του ελλείμματος ή πλεονάσματος φορτίου πίεσης δεν λαμβάνεται υπόψη από το δείκτη αξιοπιστίας του Hashimoto. Ωστόσο, στην πράξη, η πραγματική απόδοση ενός υδροστομίου προσδιορίζεται από άπειρο αριθμό καταστάσεων που κυμαίνονται το απόλυτο έλλειμμα φορτίου έως την απόλυτη λειτουργική επάρκεια. Καθεμία από αυτές τις καταστάσεις χαρακτηρίζεται από μια διαθέσιμη παροχή και ένα διαθέσιμο φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο. Έτσι, παρόλο που ο δείκτης αξιοπιστίας του Hashimoto είναι ένας δείκτης εύκολος στη χρήση που δίνει εύληπτα αποτελέσματα, παρουσιάζει μειονεκτήματα από πλευράς ευαισθησίας, μιας και αδυνατεί να αναδείξει την έκταση του ελλείμματος ή της περίσσειας φορτίου.

Για το λόγο αυτό, στην εργασία αυτή προτείνεται ένας νέος δείκτης, στον οποίο η λειτουργική επάρκεια ενός υδροστομίου δεν χαρακτηρίζεται μόνο από μια διπλή κατάσταση (0 για έλλειμμα φορτίου και 1 για επάρκεια ή πλεόνασμα φορτίου πίεσης). Αντίθετα, ο νέος δείκτης λαμβάνει υπόψη του το πηλίκο του πραγματικού φορτίου πίεσης στο υδροστόμιο σε κάθε προσομοίωση ($H_{j,r}$) προς το ονομαστικό φορτίο πίεσης του υδροστομίου (H_{nom}). Ο προτεινόμενος δείκτης που περιγράφει τη συμπεριφορά της λειτουργίας ενός υδροστομίου παρουσιάζεται παρακάτω:

$$b_j = \frac{\sum_{r=1}^C I_{j,r} \left(\frac{H_{j,r}}{H_{nom}} \right)}{\sum_{r=1}^C I_{j,r}} \quad (3.3)$$

όπου

$I_{j,r} = 1$: εάν το υδροστόμιο j είναι ανοιχτό στο συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων r , $I_{j,r} = 0$: εάν το υδροστόμιο j είναι κλειστό στο συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων r , $H_{j,r}$ είναι το επιτυγχανόμενο φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο j για το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων r , H_{nom} είναι το ονομαστικό φορτίο πίεσης του υδροστομίου j , και C είναι ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Για την εφαρμογή του δείκτη έχει υιοθετηθεί ο παρακάτω περιορισμός:

$$\text{Εάν } \left(\frac{H_{j,r}}{H_{nom}} \right) < K \text{ τότε } \left(\frac{H_{j,r}}{H_{nom}} \right) = 0$$

Όπου K ένα όριο κάτω του οποίου το σύστημα άρδευσης έχει τόσο χαμηλή απόδοση που πρακτικά δεν μπορεί να λειτουργήσει. Η τιμή του K θα πρέπει να προσδιορίζεται ανάλογα με το σύστημα άρδευσης. Ενδεικτική τιμή που υιοθετείται στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι $H_{j,r} < 0.5H_{nom}$.

Σε αντίθεση με το συντελεστή του Hashimoto, ο οποίος παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$, ο νέος δείκτης μπορεί να εμφανίσει και τιμές μεγαλύτερες της μονάδας στην περίπτωση πλεονάζοντος φορτίου στο υδροστόμιο j .

Ο δείκτης που προτείνεται είναι εύκολος στη χρήση και δίνει εύληπτα αποτελέσματα. Επιπλέον, έχει στόχο από τη μια να παρουσιάσει το εύρος του ελλείμματος ή του πλεονάσματος φορτίου και από την άλλη να αναδείξει τις περιπτώσεις υδροστομίων με οριακό πλεόνασμα φορτίου, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα αστοχίας.

Ο δείκτης αξιοπιστίας του Hashimoto παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι παίρνει τιμές μεταξύ του μηδέν και της μονάδας, ωστόσο αδυνατεί να παρουσιάσει την έκταση του ελλείμματος ή του πλεονάσματος φορτίου κάτι που αναδεικνύεται με τη χρήση του νέου προτεινόμενου δείκτη. Οι δύο δείκτες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά ώστε να παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς των υδροστομίων.

3.6 Υπολογισμός γραμμικών απωλειών

Ο υπολογισμός των γραμμικών απωλειών σε ένα δίκτυο αγωγών είναι πολύ σημαντικός όχι μόνο για το στάδιο του σχεδιασμού αλλά επίσης για την επιτυχημένη λειτουργία του και την αξιολόγηση της λειτουργίας του. Ο υπολογισμός των γραμμικών απωλειών είναι μια βασική διαδικασία στην ανάλυση των συλλογικών αρδευτικών δικτύων. Η εξίσωση του Darcy-Weisbach για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών είναι θεμελιώδης:

$$S_f = \frac{f V^2}{D 2g} \quad (3.4)$$

όπου S_f είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας, f είναι ο συντελεστής γραμμικών απωλειών, D είναι η διάμετρος του αγωγού, V είναι η ταχύτητα ροής και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών f , σε καθεστώς μεταβατικής τυρβώδους ροής, είναι συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας (e/D) και του αριθμού Reynolds Re , και κατά συνέπεια μεταβάλλεται ανάλογα με το υλικό του αγωγού και το τυρβώδες της ροής. Το διάγραμμα του Moody απλοποιεί τον προσδιορισμό του συντελεστή γραμμικών απωλειών f , ο οποίος χωρίς το διάγραμμα του Moody θα έπρεπε να υπολογιστεί μέσω της άρρητης εξίσωσης των Colebrook-White. Η εξίσωση των Darcy-Weisbach είναι ημιεμπειρική, διαστατικά ομογενής (dimensionally homogeneous) και μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα ρευστά εκτός από το νερό (Liou 1998).

Διάφορες εξισώσεις έχουν προταθεί για τον προσδιορισμό του συντελεστή γραμμικών απωλειών f της εξίσωσης των Darcy-Weisbach. Οι Colebrook και White (1937) και ο Colebrook (1938) πρότειναν εξισώσεις για τον προσδιορισμό του συντελεστή γραμμικών απωλειών f μεταξύ τυρβώδους ροής σε λείους αγωγούς και τυρβώδους ροής σε πλήρως τραχείς αγωγούς (Allen 1996). Η εξίσωση των Colebrook-White συσχετίζει το συντελεστή γραμμικών απωλειών με τον αριθμό Reynolds και τη σχετική τραχύτητα, και θεωρείται μία εξίσωση υψηλής ακρίβειας για τον υπολογισμό του συντελεστή γραμμικών απωλειών εντός των αγωγών (Liou 1998; Valiantzas 2005). Για την τυρβώδη ροή, η άρρητη εξίσωση των Colebrook-White (CW) είναι:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.72D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.5)$$

όπου ε είναι η ισοδύναμη τραχύτητα, D είναι η διάμετρος των αγωγών, f είναι ο συντελεστής γραμμικών απωλειών της εξίσωσης των Darcy-Weisbach και Re είναι ο αριθμός Reynolds.

Ωστόσο, η επαναληπτική διαδικασία της εξίσωσης των Colebrook-White είναι χρονοβόρα και γι' αυτό το λόγο έχουν προταθεί εναλλακτικά διάφορες ρητές εξισώσεις. Μια από τις γνωστότερες εξισώσεις που υπολογίζουν το συντελεστή γραμμικών απωλειών των Darcy-Weisbach για την τυρβώδη ροή προτάθηκε από τους Swamee και Jain (SJ) (1976):

$$f = 0.25 \left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (3.6)$$

όπου D είναι η διάμετρος του αγωγού, ε είναι η ισοδύναμη τραχύτητα και Re είναι ο αριθμός Reynolds.

Η ρητή αυτή εξίσωση προσεγγίζει την άρρητη εξίσωση των Colebrook-White με απόκλιση $\pm 1\%$ για ολόκληρο το εύρος πρακτικού ενδιαφέροντος: $10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2}$ και $5 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^8$ (Provenzano 2005).

Εκτός από τους Swamee και Jain, διάφορες ρητές εξισώσεις έχουν προταθεί για την εξίσωση των Colebrook-White (Barr 1972; Chen 1985; Churchill 1973; Terzidis 1992). Ο συντελεστής γραμμικών απωλειών f , που υπολογίζεται ρητά χρησιμοποιώντας αυτές τις εξισώσεις έχει μια ακρίβεια της τάξης του $\pm 1.5-2.0\%$ (Valiantzas 2008).

Παρόλο που η εξίσωση των Darcy-Weisbach προσφέρει μεγάλη ακρίβεια, πολλοί μηχανικοί χρησιμοποιούν εμπειρικές σχέσεις μιας και προσφέρουν ευκολία στους υπολογισμούς καθώς χρησιμοποιούν ένα συντελεστή γραμμικών απωλειών (single smoothness factor) για κάθε μέγεθος αγωγού ή ταχύτητα. Επιπλέον, η χρήση τέτοιων σχέσεων διευκολύνει την ενσωμάτωσή τους σε αριθμητικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση των διαμέτρων σε δίκτυα αγωγών. Μια τέτοια εμπειρική σχέση είναι αυτή των Hazen-Williams, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα διανομής νερού κλειστών αγωγών. Σε αντίθεση με την εξίσωση των Darcy-Weisbach, η εμπειρική

σχέση των Hazen-Williams δεν είναι διαστατικά ομογενής και το πεδίο εφαρμογής της είναι περιορισμένο. Στο σύστημα SI, η εμπειρική σχέση των Hazen-Williams (HW) διατυπώνεται ως εξής:

$$S_f = K \frac{Q^{1.852}}{D^{4.871}} \quad (3.7)$$

Όπου S_f είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας, Q είναι η παροχή σε m^3/s , D είναι η διάμετρος του αγωγού σε m , και K είναι ένας εμπειρικός συντελεστής, $K = 10.675 / (C_{HW})^{1.852}$, όπου C_{HW} είναι ο συντελεστής γραμμικών απωλειών των Hazen-Williams. Η τιμή του C_{HW} στην εμπειρική σχέση των Hazen-Williams κυμαίνεται από 80 για εξαιρετικά τραχείς αγωγούς έως περίπου 150 για λείους αγωγούς.

Παρόλο που η εμπειρική σχέση των Hazen-Williams έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις μεταβατικής τυρβώδους ροής σε λείους αγωγούς, η σύγκρισή της με την εξίσωση των Darcy-Weisbach από πολλούς ερευνητές (Bagarello and Pumo 1992; Hughes and Jeppson 1978; Kamand 1988; Liou 1998; Provenzano et al. 2005) έχει αναδείξει τους περιορισμούς στην εφαρμογή της.

Ο Allen (1996) σύγκρινε τις γραμμικές απώλειες που υπολογίζονται με τη σχέση των Hazen-Williams με αυτές που προκύπτουν από τη χρήση του διαγράμματος του Moody. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά του οι γραμμικές απώλειες με την εμπειρική σχέση των Hazen-Williams για $C=150$ ακολουθούν στενά την καμπύλη του διαγράμματος του Moody για λείους αγωγούς και τυρβώδη ροή για αριθμό Reynolds μεταξύ $30000 < Re < 10^8$, για τιμές $Re < 30000$ ωστόσο, υποεκτιμά το f . Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματά του η εξίσωση των Darcy –Weisbach δίνει καλύτερα αποτελέσματα για μικρές ταχύτητες και υψηλές θερμοκρασίες. Ο Liou (1998) επισημαίνει ότι η εμπειρική σχέση των HW όταν συγκριθεί με αυτή των DW-CW μπορεί να ξεπεράσει και το 40% σφάλμα εάν χρησιμοποιηθεί εκτός των ορίων εφαρμογής της. Συγκεκριμένα, το σχετικό σφάλμα για τη σχέση των HW σε σύγκριση με την εξίσωση των DW-CW είναι $\pm 8\%$ για λείους αγωγούς και αγγίζει το 40% για τραχείς αγωγούς. Από την άλλη μεριά, οι Christiansen et al. (2000) αναφέρουν ότι σχέση των HW ισχύει μόνο μεταξύ λείας και μεταβατικής τυρβώδους ροής. Ο Allen (1996) αναφέρει ότι είναι απαραίτητη μια προσαρμογή του συντελεστή C όταν αλλάζει η διάμετρος και η ταχύτητα εντός των αγωγών, μιας και αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη σχετική τραχύτητα στην πλήρως

τυρβώδη περιοχή, και διαφοροποιείται με τον αριθμό Re και την ταχύτητα. Ο Valiantzas (2005) έδειξε ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση του συντελεστή C με τη διάμετρο του αγωγού και για το λόγο αυτό δεν θα μπορούσε να θεωρηθεί σταθερός.

Παρόλο που η σχέση των Hazen –Williams δεν είναι διαστατικά ομοιογενής και παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς στην εφαρμογή της, παραμένει η πιο δημοφιλής σχέση για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας στη ροή εντός αγωγών.

Μια πιο πρόσφατη σχέση προτάθηκε για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών από τον Valiantzas (2008). Πρόκειται για μια σχέση της οποίας τα αποτελέσματα προσεγγίζουν αυτά που επιτυγχάνονται από την εξίσωση των Darcy-Weisbach (σε συνδυασμό με τον Colebrook-White για τον υπολογισμό του συντελεστή f). Το μέγιστο σχετικό σφάλμα της προτεινόμενης σχέσης είναι περίπου $\pm 4\%$. Η προτεινόμενη σχέση επεκτείνεται για τις τρεις ζώνες της τυρβώδους ροής και παίρνει τη μορφή:

$$S_f = \left(\frac{k_0 Q^2}{D^{5.3}} \right)^m \quad (3.8)$$

όπου Q, D, και ε εκφράζονται σε μονάδες SI.

$$k_0 = 0.012 \varepsilon^{0.3}, \quad \varepsilon \text{ είναι η ισοδύναμη τραχύτητα του αγωγού, } m = 1 - 0.133 \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{-1} \text{ και}$$

$$\varepsilon_0 = 0.0439 \cdot 10^{-3}.$$

Η παραπάνω σχέση λόγω της απλότητάς της μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε μοντέλα υδραυλικής ανάλυσης ή βελτιστοποίησης αρδευτικών δικτύων.

Τα ευρύτερα γνωστά λογισμικά για την ανάλυση της λειτουργίας υπό πίεση συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης, το COPAM και το ICARE, χρησιμοποιούν διαφορετικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών. Το λογισμικό COPAM υπολογίζει τις γραμμικές απώλειες εντός των αγωγών με την εξίσωση του Darcy (Lamaddalena and Sagardoy 2000):

$$S_f = 0.000857(1 + 2\gamma D - 0.5)^2 Q^2 D^{-5} \quad (3.9)$$

όπου γ είναι η παράμετρος τραχύτητας του Bazin, σε $m^{0.5}$, Q είναι η παροχή εντός του αγωγού (σε m^3/s) και D είναι η διάμετρος σε m . Οι Lamaddalena and Sagardoy (2000) παραθέτουν τις τιμές του συντελεστή γ για διάφορους τύπους αγωγών και την αντίστοιχη ισοδύναμη τραχύτητα ϵ . Το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού COPAM, δίνει έναν πίνακα που αντιστοιχίζει την παράμετρο γ του Bazin με την ισοδύναμη τραχύτητα και με την περιγραφή του υλικού του αγωγού (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Ο συντελεστής τραχύτητας γ του Bazin για διάφορους τύπους αγωγών (Lamaddalena και Sagardoy, 2000)

Είδος Αγωγού	Ισοδύναμη τραχύτητα ϵ (mm)	γ ($m^{0.5}$)
1- Technically smooth tubes (glass, brass, drawn copper, resin)	0 - 0.02	
2- Steel pipes		
A) Time degradable coverings		
New pipes, varnished by centrifugation	0.05	--
Bitumened by immersion	0.1-0.015	≤ 0.06
In current duty with light rust	0.2-0.4	0.10
With asphalt or tar applied by hands	0.5-0.6	0.16
With diffused tubercolisation	1 - 3	0.23
B) Non degradable coverings		
Cement applied by centrifugation	0.05-0.15	≤ 0.06
3- Welded sheet-pipes		
In good conditions	0.2-0.3	0.1
In current duty with crusting	0.4-1.0	0.16
4- Nailed sheet-pipes		
1 line of longitudinal nails	0.3-0.4	0.10
2 lines of longitudinal nails	0.6-0.7	0.16
Idem with crusting	Until 3.0	0.30
4-6 lines of longitudinal nails	2.0	0.23
6 lines of longitudinal nails + 4 transversal	3.0	0.30
Idem with crusting	Until 5.0	0.36
5- Cast iron pipes		
With centrifuged-cemented covering	0.1	≤ 0.06
New, covered internally with bitumen	0.15	0.06
New, not covered	0.2-0.4	0.10
With light crusting	0.4-1.0	0.16
In current duty, partially rusted	1.0-2.0	0.23
Strongly encrusted	3.0-5.0	0.36
6- Cement-pipes		
Asbestos cement	0.1	≤ 0.06
New reinforced concrete, plaster perfectly smooth	0.1-0.15	0.06
Reinforced concrete with smooth plaster, in work for many years	2.0	0.23
Tunnels with cement plaster, depending on the degree of finish	2.0-5.0	0.23-0.36

Το λογισμικό ICARE χρησιμοποιεί τη σχέση των Calmon και Lechart (CL) για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών. Οι Calmon and Lechart προτείνουν την παρακάτω σχέση που περιλαμβάνει τρεις συντελεστές οι οποίοι διαφοροποιούνται ανάλογα με την τραχύτητα του αγωγού. Η σχέση αυτή φαίνεται παρακάτω:

$$S_f = L \frac{Q^M}{D^N} \quad (3.10)$$

όπου Q είναι η παροχή σε m³/s, D είναι η διάμετρος σε m, S_f είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας σε (mm/m) και L, M, N είναι οι συντελεστές που εξαρτώνται από την τραχύτητα του αγωγού.

Οι Calmon και Lechart δίνουν έναν πίνακα (Πίνακας 2) που αντιστοιχίζει την ισοδύναμη τραχύτητα ε (που χρησιμοποιείται στη σχέση των Colebrook-White) με τους συντελεστές που χρησιμοποιούνται στη σχέση των Calmon και Lechart.

Πίνακας 2: Οι τιμές των παραμέτρων L, M, N του τύπου των Calmon-Lechart για διάφορους τύπους αγωγών (CEMAGREF, 1983)

ε (mm)	L	M	N	Comments
2	1.863	2	5.33	Uncoated steel (corrosive water)
1	1.601	1.975	5.25	Uncoated steel (slightly corrosive water)
0.5	1.400	1.96	5.19	Steel with cement coating
0.25	1.160	1.93	5.11	Steel with bitumen coating
0.1	1.100	1.89	5.01	Rolled steel
0.05	1.049	1.86	4.93	Steel centrifugally coated
0.025	1.010	1.84	4.88	Asbestos cement coated
0	0.916	1.78	4.78	0.05≤D≤0.2 Hydraulically smooth pipes
0	0.971	1.81	4.81	0.2<D<1 (D in m) Hydraulically smooth pipes

Στο μοντέλο που υλοποιήθηκε ενσωματώθηκαν όλοι οι παραπάνω τύποι γραμμικών απωλειών και δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τον τύπο που θα χρησιμοποιήσει για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας.

3.7 Γεννήτριες τυχαίων αριθμών

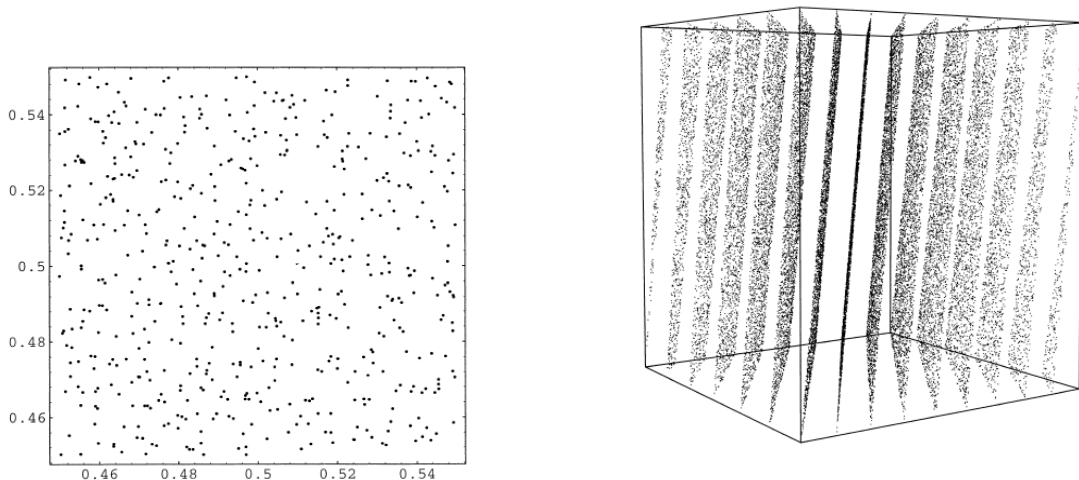
Οι τυχαίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται συστηματικά σε εφαρμογές που απαιτούν την προσομοίωση κάποιου φαινομένου, προκειμένου να αποτυπώσουν τη συμπεριφορά ενός μεγέθους που συμπεριφέρεται τυχαία. Για την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου και σε επίπεδο δικτύου πρέπει να δημιουργούνται τυχαίοι συνδυασμοί ανοιχτών υδροστομίων για κάθε προσομοίωση που απαιτείται, προκειμένου να προσομοιωθεί η τυχαία ζήτηση νερού από τους χρήστες του συλλογικού αρδευτικού δικτύου.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται γεννήτριες τυχαίων αριθμών που παράγουν αριθμούς οι οποίοι κυμαίνονται συνεχώς και ομοιόμορφα από το 0 έως το 1. Οι αριθμοί που παράγονται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών στην πραγματικότητα είναι ψευδοτυχαίοι μιας και δεν είναι πραγματικά τυχαίοι. Οι πραγματικά τυχαίοι αριθμοί προκύπτουν από τυχαία γεγονότα, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μια υπολογιστική διαδικασία προκειμένου να προκύψουν αριθμοί που κατανέμονται τυχαία σε ένα προκαθορισμένο διάστημα.

Διακρίνονται δύο βασικές προσεγγίσεις κατά τη δημιουργία τυχαίων αριθμών με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών: Υλοποίηση με γεννήτριες ψευδοτυχαίων αριθμών και υλοποίηση με γεννήτριες πραγματικά τυχαίων αριθμών. Στην πρώτη κατηγορία, χρησιμοποιείται μια αριθμητική και εντελώς ντετερμινιστική μέθοδος προκειμένου να παραχθεί ένας νέος τυχαίος αριθμός ο οποίος καθορίζεται από έναν ή περισσότερους από τους προηγούμενους αριθμούς με μια σταθερή μαθηματική φόρμουλα. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στην παρατήρηση ότι ουσιαστικά δεν έχουμε τυχαίους αριθμούς, αλλά ψευδο-τυχαίους αριθμούς. Ωστόσο, μια σωστά σχεδιασμένη γεννήτρια ψευδο-τυχαίων αριθμών, μπορεί να παράγει ακολουθίες αριθμών με «τυχαία» στατιστικά χαρακτηριστικά, και αυτό μπορεί να αποδειχθεί εάν οι ακολουθίες περάσουν με επιτυχία μια σειρά από στατιστικά τεστ. Για το λόγο αυτό και για ευκολία, οι ψευδο-τυχαίοι αριθμοί που παράγονται με τον τρόπο αυτό ονομάζονται «τυχαίοι αριθμοί». Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι γεννήτριες πραγματικά τυχαίων αριθμών οι οποίες σε αντίθεση με τις γεννήτριες ψευδο-τυχαίων αριθμών εξάγουν την τυχειότητα από φυσικά μεγέθη και την εισάγουν στην αλγοριθμική διαδικασία που υλοποιείται από τον υπολογιστή. Τα «φυσικά μεγέθη» που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς από γεννήτριες πραγματικά τυχαίων αριθμών είναι οι μεταβολές στην ένταση του ατμοσφαιρικού θορύβου, η

καυστέρηση μεταξύ περιστατικών ραδιενεργού διάσπασης, κα. Οι γεννήτριες αυτές παρόλο που παρουσιάζουν ορισμένα θετικά χαρακτηριστικά έναντι των γεννητριών ψευδο-τυχαίων αριθμών (πχ. η ακολουθία των αριθμών που παράγουν δεν επαναλαμβάνεται αν και η ίδια ακολουθία αριθμών μπορεί να εμφανιστεί τυχαία αρκετές φορές, κα) δεν είναι κατάλληλες για προσομοιώσεις, αλλά χρησιμοποιούνται ευρέως στην κρυπτογραφία, τα τυχερά παιχνίδια και άλλες εφαρμογές.

Για την παραγωγή ενός συνόλου ψευδο-τυχαίων αριθμών χρησιμοποιούνται οι γεννήτριες τυχαίων αριθμών δηλαδή προγράμματα τα οποία υλοποιούν αλγορίθμους σχεδιασμένους βάσει μιας στέρεης μαθηματικής ανάλυσης, που έχουν σκοπό να παράξουν αριθμούς οι οποίοι μιμούνται τις ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0,1)$ (L'Ecuyer, 2001). Κάθε γεννήτρια τυχαίων αριθμών έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και δεν υπάρχει μία γεννήτρια που να αποτελεί εξ ορισμού ασφαλή επιλογή για όλες τις εφαρμογές που απαιτούν τη χρήση τυχαίων αριθμών. Ο Hellekalek (1998) παρομοιάζει τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών με τα αντιβιωτικά προκειμένου να τονίσει το γεγονός ότι κάθε γεννήτρια έχει και τις αντίστοιχες «παρενέργειες». Για παράδειγμα, εξετάζοντας πιθανές συσχετίσεις μεταξύ των τυχαίων αριθμών x_0, x_1, \dots που παράγονται από μια γνωστή γεννήτρια τυχαίων αριθμών διαπίστωσε ότι παρόλο που δεν υπήρχαν συσχετίσεις ανάμεσα στα ζευγάρια (x_{2n}, x_{2n+1}) , $n=0,1$ υπήρχε έντονη συσχέτιση μεταξύ των τριάδων $(x_{3n}, x_{3n+1}, x_{3n+2})$. Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται στις παρακάτω εικόνες οι οποίες προέκυψαν από την παραγωγή 2^{15} τυχαίων αριθμών.



Εικόνα 19: (α) Αποτύπωση των ζευγών (x_{2n}, x_{2n+1}) όπου φαίνεται ότι δεν υπάρχει συσχέτιση και (β) των τριάδων $(x_{3n}, x_{3n+1}, x_{3n+2})$ όπου εμφανίζεται πολύ έντονη συσχέτιση

Η αξιοπιστία κάποιων γεννητριών τυχαίων αριθμών που είναι ενσωματωμένες σε εμπορικά πακέτα που χρησιμοποιούνται ευρέως έχει αμφισβητηθεί συστηματικά (L' Ecuyer, 1998; 2001). Η αξιοπιστία ορισμένων γεννητριών έχει εξεταστεί σε ότι αφορά συγκεκριμένες εφαρμογές στον τομέα της φυσικής (Coddington 1996; Cornejo Diaz et al., 2010) αλλά και στον τομέα της οικονομετρίας (McCullough, 2006). Σύμφωνα με τον McCullough (2006) μεταξύ των οικονομολόγων που γνωρίζουν ότι η αξιοπιστία κάποιων γεννητριών τυχαίων αριθμών τίθεται υπό αμφισβήτηση, υπάρχει μια απροθυμία από αυτούς να εξετάσουν τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που υιοθετούν μιας και θεωρούν ότι ακόμα και αν αποδείξουν ότι κάποια γεννήτρια αποτυγχάνει σε ένα ή περισσότερα τεστ στα οποία την υποβάλλουν, δεν θα μπορέσουν να εξηγήσουν αυτές τις αποτυχίες. Ωστόσο, σύμφωνα με τον McCullough η εξήγηση των αποτυχιών αυτών είναι αντικείμενο έρευνας για τους επιστήμονες που ασχολούνται με τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών και όχι για τους οικονομολόγους. Για έναν οικονομολόγο που καλείται να χρησιμοποιήσει μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών αρκεί να αποφύγει τις γεννήτριες εκείνες που αποτυγχάνουν σε ένα σημαντικό αριθμό πολύπλοκων τεστ. Ο αριθμός των τεστ που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των γεννητριών τυχαίων αριθμών είναι τεράστιος ενώ τα περισσότερα από αυτά τα τεστ είναι ιδιαίτερα περίπλοκα. Η λογική η οποία χρησιμοποιείται σε γενικές γραμμές για να διαχωρίσει μια καλή από μια κακή γεννήτρια τυχαίων αριθμών είναι η εξής:

Οι αναξιόπιστες γεννήτριες τυχαίων αριθμών αποτυγχάνουν ακόμα και σε απλά τεστ, ενώ οι καλές γεννήτριες τυχαίων αριθμών είναι αυτές που αποτυγχάνουν μόνο σε κάποια ιδιαίτερα περίπλοκα τεστ (L' Ecuyer, 2004).

Γεννήτριες τυχαίων αριθμών - Εφαρμογή

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός γεννητριών τυχαίων αριθμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές προσομοίωσης. Από το σύνολο των γεννητριών που είναι διαθέσιμες ενσωματώθηκαν στο μοντέλο οι τρεις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που φαίνονται στη συνέχεια:

- a) Mersenne Twister Generator (MT): Η γεννήτρια αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη μιας και έχει καταφέρει να περάσει αρκετά από τα τεστ στα οποία άλλες γεννήτριες αποτυγχάνουν. Χρησιμοποιείται από αρκετά λογισμικά μεταξύ των οποίων και τα ακόλουθα: SPSS, EViews (πακέτο για την υλοποίηση οικονομετρικών αναλύσεων, προσομοιώσεων, κ), GNU R (στατιστικό πακέτο).

Οι L'Ecuyer και Simard (2007) εφάρμοσαν ένα σύνολο από ελέγχους σε ένα μεγάλο αριθμό γεννητριών τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούνται ευρέως. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, η συγκεκριμένη γεννήτρια αποτυγχάνει μόνο σε δύο τεστ γραμμικής πολυπλοκότητας στα οποία όμως αποτυγχάνουν και πολλές άλλες γεννήτριες που εξετάστηκαν.

- b) Fast Random (XorShift generator-XorS): Σύμφωνα με τον Green (2004) η γεννήτρια αυτή είναι έως και οχτώ φορές γρηγορότερη από το System.Random (η γεννήτρια τυχαίων αριθμών που εμφανίζεται στο λογισμικό Microsoft Visual Studio 2008) το οποίο μπορεί να αντικαταστήσει άμεσα. Σύμφωνα με τη σύγκριση των L'Ecuyer και Simard (2007), το μειονέκτημα της γεννήτριας αυτής είναι ότι αποτυγχάνει σε τεστ που αφορούν τον έλεγχο της γραμμικής πολυπλοκότητας², μιας και εκ κατασκευής η ακολουθία των bit της γεννήτριας αυτής υπακούει σε συνθήκες γραμμικής επανάληψης.
- c) System.Random (.NET framework): Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών (System.Random) που εμφανίζεται στο λογισμικό της Microsoft Visual Studio ανήκει στην κατηγορία των γεννητριών απλής γραμμικής σύγκλισης (Linear Congruential Generators – LCGs). Σύμφωνα με τους L' Ecuyer και Simard (2007) οι γεννήτριες αυτής της μορφής αποτυγχάνουν σε πολλά τεστ και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή μιας και ανήκουν στις γεννήτριες που δίνουν πολύ κακά αποτελέσματα.

Επιλογή γεννήτριας τυχαίων αριθμών

Οι τρεις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που περιγράφονται παραπάνω ενσωματώθηκαν στο μοντέλο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση. Ωστόσο

² Η γραμμική πολυπλοκότητα (linear complexity) είναι μια μέτρηση η οποία εφαρμόζεται στις γεννήτριες ψευδοτυχαίων ακολουθιών που βασίζονται σε καταχωρητές ολίσθησης με γραμμική ανάδραση:

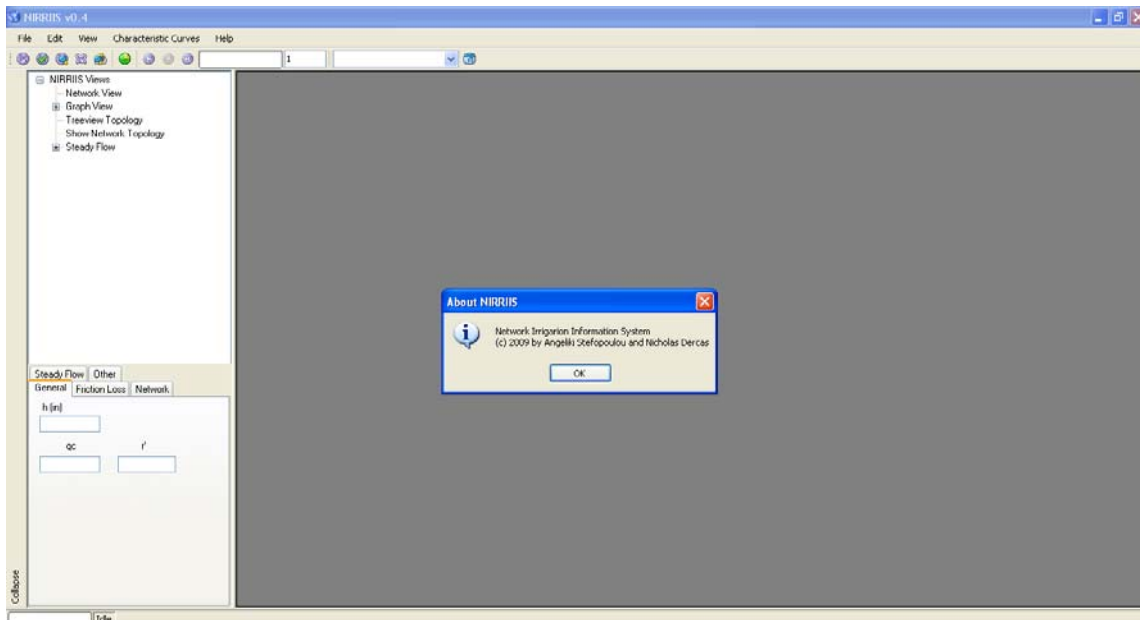
Έστω η ακολουθία $a = [a_1, a_2, \dots]$ και έστω a^n τα n πρώτα bits της ακολουθίας αυτής. Ως γραμμική πολυπλοκότητα της a^n ονομάζουμε τον ελάχιστο αριθμό στοιχείων, συμβολικά $LC(a^n)$, ενός καταχωρητή ολίσθησης, που απαιτούνται για να παραχθεί η ακολουθία a^n .

επιλέχθηκε ως προκαθορισμένη επιλογή η γεννήτρια τυχαίων αριθμών Mersenne Twister Generator (MT). Η συγκεκριμένη γεννήτρια έχει αξιολογηθεί εκτεταμένα και παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα (Cornejo Diaz et al., 2010; L'Ecuyer, 2001; Gentle et al., 2004; L' Ecuyer and Simard, 2007; L'Ecuyer. and Panneton, 2002).

Λόγω του ότι ο αλγόριθμος της γεννήτριας στηρίζεται στους Mersenne Πρώτους αριθμούς (Mersenne Primes), που θεωρούνται οι μεγαλύτεροι πρώτοι αριθμοί που είναι γνωστοί μέχρι σήμερα, η γεννήτρια παρουσιάζει περίοδο ίση με $2^{19937} - 1$. Η περίοδος αυτή θεωρείται πολύ μεγάλη, παρόλο που από μόνο του το μέγεθος της περιόδου μιας γεννήτριας δεν εξασφαλίζει ικανοποιητική τυχαιότητα. Επιπλέον η γεννήτρια παρουσιάζει ισοκατανομή σε 623 διαστάσεις. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με άλλα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης γεννήτριας τυχαίων αριθμών έχουν ως αποτέλεσμα η συγκεκριμένη γεννήτρια, σε αντίθεση με τις άλλες, να περνά με επιτυχία ένα μεγάλο αριθμό στατιστικών ελέγχων διαφόρων γνωστών πακέτων αξιολόγησης γεννητριών τυχαίων αριθμών (DIEHARD, TESTU01).

3.8 Λειτουργία του μοντέλου

Το λογισμικό Nirriis αναπτύχθηκε με τη χρήση τεχνικών αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (Object Oriented Programming) σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic .NET. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε αποτελεί ανεξάρτητη εφαρμογή και λειτουργεί αυτόνομα.

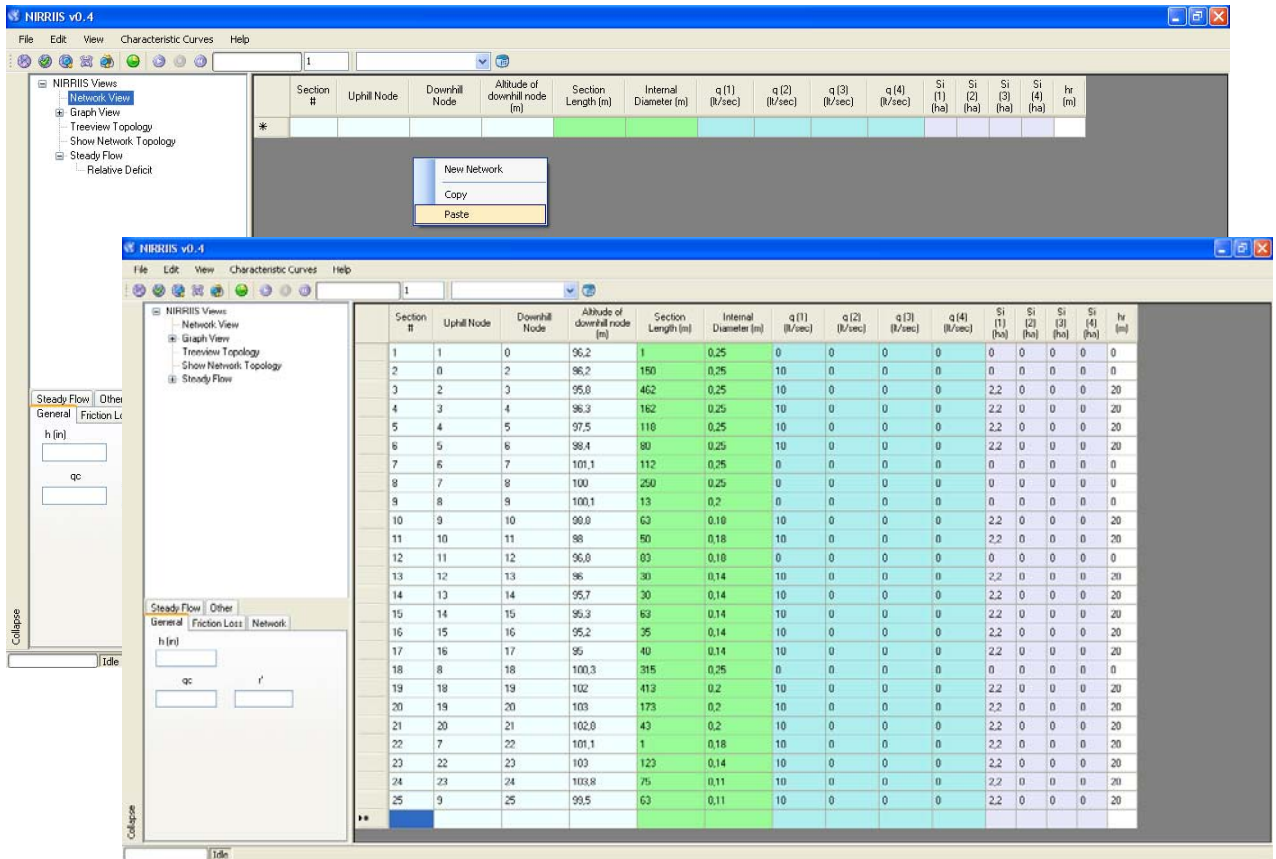


Εικόνα 20: Το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την ανάλυση της λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης

3.8.1 Εισαγωγή δεδομένων

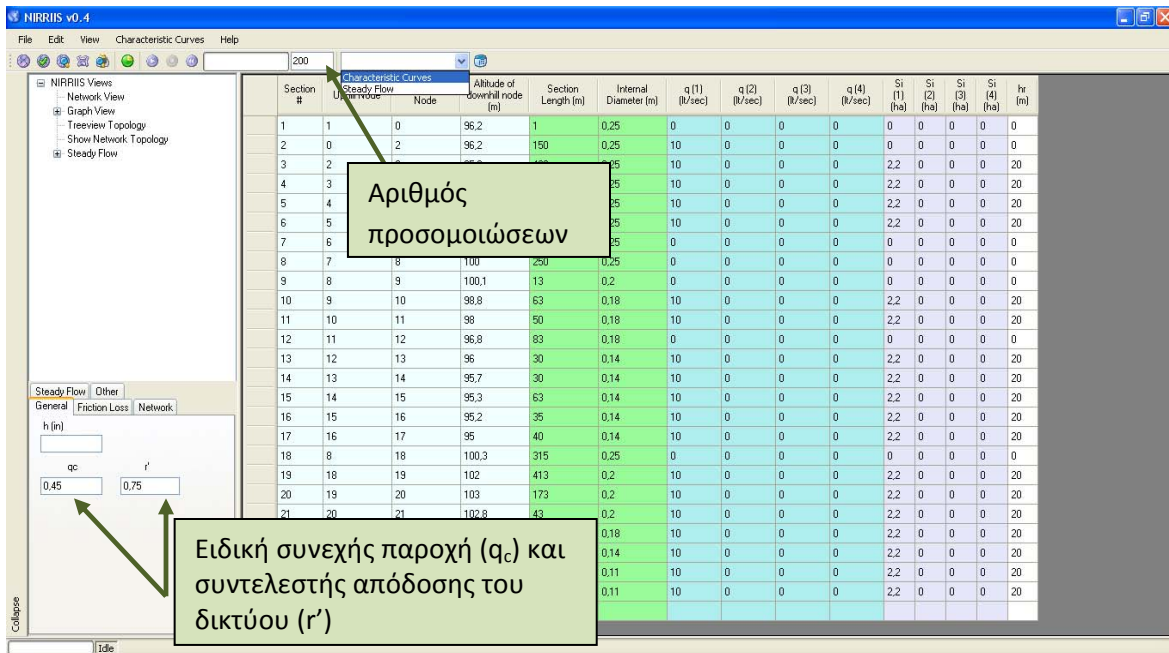
Για την υλοποίηση της ανάλυσης της λειτουργίας υπό πίεση συλλογικών αρδευτικών που λειτουργούν με καθεστώς ελεύθερης ζήτησης τόσο σε επίπεδο δικτύου όσο και σε επίπεδο υδροστομίου πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό που αναπτύχθηκε δεδομένα που αφορούν τη γεωμετρία του δικτύου και τα υδραυλικά του χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι ο αριθμός του αρχικού και τελικού κόμβου κάθε τμήματος αγωγού, το μήκος των αγωγών, το υψόμετρο στον κατάντη κόμβο κάθε αγωγού, τα υδροστόμια κατάντη κάθε αγωγού, οι διάμετροι των αγωγών και το ελάχιστο απαιτούμενο πιεζομετρικό φορτίο σε κάθε υδροστόμιο. Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται με τη μορφή πίνακα, και σε αντίθεση με τα υφιστάμενα διαθέσιμα λογισμικά ανάλυσης, η εισαγωγή μπορεί να γίνει με απλό τρόπο από ένα αρχείο .xls με απλή

αντιγραφή και επικόλληση. Ο όγκος των δεδομένων εισόδου που απαιτείται στην ανάλυση τέτοιου είδους δικτύων είναι σημαντικός με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η διαδικασία της ανάλυσης όταν η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται μεμονωμένα από το χρήστη. Η δυνατότητα αντιγραφής και επικόλλησης διευκολύνει σημαντικά την εισαγωγή των δεδομένων μιας και αποφεύγεται η χρονοβόρα εισαγωγή μεμονομένων εγγραφών που γίνεται στα αντίστοιχα υφιστάμενα λογισμικά ανάλυσης (Εικόνα 22).



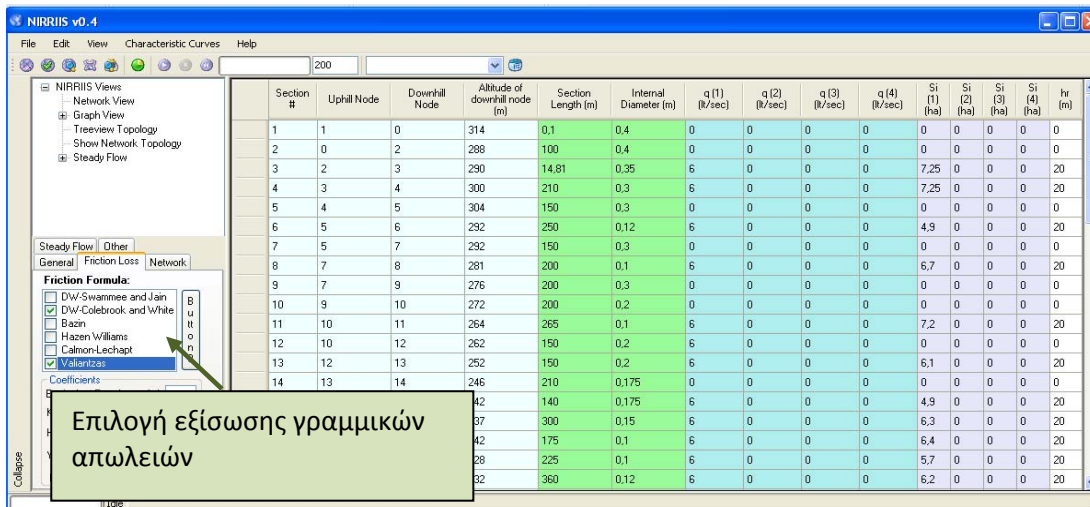
Εικόνα 21: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων που αφορούν τη γεωμετρία του συλλογικού δικτύου

Στη συνέχεια γίνεται επιλογή του επιπέδου ανάλυσης, στην περίπτωση που επιθυμούμε ανάλυση σε επίπεδο δικτύου επιλέγουμε από την αναπτυσσόμενη λίστα (dropdown menu) “Characteristic Curves”, ενώ εάν θέλουμε να γίνει ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου επιλέγουμε “Steady Flow”. Στο ίδιο παράθυρο γίνεται η εισαγωγή του αριθμού των προσομοιώσεων, της ειδικής συνεχούς παροχής και του χρονικού συντελεστή απόδοσης του δικτύου r' (Εικόνα 22).



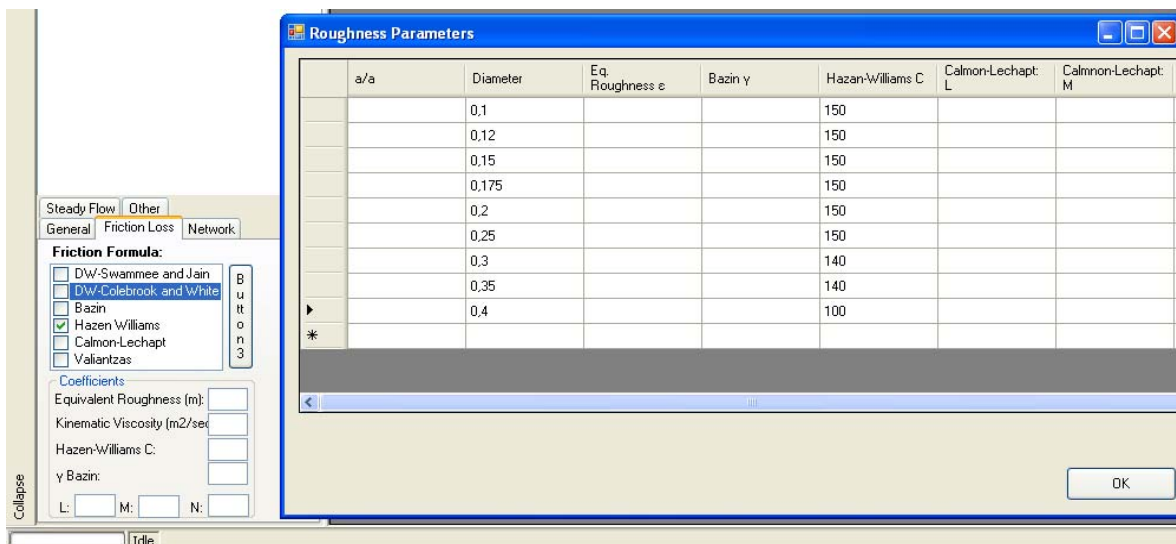
Εικόνα 22: Εισαγωγή δεδομένων προσομοίωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο που αναπτύχθηκε δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει την εξίσωση που θα χρησιμοποιήσει για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών. Οι γραμμικές απώλειες μπορούν να υπολογίζονται με μία από τις εξισώσεις που περιγράφονται στη συνέχεια (Εικόνα 23): εξίσωση των Darcy-Weisbach με την εξίσωση των Colebrook-White για τον υπολογισμό του συντελεστή γραμμικών απωλειών (DW-CW), η εξίσωση των Darcy-Weisbach με τη σχέση των Swamee και Jain (DW-SJ), η σχέση των Hazen –Williams (HW), η εξίσωση του Darcy με την παράμετρο γ του Bazin (Darcy-Bazin), η εξίσωση των Calmon και Lechapt (Calmon-Lechapt) και η εξίσωση του Valiantzas (2008) (Valiantzas).



Εικόνα 23: Επιλογή εξίσωσης για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών

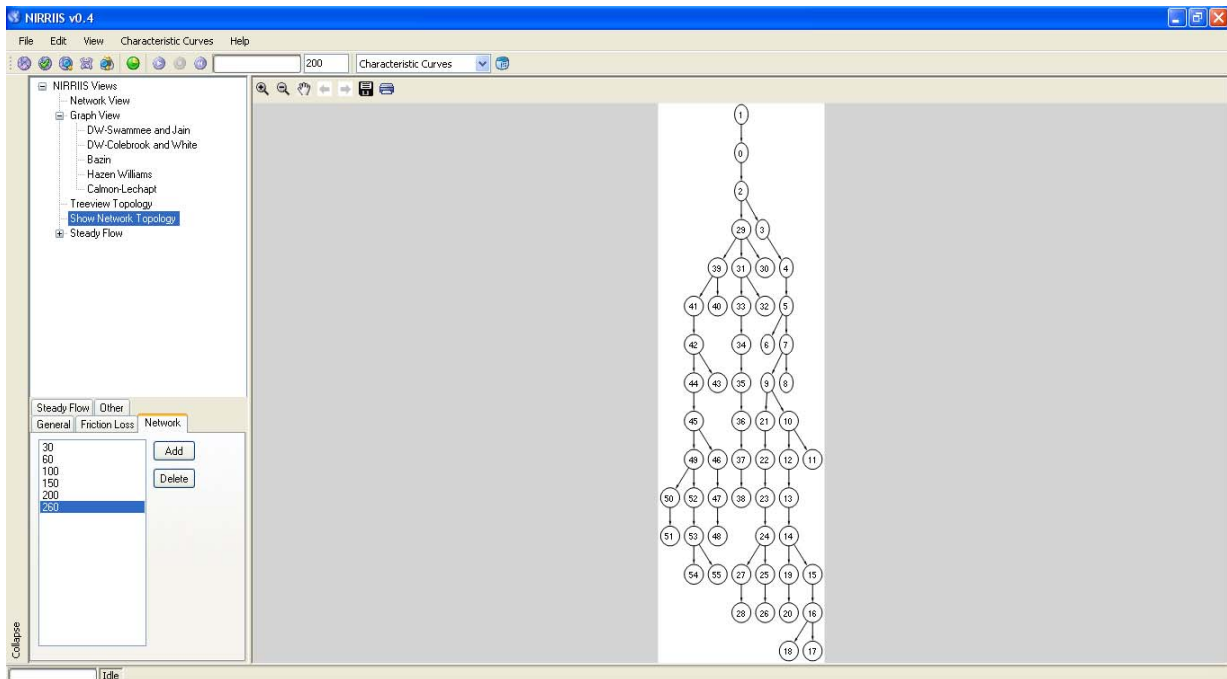
Με την επιλογή της εξίσωσης που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών, ο χρήστης πρέπει να εισάγει την τραχύτητα που αντιστοιχεί σε κάθε διάμετρο που χρησιμοποιείται στο δίκτυο ανάλογα με την εξίσωση γραμμικών απωλειών που έχει επιλέξει (Εικόνα 24).



Εικόνα 24: Εισαγωγή συντελεστών τραχύτητας

Στο σημείο αυτό, τα απαραίτητα δεδομένα έχουν εισαχθεί και ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει το τρέξιμο του μοντέλου. Πριν γίνει αυτό ωστόσο, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να τσεκάρει ότι έχει εισάγει σωστά τα δεδομένα της τοπολογίας του δικτύου που θα εξετάσει. Έτσι, με την επιλογή "Show network topology" παρουσιάζεται το δίκτυο που

θα εξεταστεί σε δενδρώδη διάταξη σύμφωνα με την αρίθμηση που έχει δοθεί στους κόμβους. Η παρουσίαση αυτή βοηθά στον εντοπισμό λαθών στην αρίθμηση που θα είχαν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ασυνεχειών στο δίκτυο ή τη λανθασμένη σύνδεση αγωγών και κατά συνέπεια την αδυναμία εφαρμογής του μοντέλου ανάλυσης λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης. Η εικόνα της δενδρώδους διάταξης του εξεταζόμενου δικτύου είναι της μορφής που ακολουθεί:



Εικόνα 25: Παρουσίαση της τοπολογίας του δικτύου σε δενδρώδη διάταξη

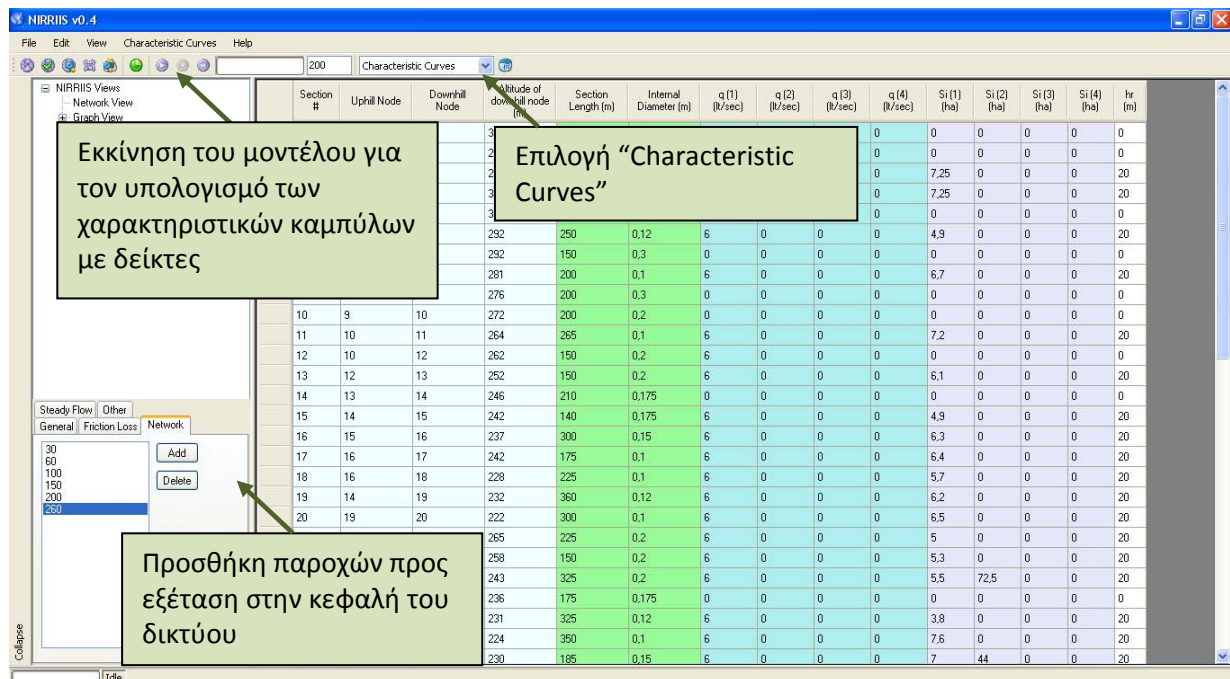
3.8.2 Ανάλυση της λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες προσφέρουν μια γενική εικόνα της λειτουργικής απόδοσης ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου ελεύθερης ζήτησης. Οι καμπύλες αυτές μας επιτρέπουν να γνωρίζουμε το ποσοστό ικανοποίησης μιας ζητούμενης παροχής Q , για ένα δεδομένο φορτίο Z στην κεφαλή του δικτύου.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες πρέπει να εισαχθεί από το χρήστη ένας αριθμός παροχών στην κεφαλή του δικτύου που επιθυμεί να εξεταστούν. Οι παροχές αυτές είναι μικρότερες ή ίσες με την αθροιστική παροχή του

δικτύου, δηλαδή την παροχή που αντιστοιχεί στο άθροισμα των ονομαστικών παροχών όλων των υδροστομιών του δικτύου.

Στην εικόνα 26 έχουν προστεθεί έξι παροχές στην κεφαλή του δικτύου προκειμένου να χαραχθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες. Ο χρήστης μπορεί να προσθέσει ή να αφαιρέσει τιμές από τη λίστα των παροχών. Αφού προστεθούν οι παροχές στην κεφαλή που θα εξεταστούν, και εισαχθεί από την αντίστοιχη λίστα η επιλογή “Characteristic Curves”, ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει τις προσομοιώσεις ώστε να υλοποιηθεί το μοντέλο των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες. Όσο μεγαλύτερος αριθμός παροχών που θα εισαχθεί προς εξέταση, τόσο ακριβέστερα θα χαραχθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες.



Εικόνα 26: Εισαγωγή δεδομένων για την ανάλυση σε επίπεδο δικτύου

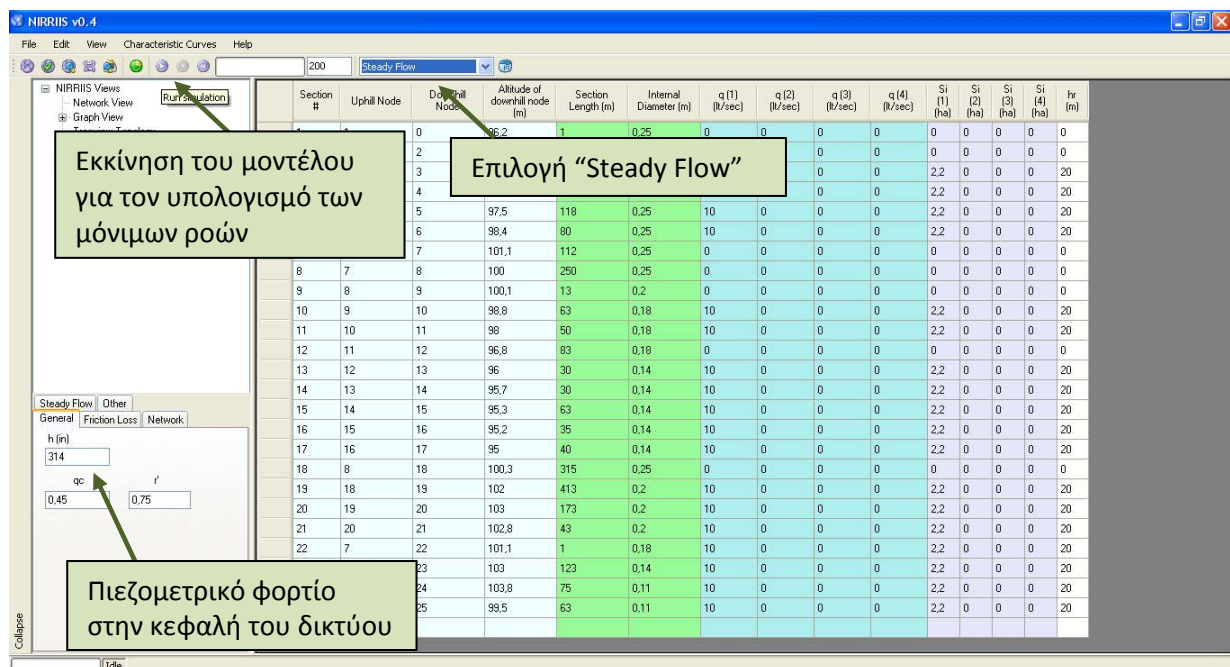
3.8.3 Ανάλυση της λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου

Για την αξιολόγηση της ποιότητας λειτουργίας ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου ελεύθερης ζήτησης, έχει ενδιαφέρον να υπολογίσουμε τις παροχές και τις πιέσεις που θα προσφέρονται στην πραγματικότητα από τα υδροστόμια του δικτύου, δεδομένης μιας συγκεκριμένης ζητούμενης παροχής στην κεφαλή του δικτύου. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να βασιστούμε σε ένα σημαντικό αριθμό προσομοιώσεων για διάφορους

τυχαίους συνδυασμούς ανοιχτών-κλειστών υδροστομιών που ζητούν στην κεφαλή παροχή ίση με αυτή που θέλουμε να μελετήσουμε.

Από κάθε προσομοίωση, προκύπτουν οι παροχές και οι πιέσεις των υδροστομιών για το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομιών οι οποίες μπορεί να είναι ίσες ή μικρότερες της ονομαστικής τους παροχής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υλοποίηση ενός σημαντικού αριθμού προσομοιώσεων, μπορούν να επεξεργαστούν στατιστικά και να προκύψει με τον τρόπο αυτό η πιθανότητα ενός υδροστομίου να αποτύχει να δώσει το ονομαστικό του φορτίο πίεσης, αλλά και η έκταση αυτής της αποτυχίας.

Για την υλοποίηση της ανάλυσης σε επίπεδο υδροστομίου, ο χρήστης καλείται να εισάγει το διαθέσιμο πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή και να επιλέξει “Steady flow” από το αντίστοιχο μενού (Εικόνα 27).



Εικόνα 27: Εισαγωγή δεδομένων για την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου

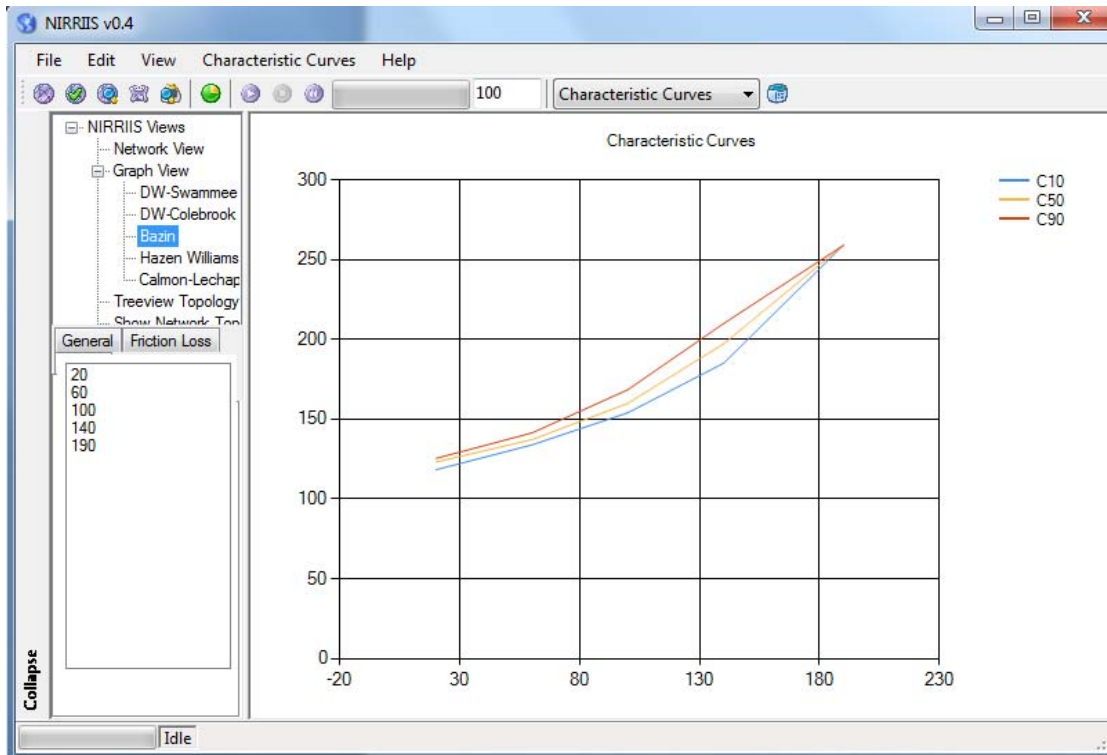
3.8.4 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στην περίπτωση της **ανάλυσης σε επίπεδο δικτύου**, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το τρέξιμο του μοντέλου είναι το πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου που προκύπτει σε καθεμιά από τις προσομοιώσεις και για κάθε μια από τις εξεταζόμενες παροχές στην κεφαλή του δικτύου (Πίνακας 3). Οι τιμές αυτές του πιεζομετρικού φορτίου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ποσοστημορίων (quantiles) στη συνέχεια προκειμένου να χαραχθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (Εικόνα 28).

Πίνακας 3: Παρουσίαση αποτελεσμάτων από την ανάλυση σε επίπεδο δικτύου

Q(l/s)= 20	Q(l/s)= 60	Q(l/s)= 100	Q(l/s)= 140	Q(l/s)= 190
116,1433	119,5784	127,8558	140,8053	174,4208
116,1652	119,8507	127,9670	141,3955	174,4208
116,3522	119,9666	128,1298	141,9687	174,4208
116,3948	120,0082	128,4401	142,2361	174,4208
116,4603	120,0086	128,4405	142,3400	174,4208
116,5177	120,6232	128,4952	142,7140	174,4208
116,5937	120,7290	128,8721	143,0327	174,4208
116,6310	120,7813	129,0373	143,5536	174,4208
116,7227	120,8271	129,2549	143,9399	174,4208
116,7939	120,9490	129,6796	143,9966	174,4208
...

Από τον παραπάνω πίνακα, με τον προσδιορισμό των ποσοστημορίων προκύπτει το διάγραμμα των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες, που είναι της μορφής που φαίνεται στη συνέχεια. Πρέπει να σημειωθεί ότι δίνεται από το πρόγραμμα η δυνατότητα να εμφανιστούν όλες (C_{10} , C_{20} , ..., C_{90}) ή κάποιες από τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες ανάλογα με το σκοπό της ανάλυσης που υλοποιείται (Εικόνα 28).



Εικόνα 28: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες που προέκυψαν από την ανάλυση σε επίπεδο δικτύου

Στην περίπτωση της **ανάλυσης σε επίπεδο υδροστομίου**, προκύπτει ένας πίνακας που αναφέρει για κάθε υδροστόμιο του δικτύου το μέγιστο, ελάχιστο και μέσο φορτίο πίεσης που εμφάνισε για τη συγκεκριμένη εξεταζόμενη παροχή στην κεφαλή του δικτύου, βάσει των αποτελεσμάτων από το σύνολο των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Στην περίπτωση κόμβων χωρίς υδροστόμια οι αντίστοιχες τιμές είναι ίσες με το μηδέν. Προκύπτει επίσης ένας πίνακας όπου εμφανίζεται για κάθε κατάντη κόμβο, η τιμή του δείκτη αξιοπιστίας του Hashimoto. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα φορτία πίεσης που εμφάνισε κάθε υδροστόμιο του δικτύου σε καθεμιά από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Οι πίνακες που προκύπτουν είναι της μορφής που φαίνεται στη συνέχεια (Πίνακας 4):

Πίνακας 4: Παρουσίαση αποτελεσμάτων της ανάλυσης σε επίπεδο υδροστομίου. (α) Μέγιστο, ελάχιστο και μέσο φορτίο πίεσης σε κάθε κόμβο, (β) Συντελεστής Hashimoto για κάθε υδροστόμιο, (γ) φορτίο πίεσης σε κάθε κατάντη κόμβο και σε κάθε προσομοίωση.

Κατάντη κόμβος	Μέγιστο φορτίο πίεσης (m)	Ελάχιστο φορτίο πίεσης (m)	Μέσο φορτίο πίεσης (m)
1	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00
3	40,68	40,09	40,52
4	41,84	40,52	41,51
5	42,16	40,01	41,68
6	42,10	39,94	41,55
7	43,08	40,39	42,45
8	44,16	41,07	43,52
9	44,34	41,08	43,64
10	44,28	40,63	43,54
11	44,62	40,55	43,76

Κατάντη κόμβος	Hashimoto's reliability indicator
1	0
2	0
3	1
4	1
...	...
136	1
137	1
138	0,99543379
139	1
140	0,854460094

Κατάντη κόμβος	Φορτίο πίεσης (m)
382	34,5860
382	30,0205
382	0,0000
382	0,0000
382	35,1041
382	36,1730
382	36,5352
382	34,9325
382	33,5843
382	35,8706
382	34,5775
382	34,3960

Επαλήθευση του μοντέλου

Για την επαλήθευση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκε ένα ελληνικό δίκτυο (δίκτυο Καλυβίων-Σοχά) για το οποίο έγινε ανάλυση της λειτουργίας του με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες με το νέο μοντέλο και με το ICARE.

Λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά του δικτύου των Καλυβίων-Σοχά παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στο επόμενο κεφάλαιο (Παράγραφος 4.1). Αρχικά το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά θεωρήθηκε επίπεδο.

Η σύγκριση των δύο μοντέλων έγινε για 8 παροχές στην κεφαλή του δικτύου (20 l/s, 40 l/s, 60 l/s, 100 l/s, 140 l/s, 180 l/s, 220 l/s, 246l/s) και για 200 προσομοιώσεις.

Υπολογίστηκε το Root Mean Square Error (RMSE) που προέκυψε από τη σύγκριση των πιεζομετρικών φορτίων στην κεφαλή για κάθε εξεταζόμενη παροχή στην κεφαλή και για κάθε χαρακτηριστική καμπύλη.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου στην κεφαλή του δικτύου όπως υπολογίστηκαν, για κάθε χαρακτηριστική καμπύλη με δείκτες (C_{10} , C_{20} , ..., C_{90}) και για κάθε παροχή στην κεφαλή που εξετάστηκε, ενώ για κάθε παροχή δίνεται η τιμή του RMSE που προέκυψε από τη σύγκριση των δύο προγραμμάτων. Τελικά, το μέσο RMSE ήταν 0,22.

Πίνακας 5: Πιεζομετρικά φορτία στην κεφαλή για κάθε εξεταζόμενη παροχή και για κάθε χαρακτηριστική καμπύλη.

ICARE								
	20l/s	40l/s	60l/s	100l/s	140l/s	180l/s	220l/s	246l/s
C20	221,5	222,13	223,07	225,82	228,51	232,52	235,62	238,61
C30	221,69	222,25	223,63	226,16	228,98	232,81	235,96	238,61
C40	221,83	222,53	223,93	226,68	229,4	233,13	236,2	238,61
C50	222	223,11	224,21	227,13	229,83	233,4	236,57	238,61
C60	222,2	223,45	224,56	227,57	230,32	233,79	236,89	238,61
C70	223,25	223,85	224,97	228,11	230,74	234,27	237,19	238,61
C80	223,42	224,2	225,39	228,99	231,24	234,75	237,46	238,61
C90	223,67	224,87	226,78	229,84	232,07	235,29	237,61	238,61
NEO MONTELO								
C10	220,7321	221,7283	222,518	224,7688	227,713	231,6623	235,3956	238,6021
C20	221,08	221,9501	222,9423	225,3032	228,2363	232,3523	235,6138	238,6021
C30	221,272	222,1681	223,4242	225,719	229,1865	232,8832	235,9923	238,6021
C40	221,4864	222,3617	223,7557	226,3166	229,4761	233,4516	236,2099	238,6021
C50	221,7305	223,0177	224,0672	226,6895	229,816	233,7442	236,4954	238,6021
C60	221,9572	223,394	224,5736	227,3565	230,2914	234,0645	236,9719	238,6021
C70	222,5412	223,6695	224,8516	227,9197	230,7612	234,2586	237,1866	238,6021
C80	223,2394	223,9822	225,6469	228,5308	231,1305	234,8198	237,4497	238,6021
C90	223,3207	224,547	226,9436	229,3268	231,7382	235,7582	237,7242	238,6021
RMSE	0,419032	0,176613	0,155429	0,43075	0,165721	0,251947	0,15506	0,007898
Average RMSE:	0,220306							

4. Εφαρμογές σε υφιστάμενα ελληνικά δίκτυα

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε, εφαρμόστηκε σε δύο αντιπροσωπευτικά ελληνικά δίκτυα, το δίκτυο των Ιρίων στην Αργολίδα και το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά στο νομό Λακωνίας. Τα δύο αυτά δίκτυα είναι υπό πίεση συλλογικά αρδευτικά δίκτυα που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση.

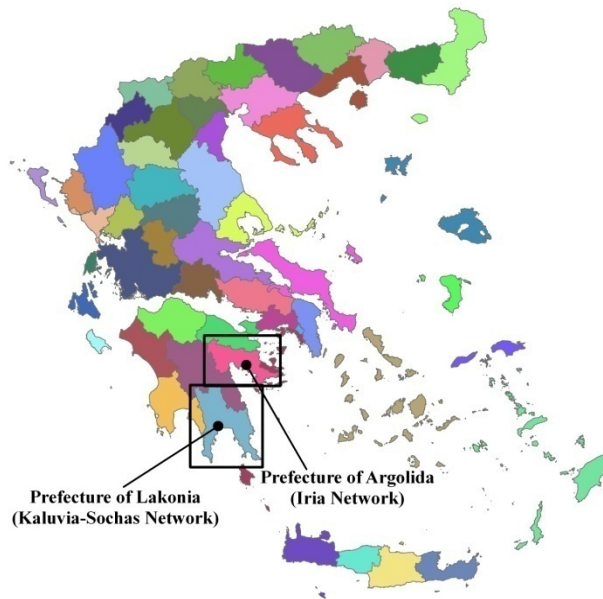
Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των παρακάτω εφαρμογών:

- a) Επίδραση του τύπου των γραμμικών απωλειών στην ανάλυση λειτουργίας υπό πίεση συλλογικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης σε επίπεδο δικτύου, με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες (Steforoulou and Dercas, 2012).
- b) Επίδραση του τύπου των γραμμικών απωλειών στην ανάλυση λειτουργίας υπό πίεση συλλογικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης σε επίπεδο υδροστομίου.
- c) Ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας , στην ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου.

Για την υλοποίηση των παραπάνω εφαρμογών, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις: η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την εξίσωση των Colebrook-White για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας (DW-CW), η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την σχέση των Swamee και Jain (DW-SJ), η σχέση των Hazen –Williams (HW), η εξίσωση του Darcy με την παράμετρο γ του Bazin (Darcy-Bazin), η εξίσωση των Calmon και Lechapt (Calmon-Lechapt) και η εξίσωση του Valiantzas (2008) (Valiantzas).

4.1 Αντιπροσωπευτικά συλλογικά αρδευτικά δίκτυα

Τα δύο αντιπροσωπευτικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν το δίκτυο των Ιρίων, στη νοτιοανατολική πλευρά της Αργολίδας και το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά στο νομό Λακωνίας (Εικόνα 29).



Εικόνα 29: Η θέση των δύο συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν

Δίκτυο Ιρίων

Η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται στο Νοτιοανατολικό τμήμα του νομού Αργολίδας στην περιοχή των Ιρίων, σε απόσταση περίπου 20km από το Ναύπλιο. Διοικητικά ανήκει στην επαρχία Ναυπλίας του Νομού Αργολίδας. Το υψόμετρο της περιοχής κυμαίνεται μεταξύ 0-33m. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι επίπεδο με κλίσεις μεταξύ 4‰ και 7‰. Λόγω της μικρής κλίσης τους τα εδάφη της περιοχής δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης.

Στην περιοχή παρουσιάζονται πέντε τύποι εδαφών: Αμμοπηλώδη (SL), Πηλώδη (L), Αμμοαργιλοπηλώδη (SCL), Αργιλοπηλώδη (CL) και Αργιλώδη (C). Γενικά είναι εδάφη μέσης σύστασης, αλκαλικής αντίδρασης και είναι εφοδιασμένα με CaCO_3 .

Το κλίμα της περιοχής είναι Μεσογειακού τύπου με λίγες βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα και με υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα κυμαίνεται μεταξύ $10,2^\circ\text{C}$ τον Ιανουάριο και $28,2^\circ\text{C}$ τον Ιούλιο. Έτσι, το μέσο ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος είναι 18°C και η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι $18,6^\circ\text{C}$. Η μέση μηνιαία σχετική υγρασία αέρα κυμαίνεται από 77,3% το Νοέμβριο μέχρι 54,0% τον Ιούλιο. Το ετήσιο ύψος βροχής είναι 404,3mm. Το υψηλότερο μέσο ύψος βροχής εμφανίζεται το Δεκέμβριο φτάνοντας τα 72,85mm και το μικρότερο τον Ιούλιο με 0,3mm. Το ύψος βροχής κατά τη διάρκεια της τυπικής αρδευτικής περιόδου (Μάιος-Σεπτέμβριος) είναι 2,3mm. Αυτή η ποσότητα είναι εξαιρετικά μικρή σε σχέση με τις ανάγκες των φυτών και σε συνδυασμό με το κακής ποιότητας αρδευτικό νερό που προέρχεται από τον υποβαθμισμένο με θαλασσινό νερό υπόγειο ορίζοντα, οδηγεί σε αρκετά χαμηλές αποδόσεις στις μη ανθεκτικές στα άλατα καλλιέργειες. Στην περιοχή πνέουν μικρής έντασης άνεμοι, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή της άρδευσης με μικροεκτοξευτήρες ή *sprayers*. Παγετοί συνήθως δεν παρατηρούνται στην περιοχή και έτσι μπορούν να καλλιεργηθούν φυτά ευπαθή στο ψύχος όπως πρώιμα λαχανικά κλπ. Οι μήνες με τη μεγαλύτερη διάρκεια ηλιοφάνειας είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος με 327 και 311 ώρες αντίστοιχα. Το κλίμα της περιοχής με βάση το συντελεστή Lang χαρακτηρίζεται κατά Gracaniπ σαν υπερξηρο. Υπέρξηρη είναι η περίοδος Απριλίου-Σεπτεμβρίου. Υγρή περίοδος μπορεί να θεωρηθεί μόνο η περίοδος Δεκεμβρίου (Αργυροκαστρίτης, 1999).

Ο μέσος γεωργικός κλήρος στην περιοχή φτάνει περίπου τα 57 στρέμματα καλλιεργούμενης γης. Οι καλλιεργούμενες εκτάσεις αποτελούν το 52,9% της συνολικής καλλιεργούμενης έκτασης. Η άρδευση των καλλιεργειών γίνεται κυρίως με μικροεκτοξευτήρες, *sprayers* και σταγόνες. Οι κυριότερες καλλιέργειες στην περιοχή είναι σε μεγάλο ποσοστό τα λαχανικά (75% περίπου) όπως αγκινάρες, μαρούλια, ντομάτα, κλπ, τα εσπεριδοειδή (8%) και οι ελαιοποιήσιμες ελιές (5%), ενώ το ποσοστό της αγρανάπαυσης είναι αρκετά μικρό (1%).

Δίκτυο Καλυβίων-Σοχά

Το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά βρίσκεται στους ανατολικούς πρόποδες του Ταύγétου και ανήκει στην κοινότητα Καλυβίων-Σοχά του νομού Λακωνίας η οποία απέχει 8km περίπου από τη Σπάρτη.

Το υψόμετρο εδάφους στην περιοχή κυμαίνεται μεταξύ 220-280m, ενώ το ανάγλυφο παρουσιάζει μέση κλίση της τάξεως του 4%. Η δεξαμενή του έργου ωστόσο βρίσκεται σε υψόμετρο 314m. Το έδαφος της περιοχής είναι μέσης έως ελαφράς σύστασης, ελαφρώς χαλικώδες και μέσου βάθους.

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία των πλησιέστερων μετεωρολογικών σταθμών (Σπάρτης και Σελλασίας) το κλίμα της περιοχής είναι μεσογειακό, και χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες και θερμά καλοκαίρια. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα κυμαίνεται μεταξύ 7,1°C τον Ιανουάριο και 25,4°C τον Ιούλιο. Το ετήσιο ύψος βροχής είναι 790,4mm. Το υψηλότερο μέσο ύψος βροχής εμφανίζεται το Δεκέμβριο φτάνοντας τα 130,6mm και το μικρότερο τον Ιούλιο με 11,0mm. Το ύψος βροχής κατά τη διάρκεια της τυπικής αρδευτικής περιόδου (Μάιος-Σεπτέμβριος) είναι 151,7mm. Στην περιοχή πνέουν μικρής έντασης άνεμοι διαφόρων διευθύνσεων, που επιτρέπουν την εφαρμογή της άρδευσης με καταιονισμό. Με βάση το συντελεστή Lang, το κλίμα της περιοχής κατά την περίοδο Ιουνίου- Σεπτεμβρίου χαρακτηρίζεται κατά Gracani σαν υπέρξηρο.

Η συνολικά καλλιεργούμενη έκταση είναι 3500 στρέμματα. Οι κυριότερες καλλιέργειες σύμφωνα με την αρχική μελέτη ανήκουν στις ακόλουθες κατηγορίες: ελιές (80,7%), εσπεριδοειδή (4,7%), σιτηρά και ψυχανθή (3,3%), αραβόσιτος (1,4%), κηπευτικά (1,0%). Κατά την περίοδο εκπόνησης της αρχικής μελέτης, αρδευόταν μόλις το 7,6% του συνόλου της καλλιεργούμενης έκτασης.

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των παραπάνω δικτύων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά λειτουργίας των δύο δικτύων

	Δίκτυο Ιρίων	Δίκτυο Καλυβίων-Σοχά
Πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου	46,7m	314m
Αριθμός υδροστομίων	318	44
Αρδευόμενη έκταση	954 ha	300 ha
Ονομαστική παροχή υδροστομίων	6l/s	6l/s
Απαιτούμενο φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο	20m	20m
Παροχή Clément	411.38 l/s	196 l/s
Αθροιστική παροχή	1908 l/s	264 l/s
Συνολικό μήκος αγωγών	45179m	10915m
Υλικό αγωγών	Χάλυβας (ø600mm έως ø800mm) και PVC (≤ø500mm)	Χάλυβας (ø400), αμιαντοτσιμέντο (ø300 και ø350), και PVC (≤ø250)

4.2 Επίδραση του τύπου απωλειών στην ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου

4.2.1 Μεθοδολογία

Στην εφαρμογή αυτή εξετάζεται η επίδραση της εξίσωσης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών, στην ανάλυση της λειτουργίας υπό πίεση συλλογικών αρδευτικών δικτύων που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση σε επίπεδο δικτύου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται το δίκτυο των Ιρίων και το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά, που είναι συλλογικά δίκτυα που λειτουργούν με ελεύθερη ζήτηση. Για τα δίκτυα αυτά σχεδιάστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες με όλες τις εξεταζόμενες εξισώσεις, οι οποίες ήταν οι παρακάτω: η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την εξίσωση των Colebrook-White για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας (DW-CW), η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την σχέση των Swamee και Jain (DW-SJ), η σχέση των Hazen –Williams (HW), η εξίσωση του Darcy με την παράμετρο γ του Bazin (Darcy-Bazin), η εξίσωση των Calmon και Lechapt (Calmon-Lechapt) και η εξίσωση του Valiantzas (2008) (Valiantzas). Για τα υπό μελέτη δίκτυα, σχεδιάστηκε η χαρακτηριστική καμπύλη C_{50} με όλες τις προαναφερθείσες εξισώσεις και στη συνέχεια έγινε σύγκριση αυτών με τη χαρακτηριστική καμπύλη C_{50} που σχεδιάστηκε με την εξίσωση DW-CW (εξίσωση αναφοράς).

Είναι γνωστό ότι η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την εξίσωση των Colebrook-White για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας (DW-CW) θεωρείται ο ακριβέστερος τρόπος υπολογισμού των γραμμικών απωλειών. Ωστόσο, δεν υιοθετείται από τα υφιστάμενα λογισμικά ανάλυσης συλλογικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης, μιας και ο υπολογισμός των γραμμικών απωλειών βάσει μιας άρρητης εξίσωσης θα αύξανε σημαντικά το χρόνο της ανάλυσης δεδομένου ότι τα προγράμματα αυτά δημιουργήθηκαν αρκετά χρόνια νωρίτερα όταν οι ταχύτητες επεξεργασίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών δεν ήταν μεγάλες. Έτσι, το ICARE χρησιμοποιεί την εξίσωση των Calmon και Lechapt (Calmon-Lechapt) ενώ το COPAM την εξίσωση του Darcy με την παράμετρο γ του Bazin (Darcy-Bazin).

Στην εφαρμογή αυτή θέλουμε να διερευνήσουμε τι επίπτωση έχει στην ανάλυση μέσω των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες η χρήση αυτών των ρητών εξισώσεων και να εξετάσουμε και κάποιες άλλες νεώτερες.

Το δίκτυο των Ιρίων είναι εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα και PVC. Το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά είναι εξοπλισμένο με αγωγούς από αλουμίνιο, αμιαντοσιμέντο, και PVC. Στην ανάλυση που ακολουθεί, τα δίκτυα εξετάστηκαν αρχικά υποθέτοντας ότι είναι εξοπλισμένα με ένα υλικό αγωγών (χάλυβα και PVC για το δίκτυο των Ιρίων και χάλυβα, αμιαντοσιμέντο και PVC για το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά). Παρόλο που η χρήση ενός υλικού για όλες τις διαμέτρους των αγωγών δεν υλοποιείται στην πράξη για οικονομικούς λόγους (στην πράξη συνήθως οι αγωγοί από PVC χρησιμοποιούνται για τις μικρές διαμέτρους και οι αγωγοί από χάλυβα ή αμιαντοσιμέντο χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες διαμέτρους), εδώ υιοθετήθηκε η παραδοχή αυτή προκειμένου να παρουσιαστούν ξεχωριστά τα αποτελέσματα για κάθε υλικό. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η λειτουργία των δύο δικτύων υιοθετώντας τα πραγματικά υλικά για κάθε αγωγό του δικτύου.

Για τις εξισώσεις των DW-CW, DW-SJ, HW και Valiantzas, υιοθετήθηκαν οι συντελεστές τραχύτητας για κάθε υλικό σύμφωνα με τους Keller και Bliesner (1990). Για τις εξισώσεις των Calmon και Lechart και για την εξίσωση του Darcy σε συνδυασμό με την παράμετρο του Bazin, υιοθετήθηκαν οι τιμές για τους αντίστοιχους συντελεστές από τα εγχειρίδια των λογισμικών που υλοποιούν τις εξισώσεις αυτές (Πίνακας 1 και Πίνακας 2). Συγκεκριμένα, οι τιμές των συντελεστών για την εξίσωση των Calmon και Lechart επιλέχθηκαν βάσει της αντιστοιχίας τιμής τις ισοδύναμης τραχύτητας όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 2. Η ίδια προσέγγιση ακολουθήθηκε και για την εξίσωση του Darcy σε συνδυασμό με την παράμετρο του Bazin, για τους αγωγούς από χάλυβα και αμιαντοσιμέντο (Πίνακας 1). Για το PVC η τιμή της παραμέτρου του Bazin γ λείπει από τον πίνακα και γι' αυτό υιοθετήθηκε σύμφωνα με το παράδειγμα του εγχειριδίου του COPAM η τιμή $\gamma=0.06$. Οι τιμές των διάφορων συντελεστών των εξισώσεων υπολογισμού των γραμμικών απωλειών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

Πίνακας 7: Οι τιμές των συντελεστών τραχύτητας που υιοθετήθηκαν για τα δίκτυα των Ιρίων και των Καλυβίων-Σοχά

	DW-CW and DW-SJ and Valiantzas (2008) ⁽¹⁾	Hazen-Williams ⁽²⁾	Calmon and Lechapt ⁽³⁾	Darcy -Bazin roughness parameter γ ⁽⁴⁾
PVC	$\varepsilon=0.013$ mm	C=150	L=0.971 M=1.81 N=4.81	$\gamma=0.06$
Steel (old)	$\varepsilon=1.52$ mm	C=100	L=1.601 M=1.975 N=5.25	$\gamma=0.23$
Asbestos-Cement	$\varepsilon=0.076$ mm	C=140	L= 1.049 M= 1.86 N=4.93	$\gamma=0.06$
⁽¹⁾ : Σύμφωνα με τους Keller και Bliesner (1990) ⁽²⁾ : Σύμφωνα με τους Keller και Bliesner (1990) ⁽³⁾ : Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του λογισμικού ICARE (CEMAGREF, 1983) ⁽⁴⁾ : Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του λογισμικού COPAM (Lamaddalena and Sagardoy, 2000)				

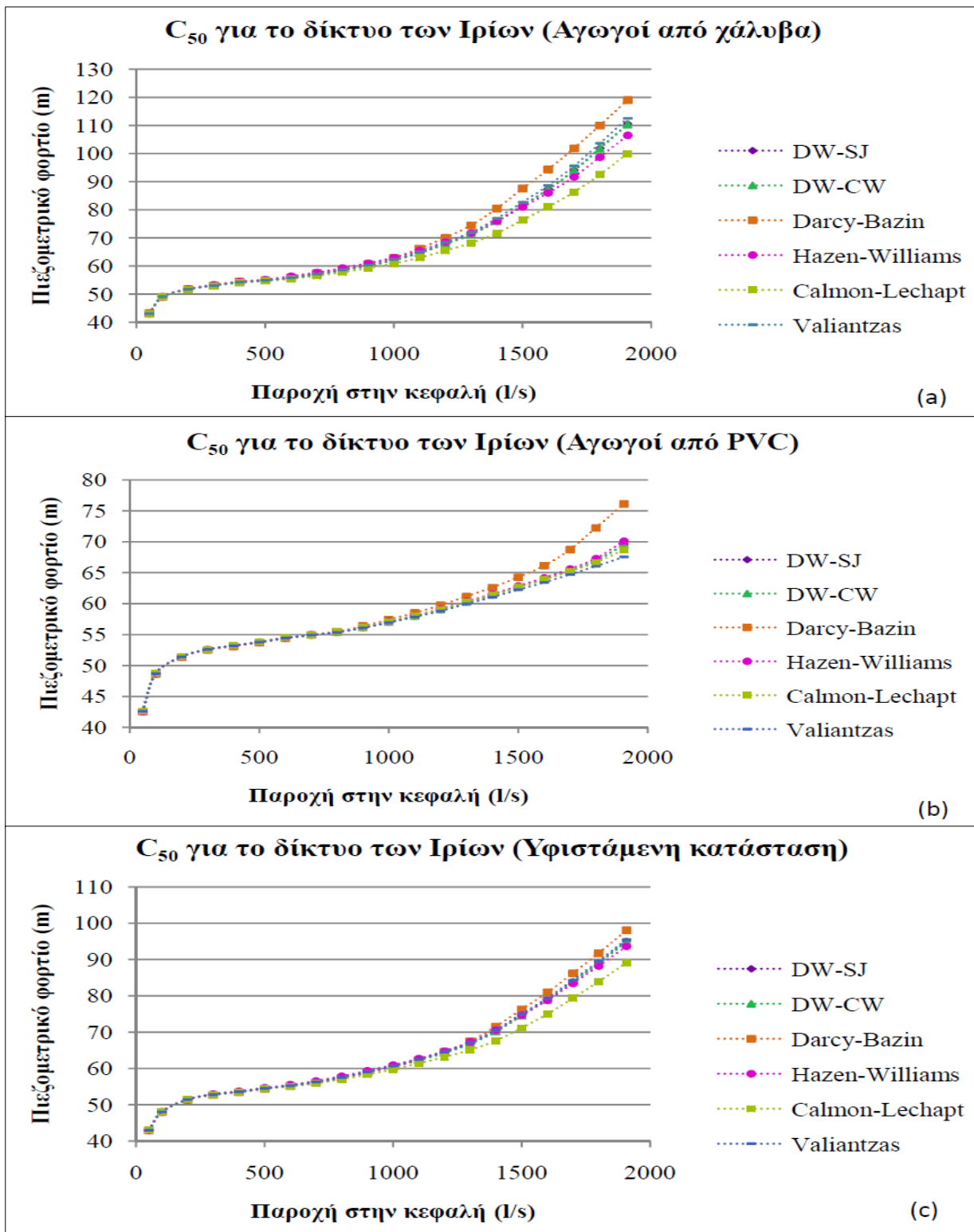
4.2.2 Αποτελέσματα και συζήτηση

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της λειτουργίας των εξεταζόμενων δικτύων ελεύθερης ζήτησης σε επίπεδο δικτύου, υλοποιήθηκαν 1000 προσομοιώσεις για το δίκτυο των Ιρίων και 300 προσομοιώσεις για το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά. Η επιλογή του αριθμού των προσομοιώσεων έγινε έτσι ώστε να αντιστοιχεί στο μέγεθος του εξεταζόμενου δικτύου και συγκεκριμένα στο συνολικό αριθμό των υδροστομίων του εξεταζόμενου δικτύου. Σύμφωνα με τους Lamaddalena και Sagardoy (2000), οι οποίοι βασίστηκαν στην ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού αρδευτικών συστημάτων, ο αριθμός των προσομοιώσεων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των υδροστομίων του εξεταζόμενου δικτύου, εκτός εάν ο αριθμός των υδροστομίων είναι πολύ μεγάλος (μεγαλύτερος από 600 υδροστόμια).

Το δίκτυο των Ιρίων: Για τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων σε επίπεδο δικτύου, χρησιμοποιήθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη C_{50} . Στην εικόνα 30 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες C_{50} για το δίκτυο των Ιρίων, που προέκυψαν από τη χρήση των διάφορων εξισώσεων για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών. Για τη σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών που δημιουργήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά η χαρακτηριστική καμπύλη C_{50} που υπολογίστηκε με την εξίσωση των DW-

CW. Στην εικόνα 30a ολόκληρο το δίκτυο έχει θεωρηθεί ότι είναι εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα, στην εικόνα 30b με αγωγούς από PVC, ενώ στην εικόνα 30c έχει υιοθετηθεί το πραγματικό υλικό για κάθε αγωγό σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες C_{50} φαίνεται να συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο για παροχές στην κεφαλή του δικτύου έως την παροχή Clément ($Q_{Clém}=411,38$ l/s). Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις για μεγαλύτερες παροχές στην κεφαλή του δικτύου. Οι αποκλίσεις αυτές είναι σημαντικότερες στην περίπτωση που το δίκτυο είναι εξοπλισμένο εξ' ολοκλήρου με αγωγούς από χάλυβα. Συγκεκριμένα, η εξίσωση του Darcy με την παράμετρο του Bazin φαίνεται να υπερεκτιμά τις απώλειες φορτίου, και οι αποκλίσεις από την εξίσωση των DW-CW είναι σημαντικότερες όσο αυξάνεται η παροχή στην κεφαλή του δικτύου. Η εξίσωση των Calmon και Lechart υποεκτιμά τις απώλειες φορτίου και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν (αγωγοί από χάλυβα, PVC και η πραγματική κατάσταση του δικτύου), ιδιαίτερα για παροχές στην κεφαλή κοντά στη μέγιστη παροχή του δικτύου. Οι άλλες εξεταζόμενες εξισώσεις, δηλαδή οι DW-CW, DW-SJ, και Valiantzas (2008) παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα για όλο το εύρος των παροχών στην κεφαλή του δικτύου. Η εξίσωση των Hazen-Williams υποεκτιμά τις απώλειες φορτίου για παροχές κοντά στη μέγιστη παροχή στην περίπτωση των αγωγών από χάλυβα.



Εικόνα 30: Οι χαρακτηριστές καμπύλες C₅₀ για το δίκτυο των Ιρίων, εξοπλισμένο (a) με χάλυβα, (b) με PVC και (c) με την πραγματική κατάσταση (Χάλυβας και PVC)

Οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου που προέκυψαν με τη χρήση των διάφορων εξισώσεων για των υπολογισμό των γραμμικών απωλειών συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές πιεζομετρικού φορτίου που προέκυψαν με τη χρήση της εξίσωσης DW-CW (εξίσωση αναφοράς). Βασιζόμενοι στις τεχνικές ανάλυσης σφαλμάτων, για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν οι αποκλίσεις που προέκυψαν για το σχηματισμό του στατιστικού δείκτη ποσοστιαίου σφάλματος (percentage error - PE) όπως περιγράφεται στη συνέχεια:

$$PE = \left| \frac{Z_j - Z_{ref}}{Z_{ref}} \right| \cdot 100 \quad (4.1)$$

όπου Z_{ref} είναι το πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου υπολογισμένο με την εξίσωση των DW-CW (εξίσωση αναφοράς) και Z_j είναι το πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου υπολογισμένο με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες εξισώσεις για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών.

Το PE του πιεζομετρικού φορτίου υπολογίστηκε για τιμές της παροχής στην κεφαλή του δικτύου που κυμαίνονται από 0 έως $Q_{Clém}$, και για τιμές της παροχής στην κεφαλή του δικτύου που κυμαίνονται από $Q_{Clém}$ έως τη μέγιστη (αθροιστική) παροχή. Για κάθε υλικό αγωγού, και για καθένα από τα δύο εύρη τιμών παροχής στην κεφαλή του δικτύου, το min, max και average PE του πιεζομετρικού φορτίου υπολογίστηκε, και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 7.

Πίνακας 8: Ποσοστιαίο σφάλμα (%) για το δίκτυο των Ιρίων (Μέγιστο, Ελάχιστο, Μέσο) του πιεζομετρικού φορτίου στην κεφαλή. Ως αναφορά για τις συγκρίσεις υιοθετήθηκε το αντίστοιχο πιεζομετρικό φορτίο που υπολογίστηκε με την εξίσωση DW-CW.

		0 - $Q_{Clém}$			$Q_{Clém}$ -1908 l/s		
		max PE	min PE	aver PE	max PE	min PE	aver PE
Steel	DW-SJ	0.030	0.001	0.013	0.206	0.033	0.115
	Darcy-Bazin	0.712	0.004	0.328	8.552	0.364	4.401
	Hazen-Williams	0.518	0.030	0.286	3.459	0.130	1.460
	Calmon-Lechapt	0.375	0.008	0.176	9.356	0.671	4.388
	Valiantzas	0.038	0.003	0.015	2.018	0.117	1.010
PVC	DW-SJ	0.024	0.004	0.013	0.069	0.017	0.045
	Darcy-Bazin	0.240	0.130	0.175	9.463	0.072	2.563
	Hazen-Williams	0.096	$\leq 10^{-3}$	0.035	0.815	0.002	0.268
	Calmon-Lechapt	0.144	0.036	0.086	1.188	0.011	0.206
	Valiantzas	0.049	0.003	0.025	2.867	0.003	0.612
Actual Situation	DW-SJ	0.008	$\leq 10^{-3}$	0.002	0.052	$\leq 10^{-3}$	0.023
	Darcy-Bazin	0.195	0.006	0.098	3.321	0.025	1.302
	Hazen-Williams	0.356	0.008	0.171	1.336	0.067	0.639
	Calmon-Lechapt	0.122	0.002	0.054	6.121	0.244	2.835
	Valiantzas	0.036	0.001	0.014	0.648	0.071	0.418
Αναφορά: Το πιεζομετρικό φορτίο υπολογίστηκε με την εξίσωση DW-CW							

Σύμφωνα με τον πίνακα 8, μια πρώτη σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τύπων για τον υπολογισμό των απωλειών, δείχνει ότι η εξίσωση DW-SJ δίνει πολύ καλά αποτελέσματα συγκρινόμενη με την εξίσωση DW-CW για όλα τα υλικά των αγωγών που εξετάστηκαν

και για τιμές της παροχής στην κεφαλή του δικτύου που κυμαίνονται από 0 μέχρι τη μέγιστη (αθροιστική) παροχή. Ο διαχωρισμός των τιμών του PE σε δύο κατηγορίες παροχών στην κεφαλή του δικτύου βάσει της $Q_{Clém}$ έγινε βάσει της αρχικής παρατήρησης στα διαγράμματα (όλες οι καμπύλες δίνουν παρόμοια αποτελέσματα για παροχές έως την $Q_{Clém}$, αλλά παρατηρούνται αποκλίσεις για μεγαλύτερες παροχές). Το PE του πιεζομετρικού φορτίου για την εξίσωση DW-SJ για παροχές μικρότερες από την $Q_{Clém}$ κυμαίνεται μεταξύ $10^{-3}\%$ και 0.03%. Για παροχές μεγαλύτερες από την $Q_{Clém}$ το PE κυμαίνεται μεταξύ $10^{-3}\%$ και 0.206%. Οι μεγαλύτερες τιμές PE παρατηρήθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο, για αγωγούς από χάλυβα και για μεγαλύτερες παροχές στην κεφαλή του δικτύου.

Η εξίσωση Valiantzas (2008) έδωσε επίσης παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν από τη χρήση της εξίσωσης DW-CW για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν και για όλες τις παροχές στην κεφαλή του δικτύου (Πίνακας 8). Πράγματι, για παροχές στην κεφαλή του δικτύου μικρότερες από την $Q_{Clém}$, το μέγιστο PE του πιεζομετρικού φορτίου κυμαίνεται μεταξύ 0.001% και 0.049%. Οι αντίστοιχες τιμές του PE για παροχές στην κεφαλή μεγαλύτερες από την $Q_{Clém}$ κυμαίνονται μεταξύ 0.003% και 2.867%.

Η εξίσωση των Hazen-Williams δίνει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν με τη χρήση της εξίσωσης των DW-CW για τις περισσότερες από τις εξεταζόμενες παροχές και υλικά αγωγών (Πίνακας 8). Το PE του πιεζομετρικού φορτίου για παροχές μικρότερες από την $Q_{Clém}$ κυμαίνεται μεταξύ 0.0002% ($\leq 10^{-3}$) (για αγωγούς από PVC) και 0.518% (για αγωγούς από χάλυβα). Για παροχές μεγαλύτερες από την $Q_{Clém}$ το PE κυμαίνεται μεταξύ 0.002% και 3.459%.

Τόσο η εξίσωση των Darcy-Bazin όσο και αυτή των Calmon-Lechart δίνουν καλά αποτελέσματα σε σύγκριση με αυτά που προκύπτουν από τη χρήση της εξίσωσης των DW-CW για παροχές μικρότερες από την παροχή Clément (Πίνακας 8). Συγκεκριμένα, το μέγιστο PE για την εξίσωση των Darcy-Bazin είναι 0.712 (αγωγοί από χάλυβα) και η αντίστοιχη τιμή για την εξίσωση των Calmon-Lechart είναι ακόμα μικρότερη και είναι ίση με 0.375. Παρόλα αυτά, για μεγαλύτερες παροχές στην κεφαλή του δικτύου οι τιμές του PE είναι διαφορετικές. Πράγματι, για τιμές μεγαλύτερες από την $Q_{Clém}$ το PE του πιεζομετρικού φορτίου αυξάνεται σημαντικά και για τις δύο αυτές εξισώσεις. Για την εξίσωση των Darcy-Bazin και γι' αυτή των Calmon-Lechart το PE ισούται με 8.552% και 9.356% για αγωγούς από χάλυβα αντίστοιχα.

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, μια δεύτερη ανάλυση πραγματοποιήθηκε, με στόχο να ποσοτικοποιήσει τις διαφορές μεταξύ των διαφόρων τύπων απωλειών για κάθε εξεταζόμενη παροχή στην κεφαλή. Για το λόγο αυτό υπολογίστηκε το Root Mean Square Error (RMSE), για τα πιεζομετρικά φορτία στην κεφαλή του δικτύου τα οποία προέκυψαν για καθεμία από τις εξεταζόμενες παροχές στην κεφαλή του δικτύου (50l/s, 100 l/s, 200 l/s,..., 1800 l/s, 1908 l/s) μετά από 1000 προσομοιώσεις. Το Root Mean Square Error (RMSE), προσδιορίζεται ως εξής:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\hat{Z}_{n,r} - Z_{n,r})^2} \quad (4.2)$$

όπου $Z_{n,r}$ είναι το πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου υπολογισμένο με την εξίσωση DW-CW για την προσομοίωση r και $\hat{Z}_{n,r}$ είναι το πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή του δικτύου για την ίδια προσομοίωση r υπολογισμένο με τη χρήση των άλλων εξεταζόμενων εξισώσεων για τον προσδιορισμό των απωλειών φορτίου και m είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων ο οποίος είναι ίσος με τον αριθμό των προσομοιώσεων. Οι τιμές του RMSE υπολογίστηκαν για όλες τις εξεταζόμενες παροχές στην κεφαλή και για όλα τα αντίστοιχα $Z_{n,r}$. Σύμφωνα με τους Singh et al. (2004), τιμές του RMSE κοντά στο μηδέν δείχνουν τέλεια προσαρμογή, ωστόσο, όταν η τιμή του RMSE είναι μικρότερη από το μισό της τυπικής απόκλισης (SD) των παρατηρήσεων, θεωρούνται χαμηλές. Στον πίνακα 8 έχουν υπολογιστεί οι τιμές του RMSE με κάθε εξίσωση και για καθεμία από τις εξεταζόμενες παροχές στην κεφαλή του δικτύου και συγκρίνονται με το μισό της τυπικής απόκλισης SD των παρατηρήσεων. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ό,τι είχε παρατηρηθεί και με την ανάλυση του ποσοστιαίου σφάλματος PE. Συγκεκριμένα, όλες οι εξεταζόμενες εξισώσεις για τον προσδιορισμό των απωλειών φορτίου παρουσιάζουν καλή προσαρμογή στα αποτελέσματα που δίνει η εξίσωση DW-CW για παροχές στην κεφαλή του δικτύου μικρότερες από την $Q_{Clém}$ (411.84l/s). Από την άλλη μεριά, μόνο η εξίσωση DW-SJ και Valiantzas (2008) παρουσιάζει καλή προσαρμογή για ένα σημαντικά μεγαλύτερο εύρος παροχών στην κεφαλή του δικτύου σε σύγκριση με την $Q_{Clém}$. Συνολικά, θα λέγαμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η εξεταζόμενη παροχή στην κεφαλή του δικτύου, τόσο χειρότερη είναι η προσαρμογή των αποτελεσμάτων στις αντίστοιχες τιμές που δίνει η ανάφορά μας (εξίσωση DW-CW).

Πίνακας 9: Τιμές του RMSE και της τυπικής απόκλισης (SD/2) του πιεζομετρικού φορτίου στην κεφαλή. (Η σύγκριση έγινε με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από τη χρήση της DW-CW)

Χάλυβας										
	DW-SJ		Darcy-Bazin		HW		CL		Valiantzas	
Q κεφαλής (l/s)	RMSE	SD/2	RMSE	SD/2	RMSE	SD/2	RMSE	SD/2	RMSE	SD/2
50	0.006	2.773	0.169	2.778	0.043	2.776	0.063	2.768	0.005	2.773
100	0.007	2.376	0.180	2.397	0.068	2.378	0.076	2.368	0.005	2.376
200	0.010	1.687	0.240	1.725	0.140	1.690	0.106	1.674	0.006	1.686
300	0.013	1.256	0.309	1.312	0.228	1.265	0.150	1.235	0.015	1.255
400	0.017	1.032	0.393	1.117	0.306	1.050	0.226	0.999	0.027	1.032
500	0.019	0.895	0.446	0.990	0.411	0.932	0.308	0.849	0.043	0.898
600	0.024	0.840	0.516	0.957	0.539	0.891	0.421	0.775	0.069	0.846
700	0.030	0.837	0.599	0.963	0.653	0.892	0.561	0.758	0.100	0.845
800	0.031	0.903	0.676	1.024	0.751	0.954	0.726	0.819	0.133	0.911
900	0.031	0.882	0.787	0.999	0.837	0.917	0.932*	0.809	0.176	0.886
1000	0.046	0.872	1.098*	1.024	0.902*	0.893	1.214	0.825	0.261	0.873
1100	0.058	0.804	1.730	1.045	0.912	0.807	1.688	0.778	0.396	0.811
1200	0.071	0.860	2.727	1.309	0.787	0.789	2.431	0.734	0.611	0.906
1300	0.093	0.958	3.790	1.562	0.596	0.816	3.237	0.720	0.828	1.031
1400	0.116	1.115	4.962	1.726	0.324	0.956	4.267	0.836	1.068	1.189
1500	0.133	1.228	6.091	1.772	0.699	1.058	5.302	0.939	1.288	1.300
1600	0.154	1.292	7.121	1.724	1.396	1.059	6.368	0.937	1.516*	1.370
1700	0.186	1.304	7.06	1.476	2.083	1.108	7.623	0.936	1.766	1.365
1800	0.209	1.187	8.359	1.208	2.897	1.037	8.987	0.913	2.002	1.231
1908	0.208*	0.000	8.770	0.000	3.814	0.000	10.316	0.000	2.225	0.000

* Τα σκιασμένα κελιά επισημαίνουν το εύρος των παροχών στην κεφαλή του δικτύου για τις οποίες οι εξεταζόμενοι τύποι απωλειών δεν προσαρμόζονται ικανοποιητικά στην καμπύλη αναφοράς (DW-CW) και παρουσιάζουν τιμές RMSE μεγαλύτερες από το αντίστοιχο ηηλικό SD/2

Στην περίπτωση του PVC (Πίνακας 10), όλες οι εξισώσεις για τον προσδιορισμό των απωλειών φορτίου παρουσιάζουν καλή προσαρμογή στα δεδομένα αναφοράς (DW-CW) για ένα μεγαλύτερο εύρος εξεταζόμενων παροχών στην κεφαλή του δικτύου. Τη

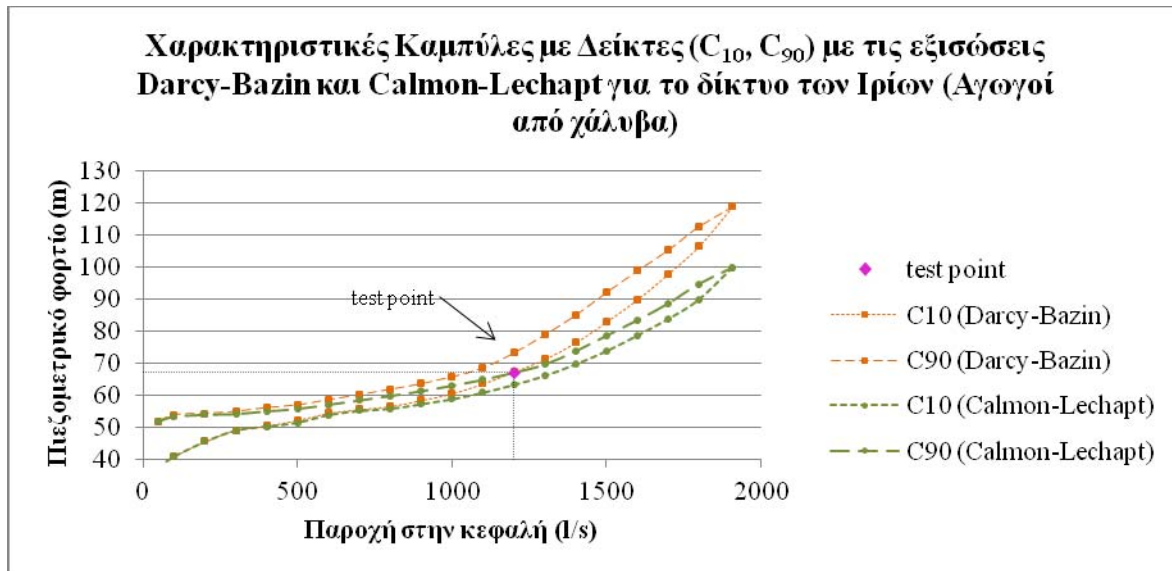
χειρότερη προσαρμογή παρουσιάζει η εξίσωση των Darcy-Bazin, η οποία παρουσιάζει καλή προσαρμογή στις τιμές της εξίσωσης αναφοράς για παροχές στην κεφαλή του δικτύου μικρότερες από 1100l/s.

Πίνακας 10: Τιμές του RMSE και της τυπικής απόκλισης (SD/2) του πιεζομετρικού φορτίου στην κεφαλή (Η σύγκριση έγινε με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από τη χρήση της DW-CW)

PVC										
	DW-SJ		Darcy-Bazin		HW		CL		Valiantzas	
Q κεφαλής (l/s)	RMSE	SD/2	RMSE	SD/2	RMSE	SD/2	RMSE	SD/2	RMSE	SD/2
50	0.002	2.668	0.039	2.664	0.014	2.667	0.015	2.669	0.008	2.667
100	0.003	2.284	0.054	2.280	0.017	2.282	0.019	2.286	0.008	2.283
200	0.004	1.673	0.073	1.667	0.019	1.671	0.028	1.676	0.009	1.672
300	0.006	1.221	0.082	1.214	0.018	1.219	0.038	1.225	0.011	1.220
400	0.007	0.925	0.078	0.918	0.015	0.924	0.047	0.930	0.012	0.925
500	0.009	0.729	0.067	0.722	0.013	0.729	0.060	0.736	0.011	0.730
600	0.011	0.628	0.039	0.621	0.019	0.628	0.071	0.637	0.009	0.628
700	0.014	0.502	0.041	0.497	0.031	0.503	0.083	0.515	0.011	0.502
800	0.017	0.490	0.115	0.493	0.049	0.495	0.094	0.509	0.026	0.489
900	0.019	0.462	0.243	0.467	0.075	0.466	0.096	0.481	0.050	0.459
1000	0.022	0.487	0.387	0.495	0.098	0.492	0.094	0.506	0.086	0.483
1100	0.027	0.487	0.555*	0.498	0.117	0.492	0.082	0.507	0.134	0.482
1200	0.029	0.468	0.762	0.474	0.141	0.471	0.068	0.488	0.191	0.464
1300	0.034	0.486	0.982	0.477	0.158	0.487	0.051	0.506	0.259	0.482
1400	0.037	0.465	1.255	0.449	0.176	0.468	0.035	0.485	0.339	0.461
1500	0.038	0.430	1.675	0.382	0.200	0.430	0.051	0.450	0.434*	0.431
1600	0.038	0.396	2.336	0.353	0.224	0.393	0.092	0.417	0.533	0.399
1700	0.031	0.290	3.598	0.445	0.282*	0.274	0.168	0.319	0.694	0.324
1800	0.030	0.184	5.358	0.365	0.417	0.209	0.334*	0.181	0.980	0.204
1908	0.036*	0.000	6.580	0.000	0.567	0.000	0.826	0.000	1.994	0.000

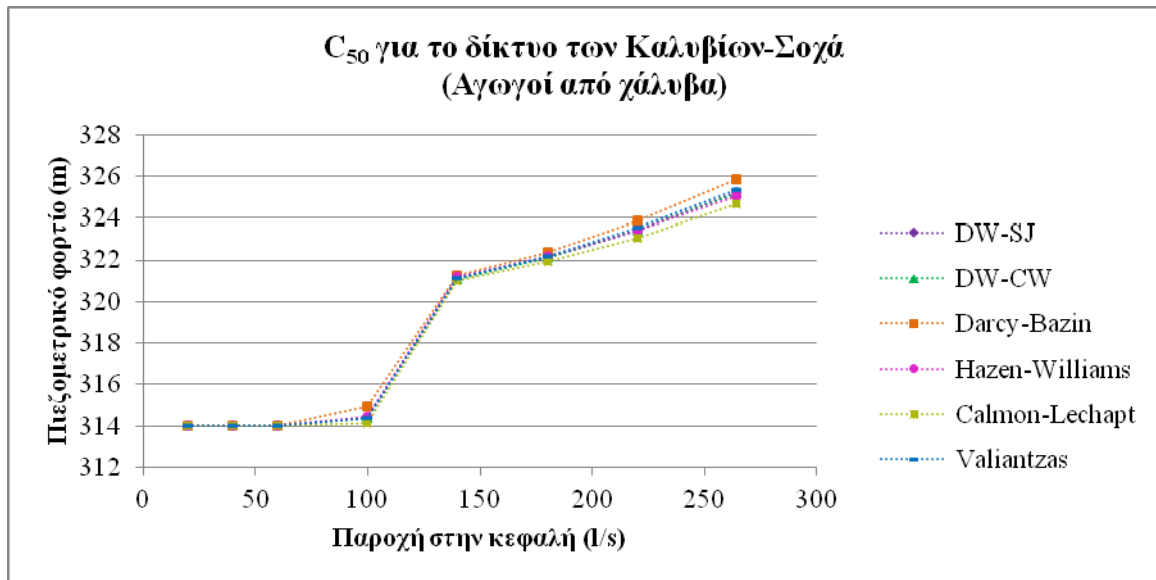
* Τα σκιασμένα κελιά επισημαίνουν το εύρος των παροχών στην κεφαλή του δικτύου για τις οποίες οι εξεταζόμενοι τύποι απωλειών δεν προσαρμόζονται ικανοποιητικά στην καμπύλη αναφοράς (DW-CW) και παρουσιάζουν τιμές RMSE μεγαλύτερες από το αντίστοιχο πηλίκο SD/2

Προκειμένου να παρουσιαστούν και οπτικά οι διαφορές μεταξύ των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες που σχεδιάστηκαν με τις διάφορες εξίσωσεις για τον προσδιορισμό των απωλειών φορτίου, στην εικόνα 31 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (C_{10} και C_{90}) που σχεδιάστηκαν με τη χρήση της εξίσωσης Darcy- Bazin και με τη χρήση της εξίσωσης των Calmon-Lechart για το δίκτυο των Ιρίων, εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα. Τα αποτελέσματα της προηγούμενης στατιστικής ανάλυσης επιβεβαιώνονται και γραφικά, μιας και γίνεται φανερό από το διάγραμμα της εικόνας 31 ότι για υψηλές παροχές στην κεφαλή του δικτύου, οι παρατηρούμενες αποκλίσεις μεταξύ των διαφόρων τύπων είναι σημαντικές. Στην περίπτωση που γίνεται χρήση της εξίσωσης των Calmon-Lechart, για παροχή στην κεφαλή του δικτύου ίση με $Q=1200\text{l/s}$, το πιεζομετρικό φορτίο για τις χαρακτηριστικές καμπύλες C_{10} και C_{90} είναι 63.4m και 67.4m αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές πιεζομετρικού φορτίου με τη χρήση της εξίσωσης των Darcy-Bazin είναι 67.4m και 73.3m. Κατά συνέπεια, για παροχή στην κεφαλή του δικτύου ίση με 1200l/s και πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή περίπου 67.4m (test point, Εικόνα 31), με τη χρήση της εξίσωσης των Calmon-Lechart η λειτουργία του δικτύου κατατάσσεται στη χαρακτηριστική καμπύλη C_{90} (δηλαδή παρουσιάζει 90% ικανοποίηση), ενώ με τη χρήση της εξίσωσης των Darcy-Bazin, το ίδιο δίκτυο αγγίζει τη χαρακτηριστική καμπύλη C_{10} (δηλαδή 10% ικανοποίηση). Έτσι, γίνεται φανερό ότι για παροχές στην κεφαλή του δικτύου μεγαλύτερες από $Q_{Clém}$ η επιλογή της εξίσωσης για τον προσδιορισμό των απωλειών φορτίου, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης της λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου.



Εικόνα 31: Χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (C_{10} , C_{90}) υπολογισμένες με την εξίσωση του Darcy-Bazin και των Calmon-Lechart για το δίκτυο των Ιρίων (εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα)

Δίκτυο Καλυβίων-Σοχά: Ανάλυση της λειτουργίας σε επίπεδο δικτύου με διάφορους τύπους απωλειών πραγματοποιήθηκε επίσης για το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά για αγωγούς από χάλυβα, PVC, αμιαντοσιμέντο και συνδυασμό όλων αυτών των υλικών (όπως είναι στην πράξη). Η εικόνα 32 παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες για το δίκτυο αυτό, για το σχεδιασμό τους θεωρήθηκε ότι το δίκτυο είναι εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα.



Εικόνα 32: Οι χαρακτηριστικές καμπύλες C_{50} για το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά (εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα) υπολογισμένες με όλους τους εξεταζόμενους τύπους γραμμικών απωλειών

Το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά είναι ένα μικρό δίκτυο. Η έκταση που αρδεύει είναι μόλις 300ha, ενώ για το δίκτυο των Ιρίων η αντίστοιχη έκταση ήταν 954ha. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις των διάφορων τύπων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάστηκαν για την περίπτωση που το παραπάνω δίκτυο θεωρήθηκε εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα. Όπως και στην περίπτωση του δικτύου των Ιρίων, έτσι και γι' αυτό το δίκτυο για παροχές στην κεφαλή του δικτύου μικρότερες από την $Q_{Clém}$ (196l/s) όλοι οι τύποι για τον προσδιορισμό των απωλειών φορτίου φαίνεται να δίνουν αποτελέσματα που προσαρμόζονται ικανοποιητικά σε αυτά που προκύπτουν από τη χρήση της εξίσωσης DW-CW (αναφορά). Για παροχές μεγαλύτερες από την παροχή Clément η εξίσωση Darcy-Bazin υπερεκτιμά τις απώλειες φορτίου και η εξίσωση Calmon-Lechapt τις υποεκτιμά. Όλες οι υπόλοιπες εξισώσεις που εξετάστηκαν, δηλαδή οι DW-SJ, HW και Valiantzas (2008), δίνουν αποτελέσματα που προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση της εξίσωσης DW-CW (εξίσωση αναφοράς).

Οι διαφορές που παρατηρούνται στην εικόνα 32 μεταξύ των πιεζομετρικών φορτίων στην κεφαλή που προέκυψαν με τη χρήση των διάφορων τύπων που εξετάστηκαν, αλλά και οι διαφορές που παρατηρούνται για τις περιπτώσεις που το δίκτυο είναι εξοπλισμένο

με άλλο υλικό εκτός του χάλυβα, ποσοτικοποιούνται ως ποσοστιαίο σφάλμα (PE) στον πίνακα 11. Στον πίνακα αυτό, το ποσοστιαίο σφάλμα του πιεζομετρικού φορτίου υπολογίστηκε για παροχές στην κεφαλή από 0 έως $Q_{Clém}$, και για παροχές στην κεφαλή από $Q_{Clém}$ έως τη μέγιστη (αθροιστική) παροχή στην κεφαλή του δικτύου (264 l/s).

Πίνακας 11: Ποσοστιαίο σφάλμα (%) για το δίκτυο Καλυβίων-Σοχά (Μέγιστο, Ελάχιστο, Μέσο) του πιεζομετρικού φορτίου στην κεφαλή. Ως αναφορά για τις συγκρίσεις υιοθετήθηκε το αντίστοιχο πιεζομετρικό φορτίο που υπολογίστηκε με την εξίσωση DW-CW.

		0 – $Q_{Clém}$			$Q_{Clém}$ - 264 l/s		
		max PE	min PE	average PE	max PE	min PE	average PE
Steel	DW-SJ	0,0057	$\leq 10^{-4}$	0,0015	0,0040	0,0032	0,0036
	Darcy-Bazin	0,1796	$\leq 10^{-4}$	0,0502	0,2057	0,1347	0,1702
	HW	0,0330	$\leq 10^{-4}$	0,0141	0,0455	0,0008	0,0232
	CL	0,0737	$\leq 10^{-4}$	0,0281	0,1645	0,1052	0,1349
	Valiantzas	0,0217	$\leq 10^{-4}$	0,0073	0,0524	0,0352	0,0438
Cement Asbestos	DW-SJ	0,0012	$\leq 10^{-4}$	0,0002	0,0019	0,0006	0,0013
	Darcy-Bazin	0,0200	$\leq 10^{-4}$	0,0059	0,0209	0,0208	0,0209
	HW	0,0117	$\leq 10^{-4}$	0,0033	0,0100	0,0001	0,0050
	CL	0,0028	$\leq 10^{-4}$	0,0007	0,0195	0,0042	0,0118
	Valiantzas	0,0085	$\leq 10^{-4}$	0,0020	0,0122	0,0121	0,0122
PVC	DW-SJ	0,0016	$\leq 10^{-4}$	0,0004	0,0044	0,0018	0,0031
	Darcy-Bazin	0,0199	$\leq 10^{-4}$	0,0037	0,0957	0,0503	0,0730
	HW	0,0075	$\leq 10^{-4}$	0,0019	0,0159	0,0127	0,0143
	CL	0,0087	$\leq 10^{-4}$	0,0026	0,0099	0,0055	0,0077
	Valiantzas	0,0045	$\leq 10^{-4}$	0,0008	0,0290	0,0124	0,0207
Actual Situation	DW-SJ	0,0016	$\leq 10^{-4}$	0,0003	0,0022	0,0021	0,0021
	Darcy-Bazin	0,0065	$\leq 10^{-4}$	0,0011	0,0306	0,0148	0,0227
	HW	0,0160	$\leq 10^{-4}$	0,0052	0,0097	0,0090	0,0093
	CL	0,0204	$\leq 10^{-4}$	0,0052	0,0625	0,0352	0,0488
	Valiantzas	0,0142	$\leq 10^{-4}$	0,0035	0,0275	0,0208	0,0241
Αναφορά: Πιεζομετρικό φορτίο υπολογισμένο με την εξίσωση DW-CW							

Σύμφωνα με τον πίνακα 10, για το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά το οποίο είναι ένα μικρό δίκτυο, όλες οι εξισώσεις που εξετάστηκαν προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα

αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση της εξίσωσης DW-CW για όλα τα υλικά και τις παροχές στην κεφαλή που εξετάστηκαν.

4.3 Επίδραση του τύπου απωλειών στην ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου

4.3.1 Μεθοδολογία

Με στόχο να εκτιμηθεί η επίδραση του τύπου των απωλειών στην ανάλυση λειτουργίας συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης σε επίπεδο υδροστομίου, υπολογίστηκαν οι μόνιμες ροές για μια προκαθορισμένη παροχή στην κεφαλή του δικτύου ($Q_{Clém}$) και για ένα μεγάλο αριθμό τυχαίων συνδυασμών ανοιχτών υδροστομίων (1000 προσομοιώσεις). Η ανάλυση αυτή έγινε για το δίκτυο των Ιρίων. Οι εξισώσεις που εξετάστηκαν ήταν αυτές που εξετάστηκαν και στην προηγούμενη εφαρμογή δηλαδή οι παρακάτω: η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την εξίσωση των Colebrook-White για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας (DW-CW), η εξίσωση των Darcy-Weisbach με την σχέση των Swamee και Jain (DW-SJ), η σχέση των Hazen –Williams (HW), η εξίσωση του Darcy με την παράμετρο γ του Bazin (Darcy-Bazin), η εξίσωση των Calmon και Lechapt (Calmon-Lechapt) και η εξίσωση του Valiantzas (2008) (Valiantzas).

Για μια πρώτη εκτίμηση της επίδρασης των διαφόρων τύπων για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών στην ανάλυση της λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου, επιλέχθηκαν τρία υδροστόμια ως αντιπροσωπευτικά των πιο δυσμενών υδροστομίων του δικτύου (τα υδροστόμια με αριθμό 42, 135 και 134) και άλλα τρία ως αντιπροσωπευτικά των πιο ευνοημένων υδροστομίων, δηλαδή από αυτά που παρουσιάζουν σημαντικό πλεόνασμα φορτίου (τα υδροστόμια με αριθμό 12, 127, και 363). Η επιλογή των υδροστομίων αυτών βασίστηκε στα αποτελέσματα που έδωσε ο δείκτης αξιοπιστίας του Hashimoto. Πρακτικά, τα πρώτα τρία υδροστόμια παρουσίαζαν τις χαμηλότερες τιμές στο δείκτη του Hashimoto, ενώ τα άλλα τρία παρουσίαζαν τις υψηλότερες τιμές.

Για τα υδροστόμια που επιλέχθηκαν υπολογίστηκε η σχετική απόκλιση που εμφάνισαν σε σχέση με το ονομαστικό τους φορτίο πίεσης για καθεμία από τις 1000 προσομοιώσεις, όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$DH = \frac{H_{j,r} - H_{nom}}{H_{nom}} \quad (4.3)$$

όπου DH είναι η απόκλιση από το ονομαστικό φορτίο πίεσης, H_{nom} είναι το ονομαστικό φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο, και $H_{j,r}$ είναι το φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο j για το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών υδροστομίων r .

4.3.2 Αποτελέσματα και συζήτηση

Ο πίνακας 12 παρουσιάζει τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή (max, min and average) του DH μετά από 1000 προσομοιώσεις για τρία από τα πιο δυσμενή υδροστόμια (N° 42, 135, 134) του δικτύου των Ιρίων. Οι υπολογισμοί έγιναν με όλους τους εξεταζόμενους τύπους απωλειών και θεωρήθηκε ότι το δίκτυο ήταν εξοπλισμένο στο σύνολό του με αγωγούς από χάλυβα.

Οι αρνητικές τιμές του DH δείχνουν ότι τα συγκεκριμένα υδροστόμια απέτυχαν να δώσουν το ονομαστικό φορτίο πίεσής τους. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του πρώτου εξεταζόμενου υδροστομίου (N° 42), για το οποίο το μέγιστο DH ισούται με -0.51 (με τη χρήση της εξίσωσης Darcy-Bazin) δείχνει ότι στην πιο δυσμενή προσομοίωση, το συγκεκριμένο υδροστόμιο απέτυχε να δώσει το ονομαστικό του φορτίο πίεσης, και το έλλειμμα φορτίου που παρουσίασε σε σύγκριση με το ονομαστικό του ήταν ίσο με 51%. Για το δίκτυο των Ιρίων, όπου το ονομαστικό φορτίο πίεσης για όλα τα υδροστόμια ήταν 20m, έλλειμμα φορτίου 51% οδηγεί σε έλλειμμα πίεσης ίσο με 10.2m. Τα αποτελέσματα του πίνακα 11 δείχνουν ότι στην περίπτωση της ανάλυσης λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου, οι εξισώσεις DW-SJ και Valiantzas (2008) παρουσιάζουν αποτελέσματα κοντά σε αυτά που δίνει η εξίσωση αναφοράς (DW-CW). Οι εξισώσεις Darcy-Bazin και Calmon-Lechart παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα αποτελέσματα που δίνει η εξίσωση DW-CW. Η εξίσωση HW δίνει μικρότερες αποκλίσεις από την εξίσωση DW-CW.

Πίνακας 12: Σχετική απόκλιση DH (max, min, average) του πραγματικού φορτίου πίεσης σε σχέση με το ονομαστικό σε επίπεδο υδροστομίου. Οι τιμές υπολογίστηκαν μετά από 1000 προσομοιώσεις, για τρία από τα πιο δυσμενή υδροστόμια στο δίκτυο των Ιρίων (εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα)

No of hydrant		Darcy-Bazin	DW-CW (reference)	DW-SJ	HW	CL	Valiantzas
42	max DH	-0,51	-0,46	-0,47	-0,50	-0,46	-0,47
	min DH	-0,39	-0,37	-0,37	-0,37	-0,36	-0,37
	average DH	-0,41	-0,39	-0,39	-0,40	-0,38	-0,39
135	max DH	-0,64	-0,54	-0,56	-0,59	-0,51	-0,58
	min DH	-0,42	-0,39	-0,39	-0,41	-0,38	-0,40
	average DH	-0,48	-0,44	-0,44	-0,46	-0,42	-0,44
134	max DH	-0,55	-0,48	-0,50	-0,52	-0,46	-0,52
	min DH	-0,34	-0,33	-0,33	-0,34	-0,32	-0,33
	average DH	-0,39	-0,38	-0,38	-0,39	-0,36	-0,38

Ο πίνακας 13 παρουσιάζει τις μέγιστες, τις ελάχιστες και τις μέσες τιμές του DH μετά από 1000 προσομοιώσεις για τα τρία πιο ευνοημένα υδροστόμια του δικτύου των Ιρίων. Οι απώλειες φορτίου έχουν υπολογιστεί με όλους τους εξεταζόμενους τύπους απωλειών και το δίκτυο έχει θεωρηθεί ότι είναι εξοπλισμένο στο σύνολό του με αγωγούς από χάλυβα.

Πίνακας 13: Σχετική απόκλιση DH (max, min, average) του πραγματικού φορτίου πίεσης σε σχέση με το ονομαστικό σε επίπεδο υδροστομίου. Οι τιμές υπολογίστηκαν μετά από 1000 προσομοιώσεις, για τρία από τα πιο ευνοημένα υδροστόμια στο δίκτυο των Ιρίων (εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα)

No of hydrant		Darcy-Bazin	DW-CW (reference)	DW-SJ	HW	CL	Valiantzas
12	max DH	1,12	1,15	1,15	1,15	1,16	1,15
	min DH	0,67	0,67	0,72	0,74	0,78	0,74
	average DH	1,02	1,06	1,06	1,06	1,08	1,07
16	max DH	0,31	0,48	0,47	0,53	0,52	0,48
	min DH	0,25	0,43	0,42	0,52	0,48	0,43
	average DH	0,30	0,46	0,46	0,52	0,51	0,47
363	max DH	0,87	0,98	0,96	0,97	1,00	0,97
	min DH	0,38	0,61	0,56	0,55	0,67	0,58
	average DH	0,70	0,83	0,83	0,83	0,89	0,83

Οι θετικές τιμές του DH δείχνουν ότι τα συγκεκριμένα υδροστόμια παρουσιάζουν πλεόνασμα φορτίου πίεσης. Όπως στον προηγούμενο πίνακα, έτσι και εδώ οι εξισώσεις DW-SJ και Valiantzas (2008) παρουσιάζουν καλύτερη προσαρμογή, εμφανίζοντας ίδιες ή παρόμοιες τιμές για το μέσο DH με αυτές που προκύπτουν από τη χρήση της εξίσωσης DW-CW (Πίνακας 13). Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που αφορούν το μέσο DH υπολογισμένο με την εξίσωση DW-SJ οδηγούν σε μηδενικό ποσοστιαίο σφάλμα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν με τη χρήση της εξίσωσης DW-CW. Το αντίστοιχο ποσοστιαίο σφάλμα για την εξίσωση Valiantzas (2008) κυμαίνεται μεταξύ 0.00-2.17%. Για το μέσο DH τα χειρότερα αποτελέσματα (σε σύγκριση με την εξίσωση DW-CW) προέκυψαν από τη χρήση της εξίσωσης Darcy-Bazin, για την οποία το ποσοστιαίο σφάλμα έφτασε μέχρι το 34.78% στην περίπτωση του υδροστομίου No 16. Η εξίσωση Calmon-Lechapt επίσης παρουσιάζει αποκλίσεις από τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τη χρήση της εξίσωσης DW-CW (αναφορά) για το μέσο DH και το ποσοστιαίο σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 1.89-10.87%. Η εξίσωση Hazen-Williams παρουσιάζει σε γενικές γραμμές χαμηλό ποσοστιαίο σφάλμα με εξαίρεση το υδροστόμιο 16, για το οποίο το ποσοστιαίο σφάλμα αγγίζει το 13.04% (μέσο DH=0.52 συγκριτικά με 0.46 στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η εξίσωση DW-CW).

Το ποσοστιαίο σφάλμα για το μέγιστο DH φτάνει έως και 34,44% για την εξίσωση Darcy-Bazin, ενώ για την εξίσωση Calmon-Lechapt φτάνει μέχρι και 10,09%. Το ποσοστιαίο σφάλμα για το μέγιστο DH στην περίπτωση της εξίσωσης Hazen-Williams είναι χαμηλό, με εξαίρεση το υδροστόμιο 16, για το οποίο φτάνει το 13,04%. Οι εξισώσεις Valiantzas (2008) και DW-SJ δίνουν χαμηλό ποσοστιαίο σφάλμα για το μέγιστο DH. Έτσι, το ποσοστιαίο σφάλμα στην περίπτωση της εξίσωσης Valiantzas (2008) κυμαίνεται μεταξύ 0,03-1,19% και στην περίπτωση της εξίσωσης DW-SJ κυμαίνεται μεταξύ 0,07-1,29%.

Για την ανάλυση λειτουργίας σε επίπεδο υδροστομίου χρησιμοποιείται συχνά ο συντελεστής αξιοπιστίας του Hashimoto. Ο συντελεστής αξιοπιστίας του Hashimoto α_j για κάθε υδροστόμιο j προσδιορίζει πόσο πιθανό είναι ένα υδροστόμιο να έχει το ονομαστικό του φορτίο πίεσης. Ο δείκτης αυτός προσδιορίζεται μαθηματικά από την σχέση που ακολουθεί.

$$a_j = \frac{\sum_{r=1}^C I h_{j,r} I p_{j,r}}{\sum_{r=1}^C I h_{j,r}} \quad (4.4)$$

Όπου $I h_{j,r} = 1$: εάν το υδροστόμιο j , είναι ανοιχτό στη συγκεκριμένη προσομοίωση r , $I h_{j,r} = 0$: εάν το υδροστόμιο j , είναι κλειστό στη συγκεκριμένη προσομοίωση r , $I p_{j,r} = 1$: εάν το φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο j , το οποίο είναι ανοιχτό στην προσομοίωση r , είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο πίεσης, $I p_{j,r} = 0$: εάν το φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο j , το οποίο είναι ανοιχτό στην προσομοίωση r , είναι μικρότερο από το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο πίεσης και C είναι ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν. Ο δείκτης αξιοπιστίας του Hashimoto είναι ένας δείκτης εύκολος στη χρήση του και με σαφή και εύληπτα αποτελέσματα, ωστόσο μειονεκτεί σε ευαισθησία καθώς αποτυγχάνει να αναδείξει το εύρος του ελλείμματος ή του πλεονάσματος φορτίου πίεσης στο εξεταζόμενο υδροστόμιο.

Στο σημείο αυτό ένας νέος δείκτης προτείνεται, βάσει του οποίου η λειτουργική επάρκεια ενός υδροστομίου δεν χαρακτηρίζεται μόνο από μια διπλή κατάσταση (0 για έλλειμμα φορτίου και 1 για επάρκεια ή πλεόνασμα φορτίου πίεσης). Αντίθετα, ο νέος δείκτης λαμβάνει υπόψη του το πηλίκο του πραγματικού φορτίου πίεσης στο υδροστόμιο σε κάθε προσομοίωση ($H_{j,r}$) προς το ονομαστικό φορτίο πίεσης του υδροστομίου (H_{nom}). Ο προτεινόμενος δείκτης που περιγράφει τη συμπεριφορά της λειτουργίας ενός υδροστομίου παρουσιάζεται παρακάτω:

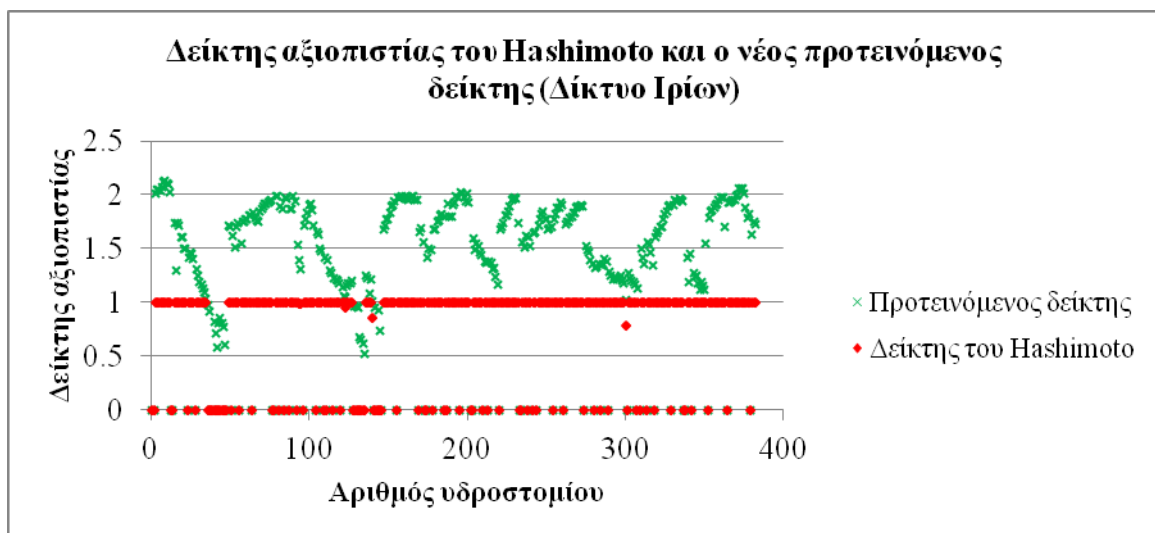
$$b_j = \sum_{r=1}^C I h_{j,r} \left(\frac{H_{j,r}}{H_{nom}} \right) / \sum_{r=1}^C I h_{j,r} \quad (4.5)$$

όπου $I h_{j,r} = 1$: εάν το υδροστόμιο j είναι ανοιχτό στο συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων r , $I h_{j,r} = 0$: εάν το υδροστόμιο j είναι κλειστό στο συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων r , $H_{j,r}$ είναι το πραγματικό φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο j για το συγκεκριμένο συνδυασμό ανοιχτών-κλειστών υδροστομίων r , H_{nom} είναι το ονομαστικό φορτίο πίεσης του υδροστομίου j , και C είναι ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Στην περίπτωση που $H_{j,r} < 0.5 H_{nom}$, έγινε η παραδοχή ότι η ποιότητα των υπηρεσιών που προσφέρονται από το υδροστόμιο j είναι πολύ χαμηλή και γι' αυτό η λειτουργική

επάρκεια του υδροστομίου θεωρείται ίση με το μηδέν (αυτό το όριο θα πρέπει στην πράξη να προσδιοριστεί βάσει των συστημάτων άρδευσης που χρησιμοποιούνται στο χωράφι). Για φορτία πίεσης μεγαλύτερα από το ονομαστικό φορτίο πίεσης, ο νέος δείκτης που προτείνεται λαμβάνει υπόψη του το πηλίκο ($H_{j,r}/H_{nom}$). Ο νέος δείκτης στοχεύει από τη μια να παρουσιάσει το εύρος του ελλείμματος ή του πλεονάσματος φορτίου και από την άλλη να αναδείξει τις περιπτώσεις υδροστομίων με οριακό πλεόνασμα φορτίου, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα αστοχίας. Επιπλέον, είναι εύκολος στη χρήση και δίνει εύληπτα αποτελέσματα.

Για μια εκτενέστερη ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου έγινε χρήση του δείκτη του Hashimoto καθώς επίσης και του νέου προτεινόμενου δείκτη, οι οποίοι υπολογίστηκαν για το δίκτυο των Ιρίων. Η ανάλυση έγινε με 1000 προσομοιώσεις με τη χρήση της εξίσωσης Darcy-Bazin και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 33. Το διάγραμμα αυτό παρουσιάζει τις τιμές του δείκτη Hashimoto καθώς επίσης και τις τιμές του νέου δείκτη για καθένα από τα 382 υδροστόμια του δικτύου των Ιρίων.



Εικόνα 33: Ο δείκτης αξιοπιστίας του Hashimoto και ο νέος προτεινόμενος δείκτης για τα 382 υδροστόμια του δικτύου των Ιρίων.

Ο δείκτης του Hashimoto παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα υδροστόμια που παρουσιάζουν σημαντικό πλεόνασμα φορτίου πίεσης όπως είναι αυτά που βρίσκονται κοντά στην κεφαλή του δικτύου (N° 0-30) να θεωρούνται ισοδύναμα από πλευράς αξιοπιστίας με τα υδροστόμια εκείνα που παρουσιάζουν οριακό πλεόνασμα φορτίου πίεσης (N° 130-140). Παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις τα υδροστόμια

επιτυγχάνουν να δώσουν την απαιτούμενη παροχή με το απαιτούμενο φορτίο πίεσης, στη δεύτερη περίπτωση τα υδροστόμια (N^ο 130-140) έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να παρουσιάσουν προβλήματα ιδιαίτερα κατά την περίοδο αιχμής.

4.4 Ανάλυση ευαισθησίας

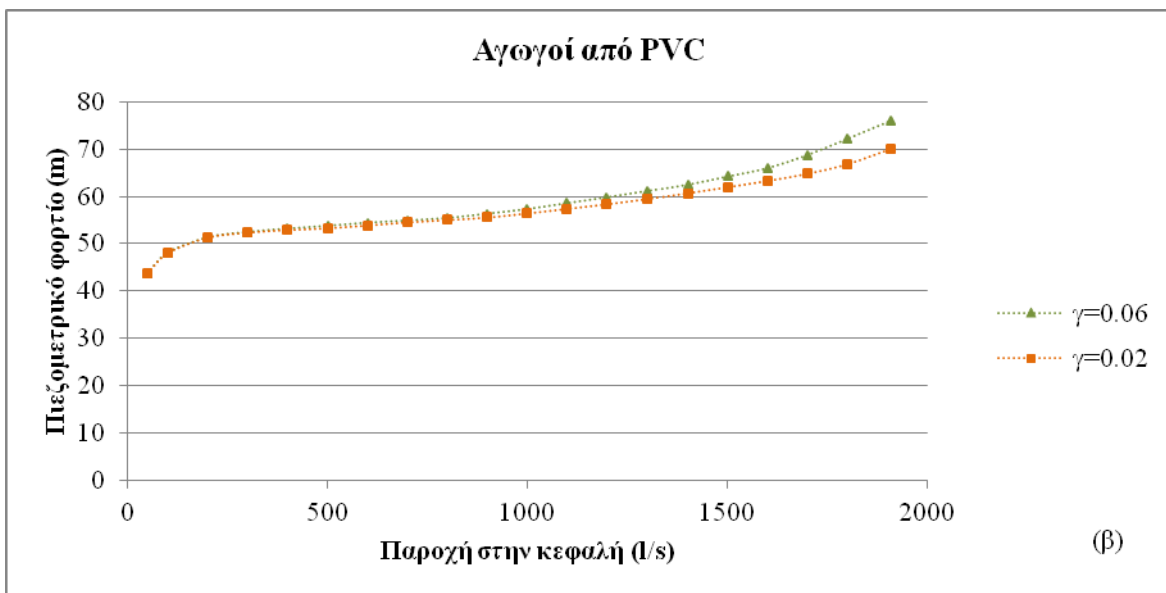
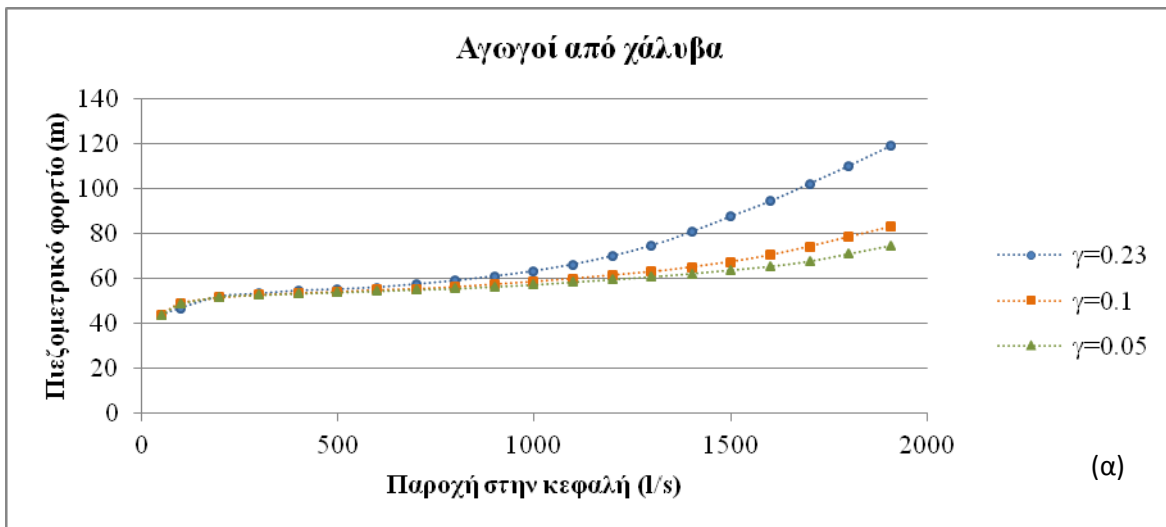
4.4.1 Μεθοδολογία

Όταν κάνουμε ανάλυση της λειτουργίας σε ένα υφιστάμενο συλλογικό αρδευτικό δίκτυο, η τιμή του συντελεστή τραχύτητας δεν είναι γνωστή. Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τα χρόνια που λειτουργεί το δίκτυο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αρδευτικού νερού. Έτσι, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η επίδραση μιας ενδεχόμενης υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης της τιμής του συντελεστή τραχύτητας στην ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών αρδευτικών δικτύων. Έχοντας αυτό το στόχο, υλοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας με τη χρήση της εξίσωσης Darcy-Bazin. Οι Lamaddalena και Sagardoy (2000) δίνουν έναν πίνακα (Πίνακας 1) με τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας του Bazin (γ) για διάφορους τύπους αγωγών. Κάθε τιμή του συντελεστή τραχύτητας (γ) αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών ισοδύναμης τραχύτητας ε . Η ανάλυση ευαισθησίας υλοποιήθηκε για το δίκτυο των Ιρίων και για δύο ξεχωριστές περιπτώσεις, στην πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ότι το δίκτυο ήταν εξοπλισμένο με αγωγούς από χάλυβα ενώ στη δεύτερη περίπτωση το δίκτυο θεωρήθηκε ότι ήταν εξοπλισμένο με αγωγούς από PVC. Στην πρώτη περίπτωση (χαλύβδινοι αγωγοί), εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου του Bazin σύμφωνα με τον πίνακα 1. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές $\gamma=0.23$, $\gamma=0.1$, και $\gamma=0.05$ (Πίνακας 1). Χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά η τιμή $\gamma=0.23$. Για τους αγωγούς από PVC εξετάστηκαν δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή τραχύτητας του Bazin, $\gamma=0.02$ και $\gamma=0.06$. Στην περίπτωση των αγωγών από PVC χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά η τιμή $\gamma=0.06$.

4.4.2 Αποτελέσματα και συζήτηση

Η εικόνα 34 παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες C_{50} για το δίκτυο των Ιρίων. Στο πρώτο διάγραμμα το δίκτυο είναι εξοπλισμένο με χαλύβδινους αγωγούς ενώ στο δεύτερο διάγραμμα είναι εξοπλισμένο με αγωγούς από PVC.

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από τη C_{50} αναφοράς (για $\gamma=0,23$ στους αγωγούς από χάλυβα και για $\gamma=0.06$ στους αγωγούς από PVC) παρατηρούνται για τις μεγαλύτερες παροχές στην κεφαλή του δικτύου. Το ποσοστιαίο σφάλμα του πιεζομετρικού φορτίου στην κεφαλή του δικτύου υπολογίστηκε για παροχές στην κεφαλή του δικτύου από 0 έως και $Q_{Clém}$, καθώς επίσης και για τιμές από $Q_{Clém}$ έως τη μέγιστη (αθροιστική).



Εικόνα 34: Οι χαρακτηριστικές καμπύλες C_{50} για το δίκτυο των Ιρίων σχεδιασμένες με τη χρήση της εξίσωσης Darcy-Bazin για διάφορες τιμές του συντελεστή γ . Το δίκτυο ήταν εξοπλισμένο με αγωγούς (α) από χάλυβα και με αγωγούς (β) από PVC.

Ο πίνακας 14 παρουσιάζει το μέγιστο, το ελάχιστο και το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα πιεζομετρικού φορτίου που υπολογίστηκε για το δίκτυο των Ιρίων με τη χρήση της εξίσωσης Darcy-Bazin και για διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας γ .

Πίνακας 14: Ποσοστιαίο σφάλμα (%) για το δίκτυο των Ιρίων (Μέγιστο, Ελάχιστο, Μέσο) του πιεζομετρικού φορτίου στην κεφαλή όπως υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές για το συντελεστή γ , για παροχές μικρότερες και μεγαλύτερες από την παροχή Clément.

		0 – $Q_{Clém}$			$Q_{Clém}$ -1908 l/s		
		Max PE	Min PE	Aver PE	Max PE	Min PE	Aver PE
Steel	Darcy-Bazin ($\gamma=0.1$)	4,67	0,62	1,80	30,46	1,92	15,36
	Darcy-Bazin ($\gamma=0.05$)	3,84	0,25	1,74	37,39	2,95	18,81
PVC	Darcy-Bazin ($\gamma=0.02$)	0,02	0,00	0,01	0,07	0,02	0,05
Αναφορά: $\gamma=0,23$ στους αγωγούς από χάλυβα και για $\gamma=0.06$ στους αγωγούς από PVC							

Στην περίπτωση των αγωγών από PVC, οι αποκλίσεις από την αναφορά είναι πολύ χαμηλές, και παρουσιάζουν μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα 0.07%. Για τους χαλύβδινους αγωγούς, το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα πιεζομετρικού φορτίου κυμαίνεται μεταξύ 1.74-1.80% για παροχές μικρότερες από την παροχή Clément. Για μεγαλύτερες παροχές το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα φτάνει μέχρι και 18.81% ενώ το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα φτάνει το 37.39% ($\gamma=0.05$).

5. Συμπεράσματα- Μελλοντική έρευνα

Η ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών αρδευτικών δικτύων που λειτουργούν υπό πίεση, με ελεύθερη ζήτηση, επιτρέπει τον έγκαιρο εντοπισμό και την εκτίμηση του μεγέθους των προβλημάτων που εμφανίζουν.

Στη διατριβή αυτή αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό ομοίωμα και το αντίστοιχο λογισμικό που υλοποιεί την ανάλυση της λειτουργίας των δικτύων αυτών σε επίπεδο δικτύου και υδροστομίου. Το μοντέλο αναπτύχθηκε δίνοντας έμφαση στα παρακάτω στοιχεία:

- Ο πηγαίος κώδικας αναπτύχθηκε από την αρχή και εξ ολοκλήρου στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. **Έτσι, σε αντίθεση με τα υπάρχοντα λογισμικά που λειτουργούν σαν ένα «μαύρο κουτί», εδώ έχουμε τη δυνατότητα να παρέμβουμε σε οποιοδήποτε σημείο της ανάλυσης, να διαφοροποιήσουμε παραμέτρους του μοντέλου και να εξετάσουμε την επίδρασή τους στην ανάλυση της λειτουργίας των μοντέλων αυτών.**
- Υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης του μοντέλου ώστε να καλύψει μελλοντικά και άλλους τομείς επιστημονικού ενδιαφέροντος πέραν της ανάλυσης της λειτουργίας των δικτύων αυτών.
- Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε στοχεύοντας στην ευκολότερη και σωστότερη εισαγωγή των ελληνικών δικτύων που πολύ συχνά χαρακτηρίζονται από μεγάλο αριθμό χρηστών ανά υδροληψία. Τα υφιστάμενα λογισμικά ανάλυσης εμφανίζουν μεγάλη δυσκολία στην εισαγωγή δικτύων αυτού του είδους με αποτέλεσμα συχνά να παρεισφρύνουν λάθη στα δεδομένα.
- Το λογισμικό προσομοίωσης που συνοδεύει το μοντέλο είναι φιλικό προς το χρήστη.
- Γίνεται λεπτομερής και διεξοδική περιγραφή των αποτελεσμάτων με γραφήματα και πίνακες, ενώ ο χρήστης έχει πρόσβαση στο σύνολο των αποτελεσμάτων σε κάθε βήμα της ανάλυσης.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στην ανάλυση της λειτουργίας των συλλογικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση των διάφορων τύπων γραμμικών απωλειών συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από τη χρήση της

εξίσωσης DW-CW. Η δυνατότητα αυτή δεν υπήρχε με τα υπάρχοντα λογισμικά που κυκλοφορούν.

Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση της εξίσωσης των γραμμικών απωλειών στην ανάλυση της λειτουργίας των δικτύων αυτών σε επίπεδο δικτύου με τη χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες και προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η ανάλυση λειτουργίας με τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες έδειξε διάφορα αποτελέσματα ανάλογα με το υλικό των αγωγών, το μέγεθος του δικτύου και την εξεταζόμενη παροχή στην κεφαλή του δικτύου. Παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες αποκλίσεις όταν οι αγωγοί εμφάνιζαν μεγαλύτερο συντελεστή τραχύτητας (πχ. Χάλυβας) ενώ ήταν αρκετά χαμηλότερες όταν εξετάστηκαν αγωγοί με χαμηλότερο συντελεστή τραχύτητας (πχ. PVC και αμιαντοσιμέντο). Συγκεκριμένα, για το μεγαλύτερο από τα δύο δίκτυα που εξετάστηκαν (δίκτυο Ιρίων) για τους αγωγούς από χάλυβα το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα έφτασε έως 4,40% ενώ στο ίδιο δίκτυο για τους αγωγούς από PVC το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα έφτασε έως 2,56%.
- Μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν επίσης στην περίπτωση του δικτύου που εξυπηρετούσε μεγαλύτερη αρδευτική περίμετρο. Το μέγιστο PE για το δίκτυο των Ιρίων έφτασε έως 9,35% (για αγωγούς από χάλυβα και παροχές μεγαλύτερες από την παροχή Clément) ενώ η αντίστοιχη τιμή του μέγιστου PE για το δίκτυο των Καλυβίων-Σοχά έφτασε έως 0,21%.
- Για παροχές στην κεφαλή μικρότερες από την παροχή Clément, οι παρατηρούμενες αποκλίσεις ήταν χαμηλές, αλλά αυξάνονταν σημαντικά (έως 9.3%) για αγωγούς από χάλυβα και παροχές στην κεφαλή μεγαλύτερες από την παροχή Clément.

Τελικά από την ανάλυση έγινε φανερό ότι για το εύρος παροχών στην κεφαλή $0 < Q < Q_{Clém}$ όλες οι εξεταζόμενες εξισώσεις γραμμικών απωλειών οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα. Αντίθετα, για $Q > Q_{Clém}$ η εξίσωση που υιοθετείται επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Κατά συνέπεια, φαίνεται πως η εξίσωση που υιοθετείται για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών θα επηρεάσει την ακρίβεια του μοντέλου των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες στην περίπτωση κορεσμένων δικτύων (δίκτυα για τα οποία η ειδική συνεχής παροχή ή η αρδευόμενη έκταση είναι μεγαλύτερη από αυτό που είχε προβλεφθεί στην αρχική μελέτη) ή

δικτύων για τα οποία η παροχή στην κεφαλή του δικτύου έχει διαφοροποιηθεί (πχ. στην περίπτωση ενίσχυσης του αντλιοστασίου).

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της επίδρασης της εξίσωσης των γραμμικών απωλειών στην ανάλυση της λειτουργίας των δικτύων ελεύθερης ζήτησης σε επίπεδο υδροστομίου. Από την ανάλυση αυτή προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι εξισώσεις DW-SJ και Valiantzas (2008) παρουσιάζουν αποτελέσματα κοντά σε αυτά που δίνει η εξίσωση αναφοράς (DW-CW). Οι εξισώσεις Darcy-Bazin και Calmon-Lechapt παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα αποτελέσματα που δίνει η εξίσωση DW-CW.
- Προτείνεται ένας νέος δείκτης αξιοπιστίας, προκειμένου να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το δείκτη αξιοπιστίας του Hashimoto, ο οποίος αναδεικνύει όχι μόνο την πιθανότητα ενός υδροστομίου να αποτύχει, αλλά και το εύρος αυτής της αποτυχίας. Για τα υδροστόμια που δεν παρουσιάζουν προβλήματα στη λειτουργία τους, ο νέος δείκτης αναδεικνύει το πλεονάζον φορτίο πίεσης. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική μιας και υδροστόμια που εμφανίζουν υψηλό φορτίο πίεσης θα είναι αυτά που θα έχουν χαμηλότερη πιθανότητα να αποτύχουν κατά την περίοδο αιχμής.

Τέλος, το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για διερεύνηση της επίδρασης της τιμής του συντελεστή τραχύτητας, μέσω μιας ανάλυσης ευαισθησίας, στη χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών με δείκτες. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι η επιλογή της τιμής του συντελεστή τραχύτητας συνεισφέρει σημαντικά στην ακρίβεια της ανάλυσης με τις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες μόνο για παροχές στην κεφαλή μεγαλύτερες από την παροχή Clément.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί το σημείο εκκίνησης για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο των συλλογικών αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης. Οι κυριότεροι τομείς στους οποίους θα επικεντρωθεί η μελλοντική έρευνα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Πιλοτική εφαρμογή του μοντέλου σε ένα δίκτυο, εγκαθιστώντας όργανα για την παρακολούθηση της παροχής και της πίεσης στην κεφαλή που θα μας επιτρέψει να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του δικτύου ανάλογα με τα αρδευτικά συστήματα στο χωράφι, κα

- Επέκταση του μοντέλου (πχ. περιορισμένη ζήτηση, εισαγωγή περιφεριακών αντλιοστασίων, εύρεση αγωγών που είναι υποδιαστασιολογημένοι, κα)
- Δοκιμή του μοντέλου σε περισσότερα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα ελεύθερης ζήτησης στην Ελλάδα.
- Εξαντλητική δοκιμή του λογισμικού και βελτιστοποίηση.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abernethy, C.L. (1984). *Methodologies for Studies of Irrigation Water Management*. Report OD/TN 9. Hydraulics Research, Wallingford, UK.
- Allen RG (1996) Relating the Hazen-Williams and Darcy-Weisbach friction loss equations for pressurized irrigation. *Appl Eng in Agric* 12(6): 685-693
- Bagarello V and Pumo D (1992). Lateral line hydraulics in drip irrigation systems. 16th ICID European Regional Conference, Budapest, Hungary
- Barr DIH (1972). New forms of equations for the correlation of pipe resistance data. *Proc Inst Civ Eng* 53(20): 383–390
- Bethery, J. (1990). Réseaux collectifs ramifiés sous pression, Calcul et fonctionnement, Études hydraulique agricole, no 6. Antony, France.
- Bethery, J., Meunier, M., and Puech, C. (1981). Analyse des défaillances et étude du renforcement des réseaux d'irrigation par aspersion. *Proc. XIe Cong CIID*, 36, 297-324.
- Bonnal C. (1966). Εγχειρίδιον συλλογικής αρδεύσεως δια καταιονισμού. Εκδόσεις Υπ. Δημ. Έργων. Αθήνα.
- Bos, M.G. and Nugteren, J. (1990). *On Irrigation Efficiencies*, 4th edn. ILRI publication 19. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Bos, M.G., Abdel-Dayem, S. and Abdel-Rahman Attia, F. (1994). Assessing performance of irrigation and drainage: examples from Egypt. *Proceedings 8th IWRA World Congress on Water Resources*, Cairo, November 1994. Volume 1, T4-S1, pp. 6.1–6.18.
- Bos, M.G. (1997). Performance indicators for irrigation and drainage. *Irrigation and Drainage Systems* 11: 119–137
- Bos, M.G., Burton M.A. and Molden D.J. (2004). *Irrigation and Drainage Performance Assessment. Practical Guidelines*. CABI Publishing.p. 154.

- Bottrall, A.F. (1981). *Comparative Study of the Management and Organisation of Irrigation Projects*. World Bank Staff Working Paper No. 458. World Bank, Washington, DC.
- Brent, R. P. (2004). Note on Marsaglia's xorshift random number generators. *J. Statist. Softw.* 11(5):1–4.
- Burnham A.J., Suter S.N., Burton M.A. & El-Askari K. (1997). Guidelines for Irrigation Canal control. (SirWilliam Halcrow & Partners). DFID Research Report Project R6259. Section on performance evaluation.
- Burt C.M. and Plusquellec H.L. (1990). Water delivery control. In G.J. Hoffman, T.A. Howell and K.H. Solomon (Eds), *Management of Farm Irrigation Systems*, pp 373–423. ASAE: USA.
- Burton M., Molden D., and Skutsch J. (2000). Benchmarking Irrigation and Drainage System Performance Position Paper. Report on Workshop 3 and 4 August 2000, FAO, Rome, Italy
- Burton, M.A. and Mututwa, I.M. (2002). A methodology for performance assessment of irrigation and drainage systems (draft paper). *Civil Engineers* 130, 175–183.
- Calejo, M.J. (2003). *Projecto e Analise do Funcionamento de Redes de Rega em Pressao. Modelacao da Procura. Dois Casos de Estudo: Lucefecit e Vigia*. Ph.D. Thesis. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Tecnica de Lisboa.
- Calejo, M.J., Lamaddalena N., Teixeira J.L. and Pereira L.S. (2008). Performance analysis of irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models. *Agricultural Water Management*. 95:154-162.
- Castorani A. and Piccinni A.F. (1991). Pipe network verification by the virtual piezometric height method. *Proceedings of the XXIV IAHR Congress, Madrid, D*, 125-132.
- CEMAGREF. (1983). *Calcul des réseaux ramifiés sous pression*. No. 506. Antony, France.
- Chen JJJ (1985). Systematic explicit solutions of Prandtl and Colebrook-White equations for pipe flow. *Proc Inst Civ Eng, Part 2, Tech. Note* 431, 79: 383–389

- Christensen B.A., Locher F.A. and Swamee P.K. (2000). Discussion of "Limitations and proper use of the Hazen–Williams equation" by Liou CP. *J Hydraulic Eng* 126(2): 167–170
- Churchill S.W. (1973). Empirical expressions for the shear stress in turbulent flow in commercial pipe. *Am Inst Chem Eng J* 19(2): 375–376
- Clément, R. (1955) Note sur le calcul des débits dans les canalizations d' irrigation. Journées d' etude d' irrigation. A.F.E.I.D., 21pp.
- Clément, R. (1966) Calcul des debits dans les réseaux d' irrigation fonctionnant à la demande. *Huille Blanche*, No5, 553-575.
- Clément, R. et Galand, A. (1979). Irrigation par aspersion er réseaux collectives de distribution sous pression. Editions Eyrolles, pp.182.
- Clemmens A.J. and Bos M.G. (1990). Statistical methods for irrigation system water delivery performance evaluation. *Irrigation and Drainage Systems* 4: 345–365.
- Clemmens, A.J., and Molden, D.J.(2007). Water uses and productivity of irrigation systems. *Irrigation Science* 25 (3): 247-261
- Coddington, P.D. (1996). Tests of random number generators using Ising model simulations. *International Journal of Modern Physics C* 7 (3): 295-303
- Colebrook C.F. (1938). Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *J Inst Civ Eng Lond* 11:133-156
- Colebrook C.F. and White C.M. (1937). The reduction of pipe capacity with age. *J. Inst. Civ. Eng. Lond.* 10:115-122
- Cornejo Díaz, N., Vergara Gil, A., Jurado Vargas, M.(2010). Assessment of the suitability of different random number generators for Monte Carlo simulations in gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes* 68 (3): 469-473
- CTGREF. (1979). Renforcement des réseaux ramifiés d' eau sous pression. Cahier 33.
- Dercas, N. (1989). Contribution au calcul des reseaux sous pression à la demande libre et restreinte. Proposition d' un modele de simulation. PhD Thesis.

- Dudewicz, E. J. and T. G. Ralley (1981). The Handbook of Random Number Generator and Testing with TESTRAND Computer Code. American Sciences Press, Columbus, Ohio.
- Ebeling C.E. (Ed) 1997. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. McGraw-Hill International Editions, 487 pp.
- Estrada, C., González, C., Aliod, R., and Paño, J. (2009). Improved Pressurized Pipe Network Hydraulic Solver for Applications in Irrigation Systems. J. Irrig. Drain. Eng, 135(4), 421-430.
- European Environmental Agency (EEA). Sustainable water use in Europe, PartI: Sectoral use of water, Environmental Assessment report, No 1, 1999.
- Ferrenberg A.M., Landau D. P., and Wong Y. J. (1992). Monte Carlo Simulations: Hidden Errors from "Good" Random Number Generators: Physical Review Letters, 23(69): 3382–3384.
- Galand A. et Jean M.. (1979). Les paramètres de conception d' un réseaux d' irrigation par aspersion, ICID Bulletin, Vol. 29 (2), pp. 34-39.
- Garcés, C. (1983) A methodology to evaluate the performance of irrigation systems: application to Philippine national systems. Unpublished PhD thesis, Cornell University, Ithaca, New York.
- Gentle E.J. (2003). Random Number Generation and Monte Carlo Methods. Springer. pp. 360.
- Gentle J.E., Härdle W.K., Mori Y. (2004). Handbook of Computational Statistics: Concepts and Methods. Springer. p.900.
- Good I.J. (1969). A subjective evaluation of Bod'w law and an "objective" test for approximate numerical rationality. Journal of the American Statistical Association. 64: 23-66
- Green C. (2004). A Fast Random Number Generator for .Net. <http://colingreenstuff.org/fastrandom.html>
- Hashimoto T. (1980). Robustness, Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Planning Water Resources Systems. Ph.D. Dissertation, Cornell University

- Hashimoto T., Sredomger J.R., and Loucks D.P. (1982). Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Water Resour Res* 18(1):14–20
- Hellekalek P. (1998). Good random number generators are (not so) easy to find. *Mathematics and computers in simulation*. 46:485-505
- Hughes T.C. and Jeppson R.W. (1978). Hydraulic Friction loss in small diameter plastic pipelines. *Water Resour Bull* 14(5):1159–1166
- ICID (1978). Standards for the calculation of irrigation efficiencies. *ICID Bulletin* 27, 91–101.
- Islam, M.R., Chaudhry, M.H. (1998). Modeling of constituent transport in unsteady flows in pipe networks. *J. Hydrogen Energy* 124 (11), 1115–1124.
- Jain S. K. and Bhunya P.K. (2008). Reliability, resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir. *Hydrological Sciences*, 53(2): 434-447.
- Kamand F.Z. (1988). Hydraulic friction factors for pipe flow. *J Irrig Drain Eng* 114(2): 311–323
- Keller J. and Bliesner R.D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. Chapman & Hall, New York.
- Kernighan B.W., Ritchie D.M. (1990). “Η Γλώσσα Προγραμματισμού C”, Β' έκδοση, Κλειδάριθμος
- Khadra, R. and Lamaddalena, N. (2010). Development of a Decision Support System for Irrigation Systems Analysis. *Water Resour. Manag.* 24,3279-3297.
- Klimasauskas C. (2003). Not Knowing Your Random Number Generator Could Be Costly. *PC AI Magazine*. May/June 2003.
- Knuth, D.W. (1969). *The Art of Computer Programming, Vol. 2: Semi-numerical Algorithms*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Labye Y. and Montgolfier J.M. (1971). Modèle de simulation du comportement d'un réseau sous pression devant fonctionner à la demand. In: *Rapports du 8e journées européennes de la CIID*. Association française pour l'étude de la irrigation et du drainage, 35, 1-16.

- Labye, Y., Olson, M.A., Galand, A., Tsiourtis, N. (1988). Design and Optimization of Irrigation Distribution Networks. Irrigation and Drainage Paper no. 44. FAO, Roma.
- Labye, Y., Lahaye, J.P., and Meunier, M. (1975). Utilization des caracteristiques indices. Proc. Congres de la ICID, Moscou, p30
- Lamaddalena N. (1997). Integrated simulation modeling for design and performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. PhD Dissertation. Technical University of Lisbon, Lisbon.
- Lamaddalena, N. and Sagardoy, J.A. (2000). Performance analysis of on-demand pressurized irrigation Systems, Irrigation and Drainage Paper no 59. FAO, Rome.
- Lamaddalena, N. and Perreira, L.S. (2007). Pressure-driven modelling for the performance analysis of irrigation systems operating on demand. Agric. Water Manag, 90, 36-44.
- L'Ecuyer, P. (1992a). Random numbers for simulation. Communications of the ACM, Vol. 33, No. 10, pp. 85-97.
- L'Ecuyer. P. (1992b). Testing random number generators. In Proceedings of the 1992 Winter. Simulation Conference, pages 305–313. IEEE Press, Dec 1992.
- L'Ecuyer, P. (1994). Uniform random number generation. Annals of Operations Research 53 (1): 77-120
- L'Ecuyer, P. (1998). Random number generators and empirical tests. In P. Hellekalek, G. Larcher, H. Niederreiter, and P. Zinterhof, editors, Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 1996, volume 127 of Lecture Notes in Statistics, pages 124–138. Springer-Verlag, New York, 1998.
- L'Ecuyer. P. (2001). Software for uniform random number generation: distinguishing the good and the bad. In Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2001. Vol.1, pp.95-105, Pistacaway, NJ. IEEE Press
- L'Ecuyer, P. and Panneton, F. (2002). Construction of equidistributed generators based on linear recurrences modulo 2. In Fang, K.-T., Hickernell, F. J., and Niederreiter, H., editors, Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 2000, pages 318–330. Springer-Verlag, Berlin.

- L'Ecuyer, P. (2004). Quasi-monte Carlo methods in finance. *Proceedings in Winter Simulation Conference*. Volume 2:1645-1655
- L'Ecuyer, P. & Simard, R. (2007). 'Testu01: A c library for empirical testing of random number generators', *ACM Trans. on Mathematical Software* 33(4), Article 22. pp.40
- Lenton, R.L., (1984). A note on monitoring productivity and equity in irrigation systems. In: Pant, N. (Ed.),
- Levine, G., (1982). Relative water supply: an explanatory variable for irrigation systems. Tech. Report No. 6. Cornell University, Ithaca, NY.
- Liou C.P. (1998). Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation. *J Hydraul Eng* 124(9):951–954.
- LWRRDC. (1998). Report of the national program for irrigation R&D benchmarking project. Land & Water Resources Research & Development Corporation, Canberra, Australia
- Makin I.W., Goldsmith H. and Skutch J.C. (1991). Ongoing performance assessment – a case study of Kraseio Project, Thailand. *Irrigation and Drainage Systems* 5: 31–42.
- Malano H & M. Burton. (2001). Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. IPTRID-FAO., Rome. 44 pages
- Malhotra, S.P., Raheja, S.K., Seckler, D. (1984). A methodology for monitoring the performance of large-scale irrigation systems: A case study of the warabandi system of Northwest India. *Agricultural Administration* 17 (4): 231-259
- Marsaglia, G. (1996). The Marsaglia random number CDROM <http://stat.fsu.edu/~geo/>.
- Marsaglia, G. (2003). Xorshift RNGs. *J. Statis. Soft.* 8(14): 1–6.
- Matsumoto M. and Nishimura T. (1998). Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 8 (1): 3–30.
- Mavropoulos, T.I. (1996). Sviluppo di una nuova formula per il calcolo delle portate di punta nelle reti irrigue con esercizio alla domanda. *Riv. Di Irr. E Dren.*, 44(2): 27-35

- McCullough B. D.(1998). Assessing the Reliability of Statistical Software: Part I. The American Statistician. 52(4): 358-366
- McInnis, D., Karney, B.W. (1995). Transients in distribution networks: field tests and demand models. J. Hydrogen Energy 121 (3), 218–231.
- Merriam, J.L., Shearer, M.N. and Burt, C.M. (1983) Evaluating irrigation systems and practices. In: Jensen, M.E. (ed.) Design and Operation of Farm Irrigation Systems. ASAE monograph no. 3. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, Michigan.
- Messina, U. (1974). Condizioni di regime in una rete di condotte conseguente ad un particolare processo di moto vario. Idrotecnica, no. 3, pp. 37–48.
- Mimikou M., Baltas E. (2013). Assessment of Climate Change Impacts in Greece: A General Overview. American Journal of Climate Change. (3): 46-56.
- Molden, D.J., Gates, T.K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. J. Irrigation Drainage Eng. ASCE 116(6), 804-823.
- Molden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., de Fraiture, C. and Kloezen, W. (1998). Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. Research report 20, International Water Management Institute, Colombo.
- Monserat, J., Poch, R., Colomer, M.A., Mora, F. (2004). Analysis of Clément's first formula for irrigation distribution networks. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 130 (2), 99-105
- Moreno A.M., Planells P., Ortega F.J., and Tarjuelo J. (2007). New methodology to evaluate flow rates in on-demand irrigation networks, J. Irrig. and Drain. Engrg., Volume 133, Issue 4, 298-306
- Moy, W.S., Cohon, J. L. and ReVelle, C.S. (1986). A programming model for analysis of the reliability, resiliency, and vulnerability of a water supply reservoir. Water Resources Research. 22(4): 489–498.
- Murray-Rust, D.H. and Snellen, W.B. (1993). Irrigation system performance assessment and diagnosis. Joint IIMI/ILRI/IHEE Publication, International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

- Oad, R. and McCornick, P.G. (1989). Methodology for assessing the performance of irrigated agriculture. *ICID Bulletin* 38 (1). International Commission on Irrigation and Drainage, New Delhi.
- Origlio, Vincenzo. "Random Variate." From MathWorld--A Wolfram Web Resource, created by Eric W. Weisstein.<http://mathworld.wolfram.com/RandomVariate.html>
- Panneton, F. and L'Ecuyer, P. (2005). On the xorshift random number generators. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 15 (4): 346-361
- Pezzinga, G. (1999). Quasi-2D model for unsteady flow in pipe networks. *J. Hydrogen Energy* 125 (7), 676–685.
- Plusquellec, H. (1990). The Gezira Irrigation Scheme in Sudan: objectives, design, and performance. World Bank Technical Paper. pp120.
- Poggi, B. (1985). Sul calcolo di verifica delle reti di condotte. In: *Atti della Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna, Classe Scienze Fisiche*, Bologna, pp. 12–21.
- Provenzano G, Palau-Salvador G, and Bralts V.F. (2005). Discussion of "Modified Hazen–Williams and Darcy–Weisbach Equations for Friction and Local Head Losses along Irrigation Laterals" by Valiantzas JD. *J Irrig Drain Eng* 131(4):342–350
- Rao, P.S. (1993). Review of selected literature on indicators of irrigation performance. International Irrigation Management Institute, Sri Lanka
- Renault D. and Vehmeyer P. (1999). On reliability in irrigation service preliminary concepts and application. *Irrigation and Drainage Systems* 13: 75–103
- Rodríguez-Díaz, J.A., Camacho, E., López, R. (2004). Application of data envelopment analysis to studies of irrigation efficiency in Andalusia. *J. Irrig. Drain Eng.*, 130(3), 175–183
- Rodríguez-Díaz, J.A., Camacho Poyato, E., and López Luque, R. (2007). Model to Forecast Maximum Flows in On-Demand Irrigation Distribution Networks. *J. Irrig. Drain. Eng*, 133(3), 222-231.
- Rodríguez-Díaz, J.A.; Camacho-Poyato, E.; López-Luque, R.; Pérez-Urrestarazu, L. (2008). Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the

efficiency of irrigation districts: An application in Spain. *Agricultural Systems* , 96 (1): 250-259

Rosseman, L.A. (2000). EPANET User Manual. US Environmental Protection Agency, Drinking Water Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory. Cincinnati.

Rukhin A., Soto J., Nechvatal J., Smid M., Barker E., Leigh S., Levenson M., Vangel M., Banks D., Heckert A., Dray J., Vo S. (2008). A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. NIST-National Institut of Standards and Technology. Special Publication 800-22. U.S. Department of Commerce. Pp. 131

Sakthivadivel, R., de Fraiture, C., Molden, D.J., Perry, C. and Kloezen, W. (1999). Indicators of land and water productivity in irrigated agriculture. *Water Resources Development*, Vol. 15, No.1 and 2.

Seckler, D., Sampath, R. K., and Raheja, S. K. (1988). "An index for measuring the performance of irrigation management systems with an application." *Water Resour. Bull.*, 24(4): 855-860.

Sharp, B.B. (1981). *Water Hammer, Problems and Solutions*. Edward Harnold Ltd., London.

Singh J., Knapp H.V., and Demissie M. (2004). Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill: Illinois State Water Survery

Small, L.E. and Svendsen, M. (1992). *A Framework for Assessing Irrigation Performance*. IFPRI Working Papers on Irrigation Performance No. 1. International Food Policy Research Institute, Washington, DC, August.

Sofios, S., Arabatzis, G., Baltas, E. (2008). Policy for management of water resources in Greece. *Environmentalist* 28 (3): 185-194

Spiliotis, M., Tsakiris, G. (2007). Minimum cost irrigation network design using interactive fuzzy integer programming. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133 (3): 242-248

- Spiliotis, M., Tsakiris, G. (2012). Water distribution network analysis under fuzzy demands. *Civil Engineering and Environmental Systems* 29 (2): 107-122
- Stefopoulou, A. and Dercas, N. (2011a). Investigation of Hydraulic Performance of Irrigation Network Kalyvion-Socha. (Perfection of Lakonia, Greece). Proc. 7th Greek Conf of the Hellenic Soc. of Agric. Eng., Greece.
- Stefopoulou, A., and Dercas, N. (2011b). Performance Analysis of Large Pressurized Irrigation Networks: Effect of Head Losses Evaluation. Proc. VI EWRA Int Symp "Water Engineering and Management in a Changing Environment", Italy.
- Stefopoulou A. and Dercas N. (2012). The effect of head losses evaluation on the analysis of pressurized irrigation networks operating on-demand. *Water Utility Journal*. 3: 3-18.
- Svendsen, M. (1990). Choosing a perspective for assessing irrigation system performance. Paper presented at the FAO Regional Workshop on Improved Irrigation System Performance for Sustainable Agriculture, Bangkok, Thailand, 22–26 October.
- Swamee P. and Jain A. (1976). Explicit equation for pipe flow problems. *J Hydraul Div* 102(5):657–664
- Terzidis G. (1992). Discussion of "Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe" by von Bernuth RD. *J Irrig Drain Eng* 118(3):501–504
- Tiercelin, J.R. (2006). *Traité d' irrigation*. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- Tippet, L.H.C. (1927). "*Random sampling numbers*". Tracts for Computers, Vol. 15. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
http://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1418/index.html
- Urrestarazu, P., L., Rodríguez Díaz, J.A., Camacho Poyato, and E., López Luque, R.(2009). Quality of service in irrigation distribution networks: Case of Palos de la Frontera irrigation district (Spain). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135 (6): 755-762
- Valiantzas J.D. (2005). Modified Hazen–Williams and Darcy–Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation laterals. *J Irrig Drain Eng* 131(4):342–350

- Valiantzas J.D. (2008). Explicit Power Formula for the Darcy–Weisbach Pipe Flow Equation: Application in Optimal Pipeline Design. *J Irrig Drain Eng.* 134(4):454-461
- Walker, J. (2008) ENT—A Pseudorandom Number Sequence Test Program. Software and documentation available at [/www.fourmilab.ch/random/S](http://www.fourmilab.ch/random/S).
- Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A. (2001). *Water Distribution Modelling*. Haestad Press, Watertown, USA.
- Weisstein, Eric W. "Pseudorandom Number." From *MathWorld*--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/PseudorandomNumber.html>
- Wolters, W. (1992). Influences on the Efficiency of Irrigation Water Use. ILRI publication no. 51. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Yannopoulos, S., Spiliotis, M. (2013). Water Distribution System Reliability Based on Minimum Cut - Set Approach and the Hydraulic Availability. *Water Resources Management.* 27 (6) : 1821-1836

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αργυροκαστρίτης, Ι.Γ. (1999). Μελέτη Αρδευτικού Δικτύου Ιρίων Νομού Αργολίδας. Γεωργοτεχνική-Γεωργοοικονομική μελέτη.
- Γαροφαλλάκης, Γ.Δ. (1999). Προσομοίωση πληροφοριακών συστημάτων. Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Γεροντίτης, Α. (2007). Ανάλυση της λειτουργίας αρδευτικού δικτύου περιοχής Ιρίων νομού Αργολίδας. Μεταπτυχιακή εργασία. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Δέρκας, Ν. (1991). Διερεύνηση προσαρμογής του μοντέλου Clément στην πραγματική λειτουργία ενός δικτύου υπό πίεση ελεύθερης ζήτησης. *Τεχνικά Χρονικά*, Τόμος II, Τεύχος 3.
- Δέρκας, Ν. (1999). Υπολογισμός παροχών σχεδιασμού σε δίκτυα ελεύθερης ζήτησης. Σημειώσεις Μαθημάτων ΓΠΑ. Σελ.28
- Δέρκας, Ν., (2000). Προβλήματα λειτουργίας και διαχείρισης αρδευτικών δικτύων στην Ελλάδα. Μελέτη δύο αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων. Σημειώσεις Μαθημάτων ΓΠΑ. Σελ.36

- Δέρκας, Ν., (2001). Μαθηματικά ομοιώματα για την ανάταξη και τον εκσυγχρονισμό των συλλογικών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση. Σημειώσεις Μαθημάτων ΓΠΑ. Σελ.52
- Ευθυμίου Χ. (2013). Διαστασιολόγηση και ανάλυση της λειτουργίας του αρδευτικού δικτύου παραλίμνιας έκτασης λίμνης Λυσιμάχιας. Πτυχιακή εργασία. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Κανάκης Π. (2010). Ελαχιστοποίηση κόστους με ασαφή γραμμικό προγραμματισμό και ανάλυση λειτουργίας υπό πίεση αρδευτικών δικτύων. Μεταπτυχιακή εργασία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μαυρόπουλος, Θ.Ι. (1978). Κριτήρια υπολογισμού των παροχών ενός δικτύου αρδεύσεως με καταιονισμό υπό συνθήκες ελεύθερης ζήτησης. Μεταπτυχιακή διατριβή. Θεσσαλονίκη.
- Μαυρόπουλος, Θ.Ι. (1992). Στοχαστικές διαδικασίες κατανομής του νερού σε συλλογικά αρδευτικά δίκτυα καταιονισμού με ελεύθερη ζήτηση. Διδακτορική διατριβή. Θεσσαλονίκη.
- Παπαδόπουλος Γ. (2008). Περιγραφική Στατιστική. Πανεπιστημιακές σημειώσεις. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Ρούσκας, Α. (2008). Παραγωγή τυχαίων αριθμών. Σημειώσεις μαθήματος προσομοίωση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και δικτύων. Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- Στασινόπουλος Κ. (1981). Οριστική μελέτη αρδευτικού δικτύου Καλυβίων-Σοχάς.
- Τζιμόπουλος Χ.Δ. (1978). Σημειώσεις γεωργικής υδραυλικής. Τόμος ΙΙ, Θεσσαλονίκη.
- Τσακίρης Γ. και Δέρκας Ν. (2006). Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα. Στο Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός & Διαχείριση. Τόμος ΙΙ: Εγγειοβελτιωτικά Έργα. Γ. Τσακίρης (Υπεύθυνος Έκδοσης). Εκδόσεις Συμμετρία.
- Φωκά Μ. (2011). Σχεδιασμός και ανάλυση συλλογικών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση. Εφαρμογή: Ανάλυση του δικτύου Α2 Σαββαλίων Νομού Ηλείας. Πτυχιακή εργασία. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στη συνέχεια παρατίθενται τμήματα του κώδικα που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της ανάπτυξης του μοντέλου για την ανάλυση της λειτουργίας υπό πίεση συλλογικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης

Εισαγωγή Δικτύου

```
Private Function GetNode(ByVal text As String, ByVal parentCollection As TreeNodeCollection) As
TreeNode
    Dim ret As TreeNode
    Dim child As TreeNode
    For Each child In parentCollection
        If child.Text = text Then
            ret = child
        ElseIf child.GetNodeCount(False) > 0 Then
            ret = GetNode(text, child.Nodes)
        End If
        If Not ret Is Nothing Then Exit For
    Next
    Return ret
End Function

Private Sub PopulateTreeView(ByVal parentId As String, _
    ByVal parentNode As TreeNode)

    Dim filteredItems = treeViewList.Where(Function(item) item.ParentId = parentId)

    Dim childNode As TreeNode
    For Each i In filteredItems.ToList()
        If parentNode Is Nothing Then
            childNode = TreeView2.Nodes.Add(i.Text)
        Else
            childNode = parentNode.Nodes.Add(i.Text)
        End If
        PopulateTreeView(i.Id, childNode)
    Next
End Sub
```

```

TreeView2.Nodes.Clear()
treeViewList.Clear()
treeViewList.Add(New TreeViewItem() With { _
    .ParentId = uphill(0), .Id = downhill(0), .Text = uphill(0).ToString})

For i = 1 To uphill.Count - 1
    treeViewList.Add(New TreeViewItem() With { _
        .ParentId = uphill(i), .Id = downhill(i), .Text = uphill(i).ToString})
Next
Dim DifferenceQuery = downhill.Except(uphill)
For Each Name As String In DifferenceQuery
    treeViewList.Add(New TreeViewItem() With { _
        .ParentId = Name, .Id = treeViewList.Count + 10000, .Text = Name})
Next
PopulateTreeView(1, Nothing)
TreeView2.ExpandAll()
Private Sub ToolStripButton9_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ToolStripButton9.Click
    Dim Flag As Boolean
    Dim diam, uphill, length, altitude, q1, q2, q3, q4, Si1, Si2, Si3, Si4, hr As New List(Of Double)
    Dim v, r, hin As Double
    Dim qcount As Double
    Dim Jgr1_SJ, Hf1, H1, H2, Q_head As New List(Of Double)
    Dim oWrite As System.IO.StreamWriter
    oWrite = File.CreateText("C:\niriis.txt")
    For i = 0 To DataGridView1.RowCount - 2
        uphill.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(1).Value)
        downhill.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(2).Value)
    Next
    Dim kkk, lll, mmm, ttt, tttt, vvvv, ssss, uuuu As String
    kkk = ""
    lll = ""
    mmm = ""
    ttt = ""
    DataGridView1.AutoSizeColumnsMode = DataGridViewAutoSizeColumnsMode.None
    For i = 0 To DataGridView1.RowCount - 2
        altitude.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(3).Value)

```

```

length.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(4).Value)
diam.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(5).Value)
q1.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(6).Value)
q2.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(7).Value)
q3.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(8).Value)
q4.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(9).Value)
Si1.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(10).Value)
Si2.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(11).Value)
Si3.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(12).Value)
Si4.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(13).Value)
hr.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(14).Value)
Next

v = Cdbl(TextBox2.Text)
r = Cdbl(TextBox3.Text)

Dim UserDefinedQ As New List(Of Double)
For Each qq As Double In ListBox1.Items
    UserDefinedQ.Add(qq)
Next qq
UserDefinedQ.Sort()

Hout_SJ.Clear()
Hout_CW.Clear()
Hout_Bazin.Clear()
Hout_HW.Clear()
Hout_Calmon.Clear()
Hout_Valiantzas.Clear()

For i = 0 To downhill.Count - 1
    hr_initial.Add(hr(i))
Next i

For Each qq As Double In UserDefinedQ
    oWrite.WriteLine("{0,20}{1,5}", "Tested Q (1/s)= ", qq)
    oWrite.WriteLine("=====")
    Dim qsum_persim As New List(Of Double)

```

```

ReDim Array3D(downhill.Count - 1, 3, numOfSimulations - 1)
Dim Array_Hashimoto(downhill.Count - 1, 3), Array_Hashimoto_arithmitis(downhill.Count - 1, 3),
Array_Hashimoto_paranomastis(downhill.Count - 1, 3) As Double

For simNum = 1 To numOfSimulations

    Dim RelativeRoughnessList, ReynoldsList As New List(Of Double)

    If ToolStripComboBox1.Text = "Steady Flow" Then
        hr.Clear()
        For i = 0 To DataGridView1.RowCount - 2
            hr.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(14).Value)
        Next i
    End If

    Dim Array_Ih(downhill.Count - 1, 3), Array_Ip(downhill.Count - 1, 3) As Double

    Dim solveNwk As New SolveNetwork
    Dim qTot, Jgr, Hf, H, Pi1, Pi2, Pi3, Pi4, q1new, q2new, q3new, q4new As New List(Of Double)
' Calculated variables Lists
    Dim rndList1, rndList2, rndList3, rndList4 As New List(Of Double)

    'Debug.Print("= = = = = = = = = =Q to test: " & qq & "Simutation No: " & simNum & " = = =

    rndList1 = createRandomList(DataGridView1.RowCount - 2)
    System.Threading.Thread.Sleep(2)
    rndList2 = createRandomList(DataGridView1.RowCount - 2)
    System.Threading.Thread.Sleep(3)
    rndList3 = createRandomList(DataGridView1.RowCount - 2)
    System.Threading.Thread.Sleep(4)
    rndList4 = createRandomList(DataGridView1.RowCount - 2)
    System.Threading.Thread.Sleep(4)

Public Function createRandomList(ByVal length As Integer) As List(Of Double)
    Dim rndList As New List(Of Double)
    Dim rndNum As New Random

```

```

Dim rr As Double
For i = 0 To length
    Randomize()
    rr = rndNum.NextDouble
    rndList.Add(rr)
Next
Return rndList
End Function

```

Υπολογισμός της πιθανότητας λειτουργίας για κάθε υδροστόμιο

```

Pi1 = solveNwk.calculatePi(Si1, q1, v, r)
Pi2 = solveNwk.calculatePi(Si2, q2, v, r)
Pi3 = solveNwk.calculatePi(Si3, q3, v, r)
Pi4 = solveNwk.calculatePi(Si4, q4, v, r)

```

```

Public Function calculatePi(ByVal Si As List(Of Double), _
    ByVal q As List(Of Double), _
    ByVal v As Double, _
    ByVal r As Double) As List(Of Double)
    Dim Pi As New List(Of Double)
    For i = 0 To frmMAIN.DataGridView1.RowCount - 2
        If q(i) <> 0 Then
            Pi.Add((Si(i) * v) / (q(i) * r))
        Else
            Pi.Add(0)
        End If
    Next
    Return Pi
End Function

```

Ανοίγμα υδροστομίων.

```

For i = 0 To DataGridView1.RowCount - 2
    If rndList1(i) > Pi1(i) Then
        qlnew.Add(0)
    Else
        qlnew.Add(q1(i))
    End If

```

```

    If rndList2(i) > Pi2(i) Then
        q2new.Add(0)
    Else
        q2new.Add(q2(i))
    End If

    If rndList3(i) > Pi3(i) Then
        q3new.Add(0)
    Else
        q3new.Add(q3(i))
    End If

    If rndList4(i) > Pi4(i) Then
        q4new.Add(0)
    Else
        q4new.Add(q4(i))
    End If
Next

If simNum = 1 Then
    DataGridView1.Columns.Add("Column15", "Q1new")
    DataGridView1.Columns.Add("Column16", "Q2new")
    DataGridView1.Columns.Add("Column17", "Q3new")
    DataGridView1.Columns.Add("Column18", "Q4new")
End If

For i = 0 To DataGridView1.RowCount - 2
    DataGridView1.Rows(i).Cells(15).Value = q1new(i)
    DataGridView1.Rows(i).Cells(16).Value = q2new(i)
    DataGridView1.Rows(i).Cells(17).Value = q3new(i)
    DataGridView1.Rows(i).Cells(18).Value = q4new(i)
Next

Dim totRows As Integer = DataGridView1.RowCount
Dim initialQ(totRows - 2, 3), arrayOfQ(totRows - 2, 3), inverseArrayOfQ(totRows - 2, 3),
dummyArray(totRows - 2, 3) As Double
Dim finalSnapshotArray(totRows - 2, 3) As Double

```

```

Dim qCumulative As New List(Of Double)
Dim qAvailable, qCounter As Double

qAvailable = qq
qCounter = 0

Dim qTotalNew As New List(Of Double)

Randomize()

For i = 0 To totRows - 2
    For j = 0 To 3
        initialQ(i, j) = DataGridView1.Rows(i).Cells(6 + j).Value
        arrayOfQ(i, j) = DataGridView1.Rows(i).Cells(15 + j).Value
    Next j
Next i

For i = 0 To totRows - 2
    For j = 0 To 3
        If arrayOfQ(i, j) = 0 Then
            inverseArrayOfQ(i, j) = initialQ(i, j)
        Else
            inverseArrayOfQ(i, j) = 0
        End If
    Next j
Next i

Flag = False

Dim list1forArrayOfQ, list2forArrayOfQ, list3forArrayOfQ, list4forArrayOfQ As New List(Of
Integer)
Dim list1forInverseArray, list2forInverseArray, list3forInverseArray, list4forInverseArray
As New List(Of Integer)

For i = 1 To ((downhill.Count * 4) - 3) Step 4

```



```

        list1forArrayOfQ.Add(i)
        list1forInverseArray.Add(i)
    Next i

    For i = 2 To ((downhill.Count * 4) - 2) Step 4
        list2forArrayOfQ.Add(i)
        list2forInverseArray.Add(i)
    Next i

    For i = 3 To ((downhill.Count * 4) - 1) Step 4
        list3forArrayOfQ.Add(i)
        list3forInverseArray.Add(i)
    Next i

    For i = 4 To (downhill.Count * 4) Step 4
        list4forArrayOfQ.Add(i)
        list4forInverseArray.Add(i)
    Next i

    While list4forArrayOfQ.Count > 0
        Dim index1 As Integer
        Dim item1 As Object
        Dim LineIndex1 As Integer

        index1 = rndNum.Next(0, list1forArrayOfQ.Count - 1)
        item1 = list1forArrayOfQ(index1)
        LineIndex1 = ((item1 + 3) / 4) - 1

        qCounter = qCounter + arrayOfQ(LineIndex1, 0)

        If qCounter > qAvailable Then
            qCounter = qCounter - arrayOfQ(LineIndex1, 0)
            Exit While
        End If

        finalSnapshotArray(LineIndex1, 0) = arrayOfQ(LineIndex1, 0)
        list1forArrayOfQ.RemoveAt(index1)
    
```

```

Dim index2 As Integer
Dim item2 As Object
Dim LineIndex2 As Integer

index2 = rndNum.Next(0, list2forArrayOfQ.Count - 1)
item2 = list2forArrayOfQ(index2)
LineIndex2 = ((item2 + 2) / 4) - 1

qCounter = qCounter + arrayOfQ(LineIndex2, 1)

If qCounter > qAvailable Then
    qCounter = qCounter - arrayOfQ(LineIndex2, 1)
    Exit While
End If

finalSnapshotArray(LineIndex2, 1) = arrayOfQ(LineIndex2, 1)
list2forArrayOfQ.RemoveAt(index2)

Dim index3 As Integer
Dim item3 As Object
Dim LineIndex3 As Integer

index3 = rndNum.Next(0, list3forArrayOfQ.Count - 1)
item3 = list3forArrayOfQ(index3)
LineIndex3 = ((item3 + 1) / 4) - 1

qCounter = qCounter + arrayOfQ(LineIndex3, 2)

If qCounter > qAvailable Then
    qCounter = qCounter - arrayOfQ(LineIndex3, 2)
    Exit While
End If

finalSnapshotArray(LineIndex3, 2) = arrayOfQ(LineIndex3, 2)
list3forArrayOfQ.RemoveAt(index3)

Dim index4 As Integer
Dim item4 As Object

```

```

Dim LineIndex4 As Integer

index4 = rndNum.Next(0, list4forArrayOfQ.Count - 1)
item4 = list4forArrayOfQ(index4)
LineIndex4 = (item4 / 4) - 1

qCounter = qCounter + arrayOfQ(LineIndex4, 3)
If qCounter > qAvailable Then
    qCounter = qCounter - arrayOfQ(LineIndex4, 3)
    Exit While
End If

finalSnapshotArray(LineIndex4, 3) = arrayOfQ(LineIndex4, 3)
list4forArrayOfQ.RemoveAt(index4)

End While

While list4forInverseArray.Count > 0
    Dim index1b As Integer
    Dim item1b As Object
    Dim LineIndex1b As Integer

    index1b = rndNum.Next(0, list1forInverseArray.Count - 1)
    item1b = list1forInverseArray(index1b)
    LineIndex1b = ((item1b + 3) / 4) - 1

    qCounter = qCounter + inverseArrayOfQ(LineIndex1b, 0)

    If qCounter > qAvailable Then
        qCounter = qCounter - inverseArrayOfQ(LineIndex1b, 0)
        Exit While
    End If

    If inverseArrayOfQ(LineIndex1b, 0) <> 0 Then
        finalSnapshotArray(LineIndex1b, 0) = inverseArrayOfQ(LineIndex1b, 0)
    End If

```

```

list1forInverseArray.RemoveAt(index1b)

Dim index2b As Integer
Dim item2b As Object
Dim LineIndex2b As Integer

index2b = rndNum.Next(0, list2forInverseArray.Count - 1)
item2b = list2forInverseArray(index2b)
LineIndex2b = ((item2b + 2) / 4) - 1

qCounter = qCounter + inverseArrayOfQ(LineIndex2b, 1)

If qCounter > qAvailable Then
    qCounter = qCounter - inverseArrayOfQ(LineIndex2b, 1)
    Exit While
End If
If inverseArrayOfQ(LineIndex2b, 1) <> 0 Then
    finalSnapshotArray(LineIndex2b, 1) = inverseArrayOfQ(LineIndex2b, 1)
End If

list2forInverseArray.RemoveAt(index2b)

Dim index3b As Integer
Dim item3b As Object
Dim LineIndex3b As Integer

index3b = rndNum.Next(0, list3forInverseArray.Count - 1)
item3b = list3forInverseArray(index3b)
LineIndex3b = ((item3b + 1) / 4) - 1

qCounter = qCounter + inverseArrayOfQ(LineIndex3b, 2)
If qCounter > qAvailable Then
    qCounter = qCounter - inverseArrayOfQ(LineIndex3b, 2)
    Exit While
End If

If inverseArrayOfQ(LineIndex3b, 2) <> 0 Then
    finalSnapshotArray(LineIndex3b, 2) = inverseArrayOfQ(LineIndex3b, 2)

```

```

End If

list3forInverseArray.RemoveAt(index3b)

Dim index4b As Integer
Dim item4b As Object
Dim LineIndex4b As Integer

index4b = rndNum.Next(0, list4forInverseArray.Count - 1)
item4b = list4forInverseArray(index4b)
LineIndex4b = (item4b / 4) - 1

qCounter = qCounter + inverseArrayOfQ(LineIndex4b, 3)

If qCounter > qAvailable Then
    qCounter = qCounter - inverseArrayOfQ(LineIndex4b, 3)
    Exit While
End If

If inverseArrayOfQ(LineIndex4b, 3) <> 0 Then
    finalSnapshotArray(LineIndex4b, 3) = inverseArrayOfQ(LineIndex4b, 3)
End If

list4forInverseArray.RemoveAt(index4b)

End While

Dim counter As Double = 0

For i = 0 To totRows - 2
    For j = 0 To 3
        If finalSnapshotArray(i, j) = 0 Then
            Array_Ih(i, j) = 0
        Else
            Array_Ih(i, j) = 1
        End If
    Next j
Next i

```

```

listofpaths.Clear()
For Each k In DifferenceQuery
    Dim path As String
    Dim singlepath As New List(Of String)
    TreeView2.SelectedNode = GetNode(k, TreeView2.Nodes)
    path = TreeView2.SelectedNode.FullPath
    Dim tempArray() = path.Split("\")
    singlepath = tempArray.ToList
    singlepath.Reverse()
    listofpaths.Add(singlepath)
Next k

```

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΚΤΥΟΥ: Υλοποίηση κώδικα για των υπολογισμό των χαρακτηριστικών καμπύλων με δείκτες

```

'===== CHARACTERISTIC CURVES =====
ElseIf ToolStripComboBox1.Text = "Characteristic Curves" Then
    Dim qq1, qq2, qq3, qq4 As New List(Of Double) '4 lists with q from final snapshot array
    For i = 0 To downhill.Count - 1
        qq1.Add(finalSnapshotArray(i, 0))
        qq2.Add(finalSnapshotArray(i, 1))
        qq3.Add(finalSnapshotArray(i, 2))
        qq4.Add(finalSnapshotArray(i, 3))
    Next i

    '=====NEW ENTRY=====
    qsum_persim.Add(qq1.Sum + qq2.Sum + qq3.Sum + qq4.Sum)
    '=====

    Dim qs As New List(Of Double)
    Dim qs_bis As New List(Of Double)
    For i = 0 To (downhill.Count - 1)
        qs.Add(0)
        qs_bis.Add(0)
    Next i

    For Each currentpath In listofpaths
        qcount = 0

        For i = 0 To currentpath.Count - 1
            If currentpath(i) = 1 Then Exit For

```

```

        ttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
        If qs_bis(ttt) = 0 Then
            qcount = qcount + qq1(ttt) + qq2(ttt) + qq3(ttt) + qq4(ttt)
            qs(ttt) = qs(ttt) + qcount
            qs_bis(ttt) = 1
        ElseIf qs_bis(ttt) = 1 Then
            qs(ttt) = qs(ttt) + qcount
        End If
    Next i
Next
If qq = UserDefinedQ.Max Then
    oWrite.WriteLine("{0, 7}", UserDefinedQ.Max)
    For i = 0 To qs.Count - 1
        oWrite.WriteLine("{0, 7}", qs(i).ToString)
    Next i
End If

```

```

For Each currentpath In listofpaths

```

```

    Dim Jgr_Calmon, Jgr1_CW, Jgr1_Bazin, Jgr1_HW, Jgr1_Valiantzas As New List(Of
Double)

```

```

    For Each itemChecked In CheckedListBox2.CheckedItems
        If itemChecked = "DW-Swammee and Jain" Then
            Dim KinVisc, Reynolds, RelatRoughness, f_SJ, AA, BB, CC, DD As Double
            KinVisc = 0.000001
            Jgr1_SJ.Clear()
            Hf1.Clear()
            H1.Clear()
            Dim counter2a As New Integer
            Dim QpersectionA As New Double
            For i = 0 To currentpath.Count - 1
                Dim VV, EE As Double
                If currentpath(i) = 1 Then Exit For
                tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
                ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
                Reynolds = ((4 * (qs(tttt) / 1000)) / (3.14 * KinVisc * diam(tttt)))
            Next i
        End If
    Next itemChecked

```

```

RelatRoughness = eqroughness12(ssss) / diam(tttt)
AA = (1 / 3.7) * RelatRoughness
BB = 5.74 / (Reynolds ^ 0.9)
CC = AA + BB
DD = Math.Log10(CC)
EE = DD ^ (-2)
f_SJ = 0.25 * EE
VV = ((4 * (qs(tttt) / 1000)) / (3.14 * Math.Pow(diam(tttt), 2)))
Jgr1_SJ.Add(f_SJ * (1 / diam(tttt)) * (Math.Pow(VV, 2) / (2 * 9.81)))
Hf1.Add(Jgr1_SJ(i) * length(tttt))
QpersectionA = qq1(tttt) + qq2(tttt) + qq3(tttt) + qq4(tttt)
If QpersectionA > 0 Then
    counter2a = counter2a + 1
End If
If counter2a = 0 And QpersectionA = 0 Then
    H1.Add(altitude(tttt))
ElseIf counter2a = 1 And QpersectionA <> 0 Then
    H1.Add(hr(tttt) + Hf1(i) + (altitude(tttt)))
ElseIf counter2a >= 1 And QpersectionA = 0 Then
    H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
ElseIf counter2a > 1 And QpersectionA > 0 Then
    uuuu = H1(i - 1) + Hf1(i)
    If uuuu >= (hr(tttt) + altitude(tttt)) Then
        H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
    Else
        H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i) + Hf1(i) + (hr(tttt) + altitude(tttt)
- uuuu))
    End If
End If
If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
    Hout_SJ.Add(H1(i))
End If
Next i

ElseIf itemChecked = "DW-Colebrook and White" Then
Dim KinVisc, Reynolds, RelatRoughness, VVV, G, W As Double
Jgr1_CW.Clear()
Hf1.Clear()

```



```

H1.Clear()
Dim counter2b As New Integer
Dim QpersectionB As New Double
KinVisc = 0.000001
For i = 0 To currentpath.Count - 1
    If currentpath(i) = 1 Then Exit For
    tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
    ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
    Reynolds = ((4 * (qs(tttt) / 1000)) / (3.14 * KinVisc * diam(tttt)))
    RelatRoughness = eqroughness12(ssss) / diam(tttt)
    If Reynolds = 0 Then
        Jgr1_CW.Add(0)
    Else
        For x = 0.008 To 0.09 Step 0.0001
            G = 1 / Math.Sqrt(x)
            W = -2 * (Math.Log10(((1 / 3.72) * RelatRoughness) + ((2.51 /
Reynolds) * (1 / Math.Sqrt(x))))))
            If (G - W) <= 0.001 Then
                VVV = ((4 * (qs(tttt) / 1000)) / (3.14 *
Math.Pow(diam(tttt), 2)))
                Jgr1_CW.Add(x * (1 / diam(tttt)) * (Math.Pow(VVV, 2) / (2 *
9.81)))
            End If
        Next x
    End If
    Hf1.Add(Jgr1_CW(i) * length(tttt))

QpersectionB = qq1(tttt) + qq2(tttt) + qq3(tttt) + qq4(tttt)
If QpersectionB > 0 Then
    counter2b = counter2b + 1
End If
If counter2b = 0 And QpersectionB = 0 Then
    H1.Add(altitude(tttt))
ElseIf counter2b = 1 And QpersectionB <> 0 Then
    H1.Add(hr(tttt) + Hf1(i) + (altitude(tttt)))
ElseIf counter2b >= 1 And QpersectionB = 0 Then
    H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))

```

```

ElseIf counter2b > 1 And QpersectionB > 0 Then
    uuuu = H1(i - 1) + Hf1(i)
    If uuuu >= (hr(tttt) + altitude(tttt)) Then
        H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
    Else
        H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i) + Hf1(i) + (hr(tttt) + altitude(tttt))
- uuuu))
    End If
End If
If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
    Hout_CW.Add(H1(i))
End If
Next i

ElseIf itemChecked = "Bazin" Then
    Dim K, L As Double
    Jgr1_Bazin.Clear()
    Hf1.Clear()
    H1.Clear()
    Dim counter2c As New Integer
    Dim QperSectionC As New Double

    For i = 0 To currentpath.Count - 1

        If currentpath(i) = 1 Then Exit For
        tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
        ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
        K = 2 * bazin_g2(ssss) * diam(tttt) ^ (-0.5)
        L = 0.000857 * ((1 + K) ^ 2) * Math.Pow(diam(tttt), -5)
        Jgr1_Bazin.Add(L * Math.Pow((qs(tttt) / 1000), 2))
        Hf1.Add(Jgr1_Bazin(i) * length(tttt))

        QperSectionC = qq1(tttt) + qq2(tttt) + qq3(tttt) + qq4(tttt)
        If QperSectionC > 0 Then
            counter2c = counter2c + 1
        End If
    End If

```

```

        If counter2c = 0 And QperSectionC = 0 Then
            H1.Add(altitude(tttt))
        ElseIf counter2c = 1 And QperSectionC <> 0 Then
            H1.Add(hr(tttt) + Hf1(i) + (altitude(tttt)))
        ElseIf counter2c >= 1 And QperSectionC = 0 Then
            H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
        ElseIf counter2c > 1 And QperSectionC > 0 Then
            uuuu = H1(i - 1) + Hf1(i)
            If uuuu >= (hr(tttt) + altitude(tttt)) Then
                H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
            Else
                H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i) + Hf1(i) + (hr(tttt) + altitude(tttt)))
            End If
        End If
    End If

    If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
        Hout_Bazin.Add(H1(i))
    End If

Next i

ElseIf itemChecked = "Hazen Williams" Then
    Dim M, O As Double

    Jgr1_HW.Clear()
    Hf1.Clear()
    H1.Clear()
    Dim counter2d As New Integer
    Dim QperSectionD As New Double

    For i = 0 To currentpath.Count - 1
        If currentpath(i) = 1 Then Exit For
        tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
        ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
        M = Math.Pow(((qs(tttt) / 1000) / HazenWilliams_C2(ssss)), 1.852)
        O = Math.Pow(diam(tttt), -4.87)

```

- uuuu)

```

Jgr1_HW.Add(10.67 * M * O)
Hf1.Add(Jgr1_HW(i) * length(tttt))

QperSectionD = qq1(tttt) + qq2(tttt) + qq3(tttt) + qq4(tttt)
If QperSectionD > 0 Then
    counter2d = counter2d + 1
End If

If counter2d = 0 And QperSectionD = 0 Then
    H1.Add(altitude(tttt))
ElseIf counter2d = 1 And QperSectionD <> 0 Then
    H1.Add(hr(tttt) + Hf1(i) + (altitude(tttt)))
ElseIf counter2d >= 1 And QperSectionD = 0 Then
    H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
ElseIf counter2d > 1 And QperSectionD > 0 Then
    uuuu = H1(i - 1) + Hf1(i)
    If uuuu >= (hr(tttt) + altitude(tttt)) Then
        H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
    Else
        H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i) + Hf1(i) + (hr(tttt) + altitude(tttt))
- uuuu))
    End If
End If

If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
    Hout_HW.Add(H1(i))
End If
Next i

ElseIf itemChecked = "Calmon-Lechapt" Then

    Jgr_Calmon.Clear()
    Hf1.Clear()
    H1.Clear()

    Dim counter2e As New Integer
    Dim QperSection As New Double

```

```

For i = 0 To currentpath.Count - 1
  If currentpath(i) = 1 Then Exit For

  tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
  If downhill.IndexOf(currentpath(i)) > 0 Then
    vvvv = downhill.IndexOf(currentpath(i + 1))
  Else
    vvvv = downhill.IndexOf(currentpath(i))
  End If

  ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
  Jgr_Calmon.Add(((Calmon_L2(ssss) * Math.Pow(qs(tttt) / 1000,
Calmon_M2(ssss))) / Math.Pow(diam(tttt), Calmon_N2(ssss))) / 1000)
  Hf1.Add(Jgr_Calmon(i) * length(tttt))

  QperSection = qq1(tttt) + qq2(tttt) + qq3(tttt) + qq4(tttt)

  If QperSection > 0 Then
    counter2e = counter2e + 1
  End If

  If counter2e = 0 And QperSection = 0 Then
    H1.Add(altitude(tttt))
  ElseIf counter2e = 1 And QperSection <> 0 Then
    H1.Add(hr(tttt) + Hf1(i) + (altitude(tttt)))
  ElseIf counter2e >= 1 And QperSection = 0 Then
    H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
  ElseIf counter2e > 1 And QperSection > 0 Then
    uuuu = H1(i - 1) + Hf1(i)
    If uuuu >= (hr(tttt) + altitude(tttt)) Then
      H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
    Else
      H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i) + Hf1(i) + (hr(tttt) + altitude(tttt)
- uuuu))
    End If
  End If
End If

```

```

        If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
            Hout_Calmon.Add(H1(i))
        End If
    Next i
ElseIf itemChecked = "Valiantzas" Then

    Dim EqRoughness0, kappa_miden, mi_mikro As Double
    Jgr1_Valiantzas.Clear()
    Hf1.Clear()
    H1.Clear()
    Dim counter2f As New Integer
    Dim QperSectionE As New Double

    EqRoughness0 = 0.0439 * (10 ^ -3)

    For i = 0 To currentpath.Count - 1
        If currentpath(i) = 1 Then Exit For
        tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
        ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
        kappa_miden = 0.0126 * (eqroughness12(ssss) ^ 0.3)
        mi_mikro = 1 - 0.133 * ((1 + (eqroughness12(ssss) / EqRoughness0)) ^ -
1)
        Jgr1_Valiantzas.Add(((kappa_miden * ((qs(tttt) / 1000) ^ 2)) /
(diam(tttt) ^ 5.3)) ^ mi_mikro)

        Hf1.Add(Jgr1_Valiantzas(i) * length(tttt))

        QperSectionE = qq1(tttt) + qq2(tttt) + qq3(tttt) + qq4(tttt)
        If QperSectionE > 0 Then
            counter2f = counter2f + 1
        End If

        If counter2f = 0 And QperSectionE = 0 Then
            H1.Add(altitude(tttt))
        ElseIf counter2f = 1 And QperSectionE <> 0 Then
            H1.Add(hr(tttt) + Hf1(i) + (altitude(tttt)))
        ElseIf counter2f >= 1 And QperSectionE = 0 Then
            H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
        End If
    Next i
End If

```

```

ElseIf counter2f > 1 And OperSectionE > 0 Then
    uuuu = H1(i - 1) + Hf1(i)
    If uuuu >= (hr(tttt) + altitude(tttt)) Then
        H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i))
    Else
        H1.Add(H1(i - 1) + Hf1(i) + Hf1(i) + (hr(tttt) + altitude(tttt))
- uuuu))
    End If
End If

If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
    Hout_Valiantzas.Add(H1(i))
End If
Next i
End If
Next itemChecked
Next
End If

```

```

For i = 15 To 18          ' Hide useless columns
    DataGridView1.Columns(i).Visible = False
Next

For Each itemChecked In CheckedListBox2.CheckedItems
    If itemChecked = "DW-Swammee and Jain" Then
        Hhead_SJ.Add(Hout_SJ.Max)
        Hout_SJ.Clear()
    ElseIf itemChecked = "DW-Colebrook and White" Then
        Hhead_CW.Add(Hout_CW.Max)
        Hout_CW.Clear()
    ElseIf itemChecked = "Bazin" Then
        Hhead_Bazin.Add(Hout_Bazin.Max)
        Hout_Bazin.Clear()
    ElseIf itemChecked = "Hazen Williams" Then

```

```

        Hhead_HW.Add(Hout_HW.Max)
        Hout_HW.Clear()
    ElseIf itemChecked = "Calmon-Lechapt" Then
        Hhead_Calmon.Add(Hout_Calmon.Max)
        Hout_Calmon.Clear()
    ElseIf itemChecked = "Valiantzas" Then
        Hhead_Valiantzas.Add(Hout_Valiantzas.Max)
        Hout_Valiantzas.Clear()
    End If
Next

Dim myComparer As IComparer(Of Double)
For Each itemchecked As String In CheckedListBox2.CheckedItems
    If itemchecked = "DW-Swamnee and Jain" Then
        myComparer = Nothing
        Hhead_SJ.Sort((Hhead_SJ.Count - numOfSimulations), numOfSimulations, myComparer)
    ElseIf itemchecked = "DW-Colebrook and White" Then
        myComparer = Nothing
        Hhead_CW.Sort((Hhead_CW.Count - numOfSimulations), numOfSimulations, myComparer)
    ElseIf itemchecked = "Bazin" Then
        myComparer = Nothing
        Hhead_Bazin.Sort((Hhead_Bazin.Count - numOfSimulations), numOfSimulations, myComparer)
    ElseIf itemchecked = "Hazen Williams" Then
        myComparer = Nothing
        Hhead_HW.Sort((Hhead_HW.Count - numOfSimulations), numOfSimulations, myComparer)
    ElseIf itemchecked = "Calmon-Lechapt" Then
        myComparer = Nothing
        Hhead_Calmon.Sort((Hhead_Calmon.Count - numOfSimulations), numOfSimulations, myComparer)
    ElseIf itemchecked = "Valiantzas" Then
        myComparer = Nothing
        Hhead_Valiantzas.Sort((Hhead_Valiantzas.Count - numOfSimulations), numOfSimulations,
myComparer)
    End If
Next itemchecked

If ToolStripComboBox1.Text = "Characteristic Curves" Then
    Debug.Print("==== End of: " & qq & "====")
End If

```



```

Next qq
  If ToolStripComboBox1.Text = "Characteristic Curves" Then
    For Each itemChecked In CheckedListBox2.CheckedItems
      If itemChecked = "DW-Swamnee and Jain" Then
        oWrite.WriteLine("{0, 7}", "Pressure head at the head (Swamee and Jain)")
        For i = 0 To Hhead_SJ.Count - 1
          oWrite.WriteLine("{0, 7}", Hhead_SJ(i).ToString)
        Next i
      ElseIf itemChecked = "DW-Colebrook and White" Then
        oWrite.WriteLine("{0, 7}", "Pressure head at the head (Colebrook-White)")
        For i = 0 To Hhead_CW.Count - 1
          oWrite.WriteLine("{0, 7}", Hhead_CW(i).ToString)
        Next i
      ElseIf itemChecked = "Bazin" Then
        oWrite.WriteLine("{0, 7}", "Pressure head at the head (Bazin)")
        For i = 0 To Hhead_Bazin.Count - 1
          oWrite.WriteLine("{0, 7}", Hhead_Bazin(i).ToString)
        Next i
      ElseIf itemChecked = "Hazen Williams" Then
        oWrite.WriteLine("{0, 7}", "Pressure head at the head (Hazen-Williams)")
        For i = 0 To Hhead_HW.Count - 1
          oWrite.WriteLine("{0, 7}", Hhead_HW(i).ToString)
        Next i
      ElseIf itemChecked = "Calmon-Lechapt" Then
        oWrite.WriteLine("{0, 7}", "Pressure head at the head (Calmon-Lechapt)")
        For i = 0 To Hhead_Calmon.Count - 1
          oWrite.WriteLine("{0, 7}", Hhead_Calmon(i).ToString)
        Next i
      ElseIf itemChecked = "Valiantzas" Then
        oWrite.WriteLine("{0, 7}", "Pressure head at the head (Valiantzas)")
        For i = 0 To Hhead_Valiantzas.Count - 1
          oWrite.WriteLine("{0, 7}", Hhead_Valiantzas(i).ToString)
        Next i
      End If
    Next itemChecked
  End If
oWrite.WriteLine("=====")
oWrite.Close()

```

```

For i = 16 To DataGridView1.ColumnCount - 1
    DataGridView1.Columns(i).Visible = False
Next
End Sub

```

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΥΔΡΟΣΤΟΜΙΟΥ: Υπολογισμός των μόνιμων δεικτών και στη συνέχεια των δεικτών αξιολόγησης της λειτουργίας των υδροστομίων

```

' ===== STEADY FLOW =====
If ToolStripComboBox1.Text = "Steady Flow" Then
    hin = CDb1(TextBox1.Text)
    Dim listofHper As New List(Of List(Of Double))
    Dim Hr_final As New List(Of Double)
    Dim Hmax As New Double
    Dim qq1, qq2, qq3, qq4 As New List(Of Double)
    Dim ContinueCheckForPermanentFlow As Boolean
    Dim TempArrayForPermanentFlow(totRows - 2, 3) As Double
    Dim a, b As Double
    Dim SumPerSection, CumulativeSumPerSection As New List(Of Double)
    Dim k_counter As Integer
    Dim ListOfFinalSnapshotArrays As New List(Of Array)
    Dim finalSnapshotArray2(totRows - 2, 3) As Double
    ContinueCheckForPermanentFlow = True
    For i = 0 To (totRows - 2)
        For j = 0 To 3
            finalSnapshotArray2(i, j) = finalSnapshotArray(i, j)
        Next j
    Next i
    ListOfFinalSnapshotArrays.Add(finalSnapshotArray)
    Do
        listofHper.Clear()
        Hr_final.Clear()
        Hout_HW.Clear()
        Hout_SJ.Clear()
        Hout_CW.Clear()
        Hout_Bazin.Clear()
        Hout_Calmon.Clear()
        Hout_Valiantzas.Clear()
    
```

```

qq1.Clear()
qq2.Clear()
qq3.Clear()
qq4.Clear()
qsum_persim.Clear()
k_counter = k_counter + 1
For i = 0 To downhill.Count - 1
    qq1.Add(finalSnapshotArray2(i, 0))
    qq2.Add(finalSnapshotArray2(i, 1))
    qq3.Add(finalSnapshotArray2(i, 2))
    qq4.Add(finalSnapshotArray2(i, 3))
Next i
Dim qs As New List(Of Double)
Dim qs_bis As New List(Of Double)
Dim Index_Of_Disfavored_Path As New Integer
For i = 0 To (downhill.Count - 1)
    qs.Add(0)
    qs_bis.Add(0)
Next i
For Each currentpath In listofpaths
    qcount = 0
    For i = 0 To currentpath.Count - 1
        If currentpath(i) = 1 Then Exit For
        ttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
        If qs_bis(ttt) = 0 Then
            qcount = qcount + qq1(ttt) + qq2(ttt) + qq3(ttt) + qq4(ttt)
            qs(ttt) = qs(ttt) + qcount
            qs_bis(ttt) = 1
        ElseIf qs_bis(ttt) = 1 Then
            qs(ttt) = qs(ttt) + qcount
        End If
    Next i
Next
For j = 0 To downhill.Count - 1
    Hr_final.Add(0)
Next j
For Each itemChecked In CheckedListBox2.CheckedItems
    If itemChecked = "Hazen Williams" Then

```

```

For Each currentpath In listofpaths
Dim Jgr1_HW As New List(Of Double)
Dim M, O As Double
Jgr1_HW.Clear()
Hf1.Clear()
Dim H1_per As New List(Of Double)
For i = 0 To currentpath.Count - 1
If currentpath(i) = 1 Then listofHper.Add(H1_per)
If currentpath(i) = 1 Then Exit For
tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
M = Math.Pow(((qs(tttt) / 1000) / HazenWilliams_C2(ssss)), 1.852)
O = Math.Pow(diam(tttt), -4.87)
Jgr1_HW.Add(10.67 * M * O)
Hf1.Add(Jgr1_HW(i) * length(tttt))
If i = 0 Then
H1_per.Add(hr(tttt) + altitude(tttt))
Else
H1_per.Add(H1_per(i - 1) + Hf1(i - 1))
End If
If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
Hout_HW.Add(H1_per(i))
End If
Next i
Next currentpath
ElseIf itemChecked = "Bazin" Then

For Each currentpath In listofpaths
Dim K, L As Double
Dim Jgr1_Bazin As New List(Of Double)
Jgr1_Bazin.Clear()
Hf1.Clear()
Dim H1_per As New List(Of Double)
For i = 0 To currentpath.Count - 1
If currentpath(i) = 1 Then listofHper.Add(H1_per)
If currentpath(i) = 1 Then Exit For
tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))

```

```

K = 2 * bazin_g2(ssss) * diam(tttt) ^ (-0.5)
L = 0.000857 * ((1 + K) ^ 2) * Math.Pow(diam(tttt), -5)
Jgr1_Bazin.Add(L * Math.Pow((qs(tttt) / 1000), 2))
Hf1.Add(Jgr1_Bazin(i) * length(tttt))
If i = 0 Then
    H1_per.Add(hr(tttt) + altitude(tttt))
Else
    H1_per.Add(H1_per(i - 1) + Hf1(i - 1))
End If
If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
    Hout_Bazin.Add(H1_per(i))
End If
Next i
Next currentpath

ElseIf itemChecked = "DW-Swamnee and Jain" Then
For Each currentpath In listofpaths
    Dim Jgr1_DW_SJ As New List(Of Double)
    Dim KinVisc, Reynolds1, RelatRoughness1, variable1, variable2,
variable3, variable4, variable5 As New Double
    KinVisc = 0.000001
    Jgr1_DW_SJ.Clear()
    Hf1.Clear()
    Dim H1_per As New List(Of Double)
    For i = 0 To currentpath.Count - 1
        Dim VV, EE As Double
        If currentpath(i) = 1 Then listofHper.Add(H1_per)
        If currentpath(i) = 1 Then Exit For
        tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
        ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
        Reynolds1 = ((4 * (qs(tttt) / 1000)) / (3.14 * KinVisc *
diam(tttt)))

        RelatRoughness1 = eqroughness12(ssss) / diam(tttt)
        variable2 = (1 / 3.7) * RelatRoughness1
        variable3 = 5.74 / (Reynolds1 ^ 0.9)
        variable4 = variable2 + variable3
        variable5 = Math.Log10(variable4)
        EE = variable5 ^ (-2)

```

```

variable1 = 0.25 * EE
VV = ((4 * (qs(tttt) / 1000)) / (3.14 * Math.Pow(diam(tttt), 2)))
Jgr1_DW_SJ.Add(variable1 * (1 / diam(tttt)) * (Math.Pow(VV, 2) / (2
* 9.81)))

Hf1.Add(Jgr1_DW_SJ(i) * length(tttt))
If i = 0 Then
    H1_per.Add(hr(tttt) + altitude(tttt))
Else
    H1_per.Add(H1_per(i - 1) + Hf1(i - 1))
End If

If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
    Hout_SJ.Add(H1_per(i))
End If
Next i
Next currentpath
ElseIf itemChecked = "DW-Colebrook and White" Then
For Each currentpath In listofpaths
    Dim Jgr1_DW_CW As New List(Of Double)
    Dim KinVisc, Reynolds, RelatRoughness, VVV, G, W As New Double
    KinVisc = 0.000001
    Jgr1_DW_CW.Clear()
    Hf1.Clear()
    Dim H1_per As New List(Of Double)
    For i = 0 To currentpath.Count - 1
        If currentpath(i) = 1 Then listofHper.Add(H1_per)
        If currentpath(i) = 1 Then Exit For
        tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
        ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
        Reynolds = ((4 * (qs(tttt) / 1000)) / (3.14 * KinVisc *
diam(tttt)))

        RelatRoughness = eqroughness12(ssss) / diam(tttt)
        If Reynolds = 0 Then
            Jgr1_DW_CW.Add(0)
        Else
            For x = 0.008 To 0.09 Step 0.0001
                G = 1 / Math.Sqrt(x)

```

```

/ Reynolds) * (1 / Math.Sqrt(x))))
Math.Pow(diam(tttt), 2))
/ (2 * 9.81)))

W = -2 * (Math.Log10(((1 / 3.72) * RelatRoughness) + ((2.51
If (G - W) <= 0.001 Then
    VVV = ((4 * (qs(tttt) / 1000)) / (3.14 *
    Jgr1_DW_CW.Add(x * (1 / diam(tttt)) * (Math.Pow(VVV, 2)
        Exit For
    End If
Next x
End If
Hf1.Add(Jgr1_DW_CW(i) * length(tttt))
If i = 0 Then
    H1_per.Add(hr(tttt) + altitude(tttt))
Else
    H1_per.Add(H1_per(i - 1) + Hf1(i - 1))
End If
If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
    Hout_CW.Add(H1_per(i))
End If
Next i
Next currentpath

ElseIf itemChecked = "Calmon-Lechapt" Then
    For Each currentpath In listofpaths
        Dim Jgr1_Calmon_Lechapt As New List(Of Double)
        Jgr1_Calmon_Lechapt.Clear()
        Hf1.Clear()
        Dim H1_per As New List(Of Double)
        For i = 0 To currentpath.Count - 1
            If currentpath(i) = 1 Then listofHper.Add(H1_per)
            If currentpath(i) = 1 Then Exit For
            tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
            ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
            Jgr1_Calmon_Lechapt.Add(((Calmon_L2(ssss) * Math.Pow(qs(tttt) /
1000, Calmon_M2(ssss))) / Math.Pow(diam(tttt), Calmon_N2(ssss))) / 1000)
            Hf1.Add(Jgr1_Calmon_Lechapt(i) * length(tttt))
            If i = 0 Then

```

```

        H1_per.Add(hr(tttt) + altitude(tttt))
    Else
        H1_per.Add(H1_per(i - 1) + Hf1(i - 1))
    End If

    If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
        Hout_Calmon.Add(H1_per(i))
    End If
Next i
Next currentpath

ElseIf itemChecked = "Valiantzas" Then
    For Each currentpath In listofpaths
        Dim EqRoughness0, kappa_miden, mi_mikro As Double
        Dim Jgr1_Valiantzas As New List(Of Double)
        Jgr1_Valiantzas.Clear()
        Hf1.Clear()
        Dim H1_per As New List(Of Double)
        EqRoughness0 = 0.0439 * (10 ^ -3)
        For i = 0 To currentpath.Count - 1
            If currentpath(i) = 1 Then listofHper.Add(H1_per)
            If currentpath(i) = 1 Then Exit For
            tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
            ssss = diamit2.IndexOf(diam(tttt))
            kappa_miden = 0.0126 * (eqroughness12(ssss) ^ 0.3)
            mi_mikro = 1 - 0.133 * ((1 + (eqroughness12(ssss) / EqRoughness0)
^ -1)
(diam(tttt) ^ 5.3)) ^ mi_mikro)

            Jgr1_Valiantzas.Add(((kappa_miden * ((qs(tttt) / 1000) ^ 2)) /

            Hf1.Add(Jgr1_Valiantzas(i) * length(tttt))
            If i = 0 Then
                H1_per.Add(hr(tttt) + altitude(tttt))
            Else
                H1_per.Add(H1_per(i - 1) + Hf1(i - 1))
            End If
            If tttt = uphill.IndexOf(1) Then
                Hout_Valiantzas.Add(H1_per(i))
            End If

```



```

        Next i
    Next currentpath
End If
Next itemChecked
For Each itemChecked In CheckedListBox2.CheckedItems
    If itemChecked = "Hazen Williams" Then
        Hmax = Hout_HW.Max
        Index_Of_Disfavored_Path = Hout_HW.IndexOf(Hmax)
    ElseIf itemChecked = "Bazin" Then
        Hmax = Hout_Bazin.Max
        Index_Of_Disfavored_Path = Hout_Bazin.IndexOf(Hmax)
    ElseIf itemChecked = "DW-Swammee and Jain" Then
        Hmax = Hout_SJ.Max
        Index_Of_Disfavored_Path = Hout_SJ.IndexOf(Hmax)
    ElseIf itemChecked = "DW-Colebrook and White" Then
        Hmax = Hout_CW.Max
        Index_Of_Disfavored_Path = Hout_CW.IndexOf(Hmax)
    ElseIf itemChecked = "Calmon-Lechapt" Then
        Hmax = Hout_Calmon.Max
        Index_Of_Disfavored_Path = Hout_Calmon.IndexOf(Hmax)
    ElseIf itemChecked = "Valiantzas" Then
        Hmax = Hout_Valiantzas.Max
        Index_Of_Disfavored_Path = Hout_Valiantzas.IndexOf(Hmax)
    End If
Next itemChecked

```

Σύγκριση του διαθέσιμου φορτίου κεφαλής που εισήγαγε ο χρήστης (hin) με το απαιτούμενο πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή (Hmax).

```

If (Hmax - hin) < 0 And k_counter = 1 Then
    For i = 0 To downhill.Count - 1
        Hr_final.Add(hr(i))
    Next i
    ContinueCheckForPermanentFlow = False
Exit Do
Else
    For Each currentpath In listofpaths
        If currentpath Is listofpaths(Index_Of_Disfavored_Path) Then
            For Each H1_per In listofHper

```

```

        If H1_per Is listofHper(Index_Of_Disfavored_Path) Then
            For i = 0 To downhill.Count - 1
                tttt = downhill.IndexOf(currentpath(i))
                Hr_final(tttt) = H1_per(i)
                If H1_per(i) = Hmax Then Exit For
            Next i
            Exit For
        End If
    Next H1_per
End If
If currentpath Is listofpaths(Index_Of_Disfavored_Path) Then Exit For
Next currentpath

For Each currentpath In listofpaths
    Dim ffff As New Integer
    ffff = listofpaths.IndexOf(currentpath)
    If currentpath IsNot listofpaths(Index_Of_Disfavored_Path) Then
        For Each H1_per In listofHper
            If H1_per Is listofHper(ffff) Then
                For j = 0 To downhill.Count - 1
                    If currentpath(j) = 1 Then Exit For
                    tttt = downhill.IndexOf(currentpath(j))
                    If Hr_final(tttt) = 0 Then
                        Hr_final(tttt) = H1_per(j) + (Hmax - H1_per.Max)
                    End If
                Next j
            End If
        Next H1_per
    End If
Next currentpath
End If
For j = 0 To downhill.Count - 1
    Hr_final(j) = Hr_final(j) - altitude(j)
Next j
If (Hmax - hin) > 0 Then
    For j = 0 To downhill.Count - 1
        Hr_final(j) = Hr_final(j) - Math.Abs(Hmax - hin)
    Next j

```

```

Else
    For j = 0 To downhill.Count - 1
        Hr_final(j) = Hr_final(j) + Math.Abs(Hmax - hin)
    Next j
End If
For i = 0 To (totRows - 2)
    For j = 0 To 3
        If finalSnapshotArray2(i, j) <> 0 Then
            If Hr_final(i) < 4 And Hr_final(i) > 0 Then
                a = 1.597
                b = 3.84
                finalSnapshotArray2(i, j) = a * Math.Log(Hr_final(i)) + b
            ElseIf Hr_final(i) > 4 Then
                finalSnapshotArray2(i, j) = 6
            ElseIf Hr_final(i) < 0 Then
                finalSnapshotArray2(i, j) = 0
            End If
        End If
    Next j
Next i
ListOfFinalSnapshotArrays.Add(finalSnapshotArray2)
If Math.Abs(hin - Hmax) < 0.001 Then
    ContinueCheckForPermanentFlow = False
Else
    For i = 0 To downhill.Count - 1
        If Hr_final(i) < 0 Then
            hr(i) = 0
        Else
            hr(i) = Hr_final(i)
        End If
    Next i
End If
Loop Until ContinueCheckForPermanentFlow = False
Dim hr_FinalSnapshotArray(totRows - 2, 3) As Double
For i = 0 To downhill.Count - 1
    For j = 0 To 3
        If finalSnapshotArray(i, j) <> 0 Then
            hr_FinalSnapshotArray(i, j) = hr(i)
        End If
    Next j
Next i

```

```

Else
    hr_FinalSnapshotArray(i, j) = 0
End If
Next j
Next i
For i = 0 To downhill.Count - 1
    For j = 0 To 3
        Dim aaaa As New Integer
        aaaa = simNum - 1
        Array3D(i, j, aaaa) = hr_FinalSnapshotArray(i, j)
    Next j
Next i

```

Υπολογισμός των τιμών του συντελεστή αξιοπιστίας του Hashimoto για κάθε υδροστόμιο στο τέλος του συνόλου των προσομοιώσεων

```

If ToolStripComboBox1.Text = "Steady Flow" Then
    For i = 0 To downhill.Count - 1
        For j = 0 To 3
            If hr_FinalSnapshotArray(i, j) = 0 Then
                Array_Ip(i, j) = 0
            ElseIf hr_FinalSnapshotArray(i, j) > 0 And hr_FinalSnapshotArray(i, j) <
hr_initial(i) Then
                Array_Ip(i, j) = 0
            Else
                Array_Ip(i, j) = 1
            End If
        Next j
    Next i
End If

If ToolStripComboBox1.Text = "Steady Flow" Then
    For i = 0 To downhill.Count - 1
        For j = 0 To 3
            Array_Hashimoto_arithmitis(i, j) = Array_Hashimoto_arithmitis(i, j) +
(Array_Ih(i, j) * Array_Ip(i, j))
            Array_Hashimoto_paranomastis(i, j) = Array_Hashimoto_paranomastis(i, j) +
Array_Ih(i, j)
            If Array_Hashimoto_paranomastis(i, j) <> 0 Then

```

```

        Array_Hashimoto(i, j) = Array_Hashimoto_arithmitis(i, j) /
Array_Hashimoto_paranomastis(i, j)
        ElseIf Array_Hashimoto_paranomastis(i, j) = 0 Then
            Array_Hashimoto(i, j) = 0
        End If
    Next j
Next i
End If
Next simNum
Παρουσίαση των αποτελεσμάτων
If ToolStripComboBox1.Text = "Steady Flow" Then
    Dim Array3D_second(downhill.Count - 1, 3, 2), Col_1 As Double, Col_2 As Double
    oWrite.WriteLine("Table with hr per simulation")
    oWrite.WriteLine("{0, 7}{1,3}{2, 7}", "Downhill", " ", "hr")
    For i = 0 To downhill.Count - 1
        For j = 0 To 3
            If j = 0 Then
                For k = 0 To numOfSimulations - 1
                    oWrite.WriteLine("{0, 7}{1,3}{2, 7}", downhill(i).ToString, " ", Array3D(i,
j, k).ToString)
                Next k
            End If
        Next j
    Next i
    If ToolStripComboBox1.Text = "Steady Flow" Then
        oWrite.WriteLine("Table with Hashimoto's Reliability Indicator")
        oWrite.WriteLine("{0, 7}{1,3}{2, 7}", "Downhill", " ", "Reliability Indicator")
        For i = 0 To downhill.Count - 1
            For j = 0 To 3
                If j = 0 Then
                    oWrite.WriteLine("{0, 7}{1,3}{2, 7}", downhill(i).ToString, " ",
Array_Hashimoto(i, j).ToString)
                End If
            Next j
        Next i
    End If
    For Col_1 = 0 To downhill.Count - 1
        For Col_2 = 0 To 3

```

```

Dim templist As New List(Of Double)

For i = 0 To (numOfSimulations - 1)
    If Array3D(Col_1, Col_2, i) <> 0 Then
        templist.Add(Array3D(Col_1, Col_2, i))
    End If
Next i

If templist.Count = 0 Then
    Array3D_second(Col_1, Col_2, 0) = 0
    Array3D_second(Col_1, Col_2, 1) = 0
    Array3D_second(Col_1, Col_2, 2) = 0
Else
    Array3D_second(Col_1, Col_2, 0) = templist.Max
    Array3D_second(Col_1, Col_2, 1) = templist.Min
    Array3D_second(Col_1, Col_2, 2) = templist.Average
End If
Next Col_2
Next Col_1
oWrite.WriteLine("1st Hydrant: Table with Max, Min, Average hr")
oWrite.WriteLine("{0, 7}{1,3}{2, 7}{3,3}{4, 7}{5,3}{6, 7}", "Downhill", " ", "hr_max", " ",
"hr_min", " ", "hr_average")
For i = 0 To downhill.Count - 1
    For j = 0 To 3
        If j = 0 Then
            oWrite.WriteLine("{0, 7}{1,3}{2, 7}{3,3}{4, 7}{5,3}{6, 7}", downhill(i).ToString, "
", Array3D_second(i, j, 0).ToString, " ", Array3D_second(i, j, 1).ToString, " ", Array3D_second(i, j,
2).ToString)
        End If
    Next j
Next i
End If

```

Σχεδιασμός των διαγραμμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση σε επίπεδο υδροστομίου και σε επίπεδο δικτύου

```

Private Sub ToolStripButton7_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ToolStripButton7.Click

```

```
Chart1.Titles.Clear()
Chart1.Titles.Add("Characteristic Curves")
Dim zzz As New List(Of Integer)
Dim Cx As Integer

For Each kkk As ToolStripMenuItem In ToolStripMenuItem4.DropDownItems
    If kkk.Checked Then
        Select Case kkk.Text
            Case "C10"
                Cx = 10
                zzz.Add(Cx)
            Case "C20"
                Cx = 20
                zzz.Add(Cx)
            Case "C30"
                Cx = 30
                zzz.Add(Cx)
            Case "C40"
                Cx = 40
                zzz.Add(Cx)
            Case "C50"
                Cx = 50
                zzz.Add(Cx)
            Case "C60"
                Cx = 60
                zzz.Add(Cx)
            Case "C70"
                Cx = 70
                zzz.Add(Cx)
            Case "C80"
                Cx = 80
                zzz.Add(Cx)
            Case "C90"
                Cx = 90
                zzz.Add(Cx)
        End Select
    End If
Next kkk
```

```

Dim QavailableListForCC As New List(Of Double)
For i = 0 To ListBox1.Items.Count - 1
    QavailableListForCC.Add(ListBox1.Items(i))
Next i
QavailableListForCC.Sort()
For Each itemchecked In CheckedListBox2.CheckedItems
    If itemchecked = "DW-Swammee and Jain" Then
        For Each kkk As Integer In zzz
            Dim MyYYYYList_SJ As New List(Of Double)
            Dim MyYYYYList_CW As New List(Of Double)
            Dim MyYYYYList_Bazin As New List(Of Double)
            Dim MyYYYYList_HW As New List(Of Double)
            Dim ser As New Series
            For i = ((kkk * numOfSimulations) / 100) To Hhead_SJ.Count Step numOfSimulations
                MyYYYYList_SJ.Add(Hhead_SJ(i))
            Next i
            ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
            Me.Refresh()
            For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1
                ser.ChartType = SeriesChartType.Line
                ser.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_SJ(i))
                ToolStripProgressBar1.Maximum = numOfSimulations
                ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)
            Next i
            ser.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
            ser.Name = "C" & kkk.ToString
            Try
                Chart1.Series.Add(ser)
                ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
                ToolStripProgressBar1.Value = 0
                Chart1.Show()
            Catch
            End Try
        Next kkk
    ElseIf itemchecked = "DW-Colebrook and White" Then
        For Each kkk As Integer In zzz
            Dim MyYYYYList_SJ As New List(Of Double)
            ' List of Y axis

```



```

Dim MyYYYYList_CW As New List(Of Double)
Dim MyYYYYList_Bazin As New List(Of Double)
Dim MyYYYYList_HW As New List(Of Double)
Dim ser As New Series
For i = ((kkk * numOfSimulations) / 100) To Hhead_CW.Count Step numOfSimulations
    MyYYYYList_CW.Add(Hhead_CW(i))
Next i
ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
Me.Refresh()
For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1
    ser.ChartType = SeriesChartType.Line
    ser.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_CW(i))
    ToolStripProgressBar1.Maximum = numOfSimulations
    ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)
Next i
ser.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
ser.Name = "C" & kkk.ToString
Try
    Chart1.Series.Add(ser)
    ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
    ToolStripProgressBar1.Value = 0
    Chart1.Show()
Catch
End Try
Next kkk

ElseIf itemchecked = "Bazin" Then
    For Each kkk As Integer In zzz
        Dim MyYYYYList_SJ As New List(Of Double)
        Dim MyYYYYList_CW As New List(Of Double)
        Dim MyYYYYList_Bazin As New List(Of Double)
        Dim MyYYYYList_HW As New List(Of Double)

        Dim ser As New Series
        For i = ((kkk * numOfSimulations) / 100) To Hhead_Bazin.Count Step numOfSimulations
            MyYYYYList_Bazin.Add(Hhead_Bazin(i))
        Next i
        ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
    
```

```

Me.Refresh()
For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1
    ser.ChartType = SeriesChartType.Line
    ser.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_Bazin(i))
    ToolStripProgressBar1.Maximum = numofSimulations
    ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)
Next i

ser.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
ser.Name = "C" & kkk.ToString
Try
    Chart1.Series.Add(ser)
    ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
    ToolStripProgressBar1.Value = 0
    Chart1.Show()
Catch

End Try
Next kkk

ElseIf itemchecked = "Hazen Williams" Then
    For Each kkk As Integer In zzz
        Dim MyYYYYList_SJ As New List(Of Double)
        Dim MyYYYYList_CW As New List(Of Double)
        Dim MyYYYYList_Bazin As New List(Of Double)
        Dim MyYYYYList_HW As New List(Of Double)
        Dim ser As New Series
        For i = ((kkk * numofSimulations) / 100) To Hhead_HW.Count Step numofSimulations
            MyYYYYList_HW.Add(Hhead_HW(i))
        Next i
        ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
        Me.Refresh()

        For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1
            ser.ChartType = SeriesChartType.Line
            ser.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_HW(i))
            ToolStripProgressBar1.Maximum = numofSimulations
            ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)

```

```

        Next i

        ser.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
        ser.Name = "C" & kkk.ToString
        Try
            Chart1.Series.Add(ser)
            ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
            ToolStripProgressBar1.Value = 0
            Chart1.Show()
        Catch
        End Try
    Next kkk
End If
Next itemchecked

End Sub

```

Ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει το παραγόμενο διάγραμμα ως μια εικόνα .jpeg

```

Private Sub SaveChartToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ClearChartToolStripMenuItem.Click
    Try
        SaveFileDialog1.Filter() = "JPEG files (*.jpg)|*.jpg|PNG files (*.png)|*.png|GIF files
(*.gif)|*.gif"
        SaveFileDialog1.ShowDialog()
        Chart1.SaveImage(SaveFileDialog1.FileName, ChartImageFormat.Jpeg)
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show("Can not export image" _
            , "NIRRIIS Error", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    End Try
End Sub
Private Sub ClearChartToolStripMenuItem1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ClearChartToolStripMenuItem1.Click
    Chart1.Titles.Clear()
    Chart1.Series.Clear()
End Sub

Private Sub ToolStripButton2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ToolStripButton2.Click

```

```

Try
    MsgBox(ImportXML())
Catch
    MessageBox.Show("Can not import file" _
        , "NIRRIIS Error", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
End Try
End Sub

```

Σχεδιάζονται τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπύλων με δείκτες

```

Private Sub TreeView1_AfterSelect(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.TreeViewEventArgs) Handles TreeView1.AfterSelect

    For Each ctrl As Control In SplitContainer1.Panel2.Controls
        ctrl.Hide()
    Next ctrl

    Chart1.Series.Clear()
    Chart1.Titles.Clear()

    Select Case e.Node.Text
        Case "Network View"
            DataGridView1.Show()
        Case "DW-Swamnee and Jain"
            Chart1.Titles.Add("Characteristic Curves")
            Dim zzz As New List(Of Integer)
            Dim Cx As Integer
            For Each kkk As ToolStripMenuItem In ToolStripMenuItem4.DropDownItems
                If kkk.Checked Then
                    Select Case kkk.Text
                        Case "C10"
                            Cx = 10
                            zzz.Add(Cx)
                        Case "C20"
                            Cx = 20
                            zzz.Add(Cx)
                        Case "C30"
                            Cx = 30
                            zzz.Add(Cx)
                        Case "C40"

```

```

        Cx = 40
        zzz.Add(Cx)
    Case "C50"
        Cx = 50
        zzz.Add(Cx)
    Case "C60"
        Cx = 60
        zzz.Add(Cx)
    Case "C70"
        Cx = 70
        zzz.Add(Cx)
    Case "C80"
        Cx = 80
        zzz.Add(Cx)
    Case "C90"
        Cx = 90
        zzz.Add(Cx)
    End Select
End If
Next kkk

Dim QavailableListForCC As New List(Of Double)
For i = 0 To ListBox1.Items.Count - 1
    QavailableListForCC.Add(ListBox1.Items(i))
Next i

QavailableListForCC.Sort()
For Each kkk As Integer In zzz
    Dim MyYYYYList_SJ As New List(Of Double)
    Dim ser_SJ As New Series
    For i = ((kkk * numOfSimulations) / 100) To Hhead_SJ.Count Step numOfSimulations
        MyYYYYList_SJ.Add(Hhead_SJ(i))
    Next i
    ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
    Me.Refresh()
    For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1
        ser_SJ.ChartType = SeriesChartType.Line
        ser_SJ.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_SJ(i))
    Next i
Next kkk

```

```

        ToolStripProgressBar1.Maximum = numOfSimulations
        ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)
    Next i
    ser_SJ.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
    ser_SJ.Name = "C" & kkk.ToString
    Try
        Chart1.Series.Add(ser_SJ)
        ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
        ToolStripProgressBar1.Value = 0
        Chart1.Show()
    Catch
    End Try
Next kkk
Chart1.Show()
Case "DW-Colebrook and White"
Chart1.Series.Clear()
Chart1.Titles.Clear()
Chart1.Titles.Add("Characteristic Curves")
Dim zzz As New List(Of Integer)
Dim Cx As Integer
For Each kkk As ToolStripMenuItem In ToolStripMenuItem4.DropDownItems
    If kkk.Checked Then
        Select Case kkk.Text
            Case "C10"
                Cx = 10
                zzz.Add(Cx)
            Case "C20"
                Cx = 20
                zzz.Add(Cx)
            Case "C30"
                Cx = 30
                zzz.Add(Cx)
            Case "C40"
                Cx = 40
                zzz.Add(Cx)
            Case "C50"
                Cx = 50
                zzz.Add(Cx)
        End Select
    End If
End For

```

```

        Case "C60"
            Cx = 60
            zzz.Add(Cx)
        Case "C70"
            Cx = 70
            zzz.Add(Cx)
        Case "C80"
            Cx = 80
            zzz.Add(Cx)
        Case "C90"
            Cx = 90
            zzz.Add(Cx)
    End Select
End If
Next kkk
Dim QavailableListForCC As New List(Of Double)
For i = 0 To ListBox1.Items.Count - 1
    QavailableListForCC.Add(ListBox1.Items(i))
Next i
QavailableListForCC.Sort()

For Each kkk As Integer In zzz
    Dim MyYYYYList_CW As New List(Of Double)
    Dim ser_CW As New Series
    For i = ((kkk * numOfSimulations) / 100) To Hout_CW.Count Step numOfSimulations
        MyYYYYList_CW.Add(Hout_CW(i))
    Next i
    ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
    Me.Refresh()
    For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1
        ser_CW.ChartType = SeriesChartType.Line
        ser_CW.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_CW(i))

        ToolStripProgressBar1.Maximum = numOfSimulations
        ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)
    Next i
    ser_CW.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
    ser_CW.Name = "C" & kkk.ToString

```

```

    Try
        Chart1.Series.Add(ser_CW)
        ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
        ToolStripProgressBar1.Value = 0
        Chart1.Show()
    Catch

    End Try
Next kkk
Chart1.Show()

Case "Bazin"
Chart1.Series.Clear()
Chart1.Titles.Clear()
Chart1.Titles.Add("Characteristic Curves")
Dim zzz As New List(Of Integer)
Dim Cx As Integer
For Each kkk As ToolStripMenuItem In ToolStripMenuItem4.DropDownItems
    If kkk.Checked Then
        Select Case kkk.Text
            Case "C10"
                Cx = 10
                zzz.Add(Cx)
            Case "C20"
                Cx = 20
                zzz.Add(Cx)
            Case "C30"
                Cx = 30
                zzz.Add(Cx)
            Case "C40"
                Cx = 40
                zzz.Add(Cx)
            Case "C50"
                Cx = 50
                zzz.Add(Cx)
            Case "C60"
                Cx = 60
                zzz.Add(Cx)
        End Select
    End If
End For

```



```

        Case "C70"
            Cx = 70
            zzz.Add(Cx)
        Case "C80"
            Cx = 80
            zzz.Add(Cx)
        Case "C90"
            Cx = 90
            zzz.Add(Cx)
    End Select
End If
Next kkk
Dim QavailableListForCC As New List(Of Double)
For i = 0 To ListBox1.Items.Count - 1
    QavailableListForCC.Add(ListBox1.Items(i))
Next i
QavailableListForCC.Sort()
For Each kkk As Integer In zzz
    Dim MyYYYYList_Bazin As New List(Of Double)
    Dim ser_Bazin As New Series
    For i = ((kkk * numofSimulations) / 100) To Hhead_Bazin.Count Step numofSimulations
        MyYYYYList_Bazin.Add(Hhead_Bazin(i))
    Next i
    ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
    Me.Refresh()
    For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1
        ser_Bazin.ChartType = SeriesChartType.Line
        ser_Bazin.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_Bazin(i))
        ToolStripProgressBar1.Maximum = numofSimulations
        ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)
    Next i
    ser_Bazin.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
    ser_Bazin.Name = "C" & kkk.ToString
    Try
        Chart1.Series.Add(ser_Bazin)
        ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
        ToolStripProgressBar1.Value = 0
        Chart1.Show()
    Catch
    End Try
Next kkk

```

```

        Catch
        End Try
    Next kkk
    Chart1.Show()

Case "Hazen Williams"
    Chart1.Series.Clear()
    Chart1.Titles.Clear()
    Chart1.Titles.Add("Characteristic Curves")
    Dim zzz As New List(Of Integer)
    Dim Cx As Integer
    For Each kkk As ToolStripMenuItem In ToolStripMenuItem4.DropDownItems
        If kkk.Checked Then
            Select Case kkk.Text
                Case "C10"
                    Cx = 10
                    zzz.Add(Cx)
                Case "C20"
                    Cx = 20
                    zzz.Add(Cx)
                Case "C30"
                    Cx = 30
                    zzz.Add(Cx)
                Case "C40"
                    Cx = 40
                    zzz.Add(Cx)
                Case "C50"
                    Cx = 50
                    zzz.Add(Cx)
                Case "C60"
                    Cx = 60
                    zzz.Add(Cx)
                Case "C70"
                    Cx = 70
                    zzz.Add(Cx)
                Case "C80"
                    Cx = 80
                    zzz.Add(Cx)
            End Select
        End If
    Next kkk
End Sub

```

```

                Case "C90"
                    Cx = 90
                    zzz.Add(Cx)
                End Select
            End If
        Next kkk
        Dim QavailableListForCC As New List(Of Double)
        For i = 0 To ListBox1.Items.Count - 1
            QavailableListForCC.Add(ListBox1.Items(i))
        Next i
        QavailableListForCC.Sort()
        For Each kkk As Integer In zzz
            Dim MyYYYYList_HW As New List(Of Double)
            Dim ser_HW As New Series
            For i = ((kkk * numOfSimulations) / 100) To Hout_HW.Count Step numOfSimulations
                MyYYYYList_HW.Add(Hout_HW(i))
            Next i
            ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
            Me.Refresh()
            For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1
                ser_HW.ChartType = SeriesChartType.Line
                ser_HW.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_HW(i))
                ToolStripProgressBar1.Maximum = numOfSimulations
                ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)
            Next i
            ser_HW.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
            ser_HW.Name = "C" & kkk.ToString
            Try
                Chart1.Series.Add(ser_HW)
                ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
                ToolStripProgressBar1.Value = 0
                Chart1.Show()
            Catch
            End Try
        Next kkk
        Chart1.Show()

Case "Calmon-Lechapt"

```

```

Chart1.Series.Clear()
Chart1.Titles.Clear()
Chart1.Titles.Add("Characteristic Curves")
Dim zzz As New List(Of Integer)
Dim Cx As Integer
For Each kkk As ToolStripMenuItem In ToolStripMenuItem4.DropDownItems
    If kkk.Checked Then
        Select Case kkk.Text
            Case "C10"
                Cx = 10
                zzz.Add(Cx)
            Case "C20"
                Cx = 20
                zzz.Add(Cx)
            Case "C30"
                Cx = 30
                zzz.Add(Cx)
            Case "C40"
                Cx = 40
                zzz.Add(Cx)
            Case "C50"
                Cx = 50
                zzz.Add(Cx)
            Case "C60"
                Cx = 60
                zzz.Add(Cx)
            Case "C70"
                Cx = 70
                zzz.Add(Cx)
            Case "C80"
                Cx = 80
                zzz.Add(Cx)
            Case "C90"
                Cx = 90
                zzz.Add(Cx)
        End Select
    End If
Next kkk

```

```

Dim QavailableListForCC As New List(Of Double)
For i = 0 To ListBox1.Items.Count - 1
    QavailableListForCC.Add(ListBox1.Items(i))
Next i
QavailableListForCC.Sort()
For Each kkk As Integer In zzz
    Dim MyYYYYList_Calmon As New List(Of Double)
    Dim ser_Calmon As New Series
    For i = ((kkk * numOfSimulations) / 100) To Hout_Calmon.Count Step numOfSimulations
        MyYYYYList_Calmon.Add(Hout_Calmon(i))
    Next i
    ToolStripStatusLabel1.Text = "Creating graph"
    Me.Refresh()
    For i = 0 To QavailableListForCC.Count - 1

        ser_Calmon.ChartType = SeriesChartType.Line
        ser_Calmon.Points.AddXY(QavailableListForCC(i), MyYYYYList_Calmon(i))
        ToolStripProgressBar1.Maximum = numOfSimulations
        ToolStripProgressBar1.Value = Math.Abs(i)
    Next i
    ser_Calmon.BackGradientStyle() = GradientStyle.DiagonalRight
    ser_Calmon.Name = "C" & kkk.ToString
    Try
        Chart1.Series.Add(ser_Calmon)
        ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
        ToolStripProgressBar1.Value = 0
        Chart1.Show()
    Catch

    End Try
Next kkk

Chart1.Show()

Case "Treeview Topology"
    TreeView2.Visible = True
User Interface: Εμφανίζεται το σκαρίφημα του δικτύου στο οποίο αποτυπώνεται η τοπολογία του δικτύου
Case "Show Network Topology"

```

```

GViewer1.Visible = True

Dim graph As New Baggelis.Graph("Graph")
Dim uphill As New List(Of String)
Dim downhill As New List(Of String)
Dim FinalNodes As New List(Of String)

For i = 0 To DataGridView1.RowCount - 2
    uphill.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(1).Value)
    downhill.Add(DataGridView1.Rows(i).Cells(2).Value)
Next i

For i = 0 To DataGridView1.RowCount - 2
    graph.AddEdge(uphill(i), downhill(i))
Next i
GViewer1.Graph = graph

```

User Interface: Εμφανίζεται για το υδροστόμιο που επιλέγει ο χρήστης το διάγραμμα σχετικού ελλείμματος φορτίου

```

Case "Relative Deficit"
    Chart1.Series.Clear()
    Chart1.Titles.Clear()
    Chart1.Titles.Add("(h-hr)/hr per hydrant")
    Dim Y1_List_hr, Y2_List_hr, Y3_List_hr, Y4_List_hr As New List(Of Double)
    Dim X1_List, X2_List, X3_List, X4_List As New List(Of Integer)
    Dim ser1_hr, ser2_hr, ser3_hr, ser4_hr As New Series
    Dim hr_bis As New List(Of Double)
    Dim DownhillToShow As New Integer
    DownhillToShow = TextBox11.Text
    For i = 0 To downhill.Count - 1
        If i = downhill.IndexOf(DownhillToShow) Then
            For j = 0 To 3
                If j = 0 Then
                    For k = 0 To numOfSimulations - 1
                        If Array3D(i, j, k) <> 0 Then
                            Y1_List_hr.Add((Array3D(i, j, k) - hr_initial(i)) / hr_initial(i))
                        End If
                    Next k
                ElseIf j = 1 Then

```

```

        For k = 0 To numOfSimulations - 1
            If Array3D(i, j, k) <> 0 Then
                Y2_List_hr.Add((Array3D(i, j, k) - hr_initial(i)) / hr_initial(i))
            End If
        Next k
    ElseIf j = 2 Then
        For k = 0 To numOfSimulations - 1
            If Array3D(i, j, k) <> 0 Then
                Y3_List_hr.Add((Array3D(i, j, k) - hr_initial(i)) - hr_initial(i))
            End If
        Next k
    ElseIf j = 3 Then
        For k = 0 To numOfSimulations - 1
            If Array3D(i, j, k) <> 0 Then
                Y4_List_hr.Add((Array3D(i, j, k) - hr_initial(i)) / hr_initial(i))
            End If
        Next k
    End If
Next j
End If
Next i
For i = 0 To Y1_List_hr.Count - 1
    X1_List.Add(1)
Next i
For i = 0 To Y2_List_hr.Count - 1
    X2_List.Add(2)
Next i
For i = 0 To Y3_List_hr.Count - 1
    X3_List.Add(3)
Next i
For i = 0 To Y4_List_hr.Count - 1
    X4_List.Add(4)
Next i
For i = 0 To Y1_List_hr.Count - 1
    ser1_hr.ChartType = SeriesChartType.Point

    If Y1_List_hr.Count > 0 Then
        ser1_hr.Points.AddXY(X1_List(i), Y1_List_hr(i))
    End If
Next i

```

```

    End If
Next i

For i = 0 To Y2_List_hr.Count - 1
    ser2_hr.ChartType = SeriesChartType.Point

    If Y2_List_hr.Count > 0 Then
        ser2_hr.Points.AddXY(X2_List(i), Y2_List_hr(i))
    End If
Next i

For i = 0 To Y3_List_hr.Count - 1
    ser3_hr.ChartType = SeriesChartType.Point
    If Y3_List_hr.Count > 0 Then
        ser3_hr.Points.AddXY(X3_List(i), Y3_List_hr(i))
    End If
Next i

For i = 0 To Y4_List_hr.Count - 1
    ser4_hr.ChartType = SeriesChartType.Point
    If Y4_List_hr.Count > 0 Then
        ser4_hr.Points.AddXY(X4_List(i), Y4_List_hr(i))
    End If
Next i

Try
    If Y1_List_hr.Count > 0 Then
        Chart1.Series.Add(ser1_hr)
    End If
    If Y2_List_hr.Count > 0 Then
        Chart1.Series.Add(ser2_hr)
    End If
    If Y3_List_hr.Count > 0 Then
        Chart1.Series.Add(ser3_hr)
    End If
    If Y4_List_hr.Count > 0 Then
        Chart1.Series.Add(ser4_hr)
    End If
    ToolStripStatusLabel1.Text = "Idle"
    ToolStripProgressBar1.Value = 0
    Chart1.Show()

```



```

        Catch
        End Try
    End Select
End Sub

```

Υλοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών " Mersenne Twister(MT19937)"

```

' An implementation of the Mersenne Twister algorithm (MT19937), developed
' with reference to the C code written by Takuji Nishimura and Makoto Matsumoto
' (http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/emt.html).
' This code is free to use for any pupose.

```

```
Option Strict On
```

```

''' A random number generator with a uniform distribution using the Mersenne
''' Twister algorithm.

```

```
Public Class MersenneTwister
```

```

    Private Const N As Integer = 624
    Private Const M As Integer = 397
    Private Const MATRIX_A As UInteger = &H9908B0DFUI
    Private Const UPPER_MASK As UInteger = &H80000000UI
    Private Const LOWER_MASK As UInteger = &H7FFFFFFFUI

```

```

    Private mt(N - 1) As UInteger
    Private mti As Integer = N + 1
    ''' Create a new Mersenne Twister random number generator.

```

```

    Public Sub New()
        Me.New(CUInt(Date.Now.Millisecond))
    End Sub

```

```

    ''' Create a new Mersenne Twister random number generator with a
    ''' particular seed.

```

```

    <CLSCompliant(False)> _
    Public Sub New(ByVal seed As UInteger)
        mt(0) = seed
        For Me.mti = 1 To N - 1
            mt(mti) = CUInt((1812433253UL * (mt(mti - 1) Xor (mt(mti - 1) >> 30)) + CUInt(mti)) And
&HFFFFFFFFUL)
        Next

```

```

End Sub

''' Create a new Mersenne Twister random number generator with a
''' particular initial key.
<CLSCompliant(False)> _
Public Sub New(ByVal initialKey() As UInteger)
    Me.New(19650218UI)
    Dim i, j, k As Integer
    i = 1 : j = 0
    k = CInt(IIf(N > initialKey.Length, N, initialKey.Length))
    For k = k To 1 Step -1
        mt(i) = CUInt(((mt(i) Xor ((mt(i - 1) Xor (mt(i - 1) >> 30)) * 1664525UL)) + initialKey(j) +
CUInt(j)) And &HFFFFFFFUI)
        i += 1 : j += 1
        If i >= N Then mt(0) = mt(N - 1) : i = 1
        If j >= initialKey.Length Then j = 0
    Next
    For k = N - 1 To 1 Step -1
        mt(i) = CUInt(((mt(i) Xor ((mt(i - 1) Xor (mt(i - 1) >> 30)) * 1566083941UL)) - CUInt(i)) And
&HFFFFFFFUI)
        i += 1
        If i >= N Then mt(0) = mt(N - 1) : i = 1
    Next
    mt(0) = &H80000000UI
End Sub

''' Generates a random number between 0 and System.UInt32.MaxValue.
<CLSCompliant(False)> _
Public Function NextUInt32() As UInteger

    Dim y As UInteger
    Static mag01() As UInteger = {&H0UI, MATRIX_A}
    If mti >= N Then
        Dim kk As Integer
        Debug.Assert(mti <> N + 1, "Failed initialization")
        For kk = 0 To N - M - 1
            y = (mt(kk) And UPPER_MASK) Or (mt(kk + 1) And LOWER_MASK)
            mt(kk) = mt(kk + M) Xor (y >> 1) Xor mag01(CInt(y And &H1))
        Next
    End If
    Return y
End Function

```

```

Next
For kk = kk To N - 2
    y = (mt(kk) And UPPER_MASK) Or (mt(kk + 1) And LOWER_MASK)
    mt(kk) = mt(kk + (M - N)) Xor (y >> 1) Xor mag01(CInt(y And &H1))
Next
y = (mt(N - 1) And UPPER_MASK) Or (mt(0) And LOWER_MASK)
mt(N - 1) = mt(M - 1) Xor (y >> 1) Xor mag01(CInt(y And &H1))
mti = 0
End If
y = mt(mti)
mti += 1
' Tempering
y = y Xor (y >> 11)
y = y Xor ((y << 7) And &H9D2C5680UI)
y = y Xor ((y << 15) And &HEFC60000UI)
y = y Xor (y >> 18)
Return y
End Function

''' Generates a random integer between 0 and System.Int32.MaxValue.
Public Function [Next]() As Integer
    Return CInt(NextUInt32() >> 1)
End Function

''' Generates a random integer between 0 and maxValue.
Public Function [Next](ByVal maxValue As Integer) As Integer
    Return [Next](0, maxValue)
End Function

''' Generates a random integer between minValue and maxValue.
Public Function [Next](ByVal minValue As Integer, ByVal maxValue As Integer) As Integer
    Return CInt(Math.Floor((maxValue - minValue + 1) * NextDouble() + minValue))
End Function

''' Generates a random floating point number between 0 and 1.
Public Function NextDouble() As Double
    Return NextUInt32() * (1.0 / 4294967295.0)
End Function

```

End Class

Υλοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών "Fast Random"

```
===== `Implementation of "Fast Random" the third examined random number generator` =====
Imports System

Namespace SharpNeatLib.Maths
    ''' A fast random number generator for .NET
    ''' Colin Green, January 2005
    '''
    ''' Key points:
    ''' 1) Based on a simple and fast xor-shift pseudo random number generator (RNG) specified in:
    ''' Marsaglia, George. (2003). Xorshift RNGs.
    ''' http://www.jstatsoft.org/v08/i14/xorshift.pdf
    '''
    ''' This particular implementation of xorshift has a period of  $2^{128}-1$ . See the above paper to see how
    this can be easily extened if you need a longer period. At the time of writing I could find no information
    on the period of System.Random for comparison.
    '''
    ''' 2) Faster than System.Random. Up to 15x faster, depending on which methods are called.
    '''
    ''' 3) Direct replacement for System.Random. This class implements all of the methods that
    System.Random does plus some additional methods. The like named methods are functionally equivalent.
    '''
    ''' 4) Allows fast re-initialisation with a seed, unlike System.Random which accepts a seed at
    construction time which then executes a relatively expensive initialisation routine. This provides a vast
    speed improvement if you need to reset the pseudo-random number sequence many times, e.g. if you want to
    re-generate the same sequence many times. An alternative might be to cache random numbers in an array, but
    that approach is limited by memory capacity and the fact that you may also want a large number of different
    sequences cached. Each sequence can each be represented by a single seed value (int) when using FastRandom.
    '''
    ''' Notes.
    ''' A further performance improvement can be obtained by declaring local variables as static, thus
    avoiding
    ''' re-allocation of variables on each call. However care should be taken if multiple instances of
    ''' FastRandom are in use or if being used in a multi-threaded environment.
    '''
```

```

Public Class FastRandom
    ' The +1 ensures NextDouble doesn't generate 1.0
    Const REAL_UNIT_INT As Double = 1.0R / (Cdbl(Integer.MaxValue) + 1.0R)
    Const REAL_UNIT_UINT As Double = 1.0R / (Cdbl(UInteger.MaxValue) + 1.0R)
    Const YY As UInteger = 842502087, ZZ As UInteger = 3579807591, WW As UInteger = 273326509

    Private x As UInteger, y As UInteger, z As UInteger, w As UInteger

#Region "Constructors"

    ''' Initialises a new instance using time dependent seed.
    Public Sub New()
        ' Initialise using the system tick count.
        Reinitialise(CInt(Environment.TickCount))
    End Sub

    ''' Initialises a new instance using an int value as seed.
    ''' This constructor signature is provided to maintain compatibility with
    ''' System.Random
    Public Sub New(ByVal seed As Integer)
        Reinitialise(seed)
    End Sub

#End Region

#Region "Public Methods [Reinitialisation]"

    ''' Reinitialises using an int value as a seed.
    Public Sub Reinitialise(ByVal seed As Integer)
        ' The only stipulation stated for the xorshift RNG is that at least one of
        ' the seeds x,y,z,w is non-zero. WWe fulfill that requirement by only allowing
        ' resetting of the x seed
        x = CUInt(seed)
        y = YY
        z = ZZ
        w = WW
    End Sub

```

```
#End Region
```

```
#Region "Public Methods [Next* methods]"
```

```
''' Generates a uint. Values returned are over the full range of a uint,  
''' uint.MinValue to uint.MaxValue, including the min and max values.  
Public Function NextUInt() As UInteger  
    Dim t As UInteger = (x Xor (x << 11))  
    x = y  
    y = z  
    z = w  
    Return (InlineAssignHelper(w, (w Xor (w >> 19)) Xor (t Xor (t >> 8))))  
End Function  
  
''' Generates a random int. Values returned are over the range 0 to int.MaxValue-1.  
''' MaxValue is not generated to remain functionally equivalent to System.Random.Next().  
''' If you require an int from the full range, including negative values then call  
''' NextUInt() and cast the value to an int.  
Public Function [Next]() As Integer  
    Dim t As UInteger = (x Xor (x << 11))  
    x = y  
    y = z  
    z = w  
    Return CInt((&H7FFFFFFF And (InlineAssignHelper(w, (w Xor (w >> 19)) Xor (t Xor (t >> 8))))))  
End Function  
  
''' Generates a random int over the range 0 to upperBound-1, and not including upperBound.  
Public Function [Next](ByVal upperBound As Integer) As Integer  
    If upperBound < 0 Then  
        Throw New ArgumentOutOfRangeException("upperBound", upperBound, "upperBound must be >=0")  
    End If  
  
    Dim t As UInteger = (x Xor (x << 11))  
    x = y  
    y = z  
    z = w  
  
    ' The explicit int cast before the first multiplication gives better performance.
```

```

        ' See comments in NextDouble.
        Return CInt(((REAL_UNIT_INT * CInt((&H7FFFFFFF And (InlineAssignHelper(w, (w Xor (w >> 19)) Xor
(t Xor (t >> 8)))))) * upperBound))
    End Function

''' Generates a random int over the range lowerBound to upperBound-1, and not including upperBound.
''' upperBound must be >= lowerBound. lowerBound may be negative.
Public Function [Next](ByVal lowerBound As Integer, ByVal upperBound As Integer) As Integer
    If lowerBound > upperBound Then
        Throw New ArgumentOutOfRangeException("upperBound", upperBound, "upperBound must be
>=lowerBound")
    End If

    Dim t As UInteger = (x Xor (x << 11))
    x = y
    y = z
    z = w

    ' The explicit int cast before the first multiplication gives better performance.
    ' See comments in NextDouble.
    Dim range As Integer = upperBound - lowerBound
    If range < 0 Then
        ' If range is <0 then an overflow has occurred and must resort to using long integer
arithmetic instead (slower).
        ' WWe also must use all 32 bits of precision, instead of the normal 31, which again is
slower.
        Return lowerBound + CInt(((REAL_UNIT_UINT * CDb1((InlineAssignHelper(w, (w Xor (w >> 19))
Xor (t Xor (t >> 8)))))) * CDb1((CLng(upperBound) - CLng(lowerBound))))
    End If

    ' 31 bits of precision will suffice if range<=int.MaxValue. This allows us to cast to an int
anf gain
    ' a little more performance.
    Return lowerBound + CInt(((REAL_UNIT_INT * CDb1(CInt((&H7FFFFFFF And (InlineAssignHelper(w, (w
Xor (w >> 19)) Xor (t Xor (t >> 8)))))))) * CDb1(range))
    End Function

''' Generates a random double. Values returned are from 0.0 up to but not including 1.0.

```



```

Public Function NextDouble() As Double
    Dim t As UInteger = (x Xor (x << 11))
    x = y
    y = z
    z = w

    ' Here we can gain a 2x speed improvement by generating a value that can be cast to
    ' an int instead of the more easily available uint. If we then explicitly cast to an
    ' int the compiler will then cast the int to a double to perform the multiplication,
    ' this final cast is a lot faster than casting from a uint to a double. The extra cast
    ' to an int is very fast (the allocated bits remain the same) and so the overall effect
    ' of the extra cast is a significant performance improvement.
    Return (REAL_UNIT_INT * CInt((&H7FFFFFFF And (InlineAssignHelper(w, (w Xor (w >> 19)) Xor (t
Xor (t >> 8)))))))
End Function

''' Fills the provided byte array with random bytes.
''' Increased performance is achieved by dividing and packaging bits directly from the
''' random number generator and storing them in 4 byte 'chunks'.
Public Sub NextBytes(ByVal buffer As Byte())
    ' Fill up the bulk of the buffer in chunks of 4 bytes at a time.
    Dim x As UInteger = Me.x, y As UInteger = Me.y, z As UInteger = Me.z, w As UInteger = Me.w
    Dim i As Integer = 0
    Dim t As UInteger
    While i < buffer.Length - 3
        ' Generate 4 bytes.
        t = (x Xor (x << 11))
        x = y
        y = z
        z = w
        w = (w Xor (w >> 19)) Xor (t Xor (t >> 8))

        buffer(System.Math.Max(System.Threading.Interlocked.Increment(i), i - 1)) = CByte((w And
&HFF))
        buffer(System.Math.Max(System.Threading.Interlocked.Increment(i), i - 1)) = CByte(((w And
&HFF00) >> 8))
        buffer(System.Math.Max(System.Threading.Interlocked.Increment(i), i - 1)) = CByte(((w And
&HFF0000) >> 16))
    End While
End Sub

```

```

        buffer(System.Math.Max(System.Threading.Interlocked.Increment(i), i - 1)) = CByte(((w And
&HFF000000) >> 24))
    End While

    ' Fill up any remaining bytes in the buffer.
    If i < buffer.Length Then
        ' Generate 4 bytes.
        t = (x Xor (x << 11))
        x = y
        y = z
        z = w
        w = (w Xor (w >> 19)) Xor (t Xor (t >> 8))

        buffer(System.Math.Max(System.Threading.Interlocked.Increment(i), i - 1)) = CByte((w And
&HFF))

        If i < buffer.Length Then
            buffer(System.Math.Max(System.Threading.Interlocked.Increment(i), i - 1)) = CByte((w
And &HFF00) >> 8))

            If i < buffer.Length Then
                buffer(System.Math.Max(System.Threading.Interlocked.Increment(i), i - 1)) =
CByte(((w And &HFF0000) >> 16))
                If i < buffer.Length Then
                    buffer(i) = CByte(((w And &HFF000000) >> 24))
                End If
            End If
        End If
    End If
    Me.x = x
    Me.y = y
    Me.z = z
    Me.w = w
End Sub

Private bitBuffer As UInteger
Private bitBufferIdx As Integer = 32

''' Generates random bool.

```

```

''' Increased performance is achieved by buffering 32 random bits for
''' future calls. Thus the random number generator is only invoked once
''' in every 32 calls.

Public Function NextBool() As Boolean
    If bitBufferIdx = 32 Then
        ' Generate 32 more bits.
        Dim t As UInteger = (x Xor (x << 11))
        x = y
        y = z
        z = w
        bitBuffer = InlineAssignHelper(w, (w Xor (w >> 19)) Xor (t Xor (t >> 8)))

        ' Reset the idx that tells us which bit to read next.
        bitBufferIdx = 1
        Return (bitBuffer And &H1) = 1
    End If

    bitBufferIdx += 1
    Return ((bitBuffer >> 1) And &H1) = 1
End Function
Private Shared Function InlineAssignHelper(Of T)(ByRef target As T, ByVal value As T) As T
    target = value
    Return value
End Function

#End Region
End Class
End Namespace

```