

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ

ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΡΑΝΕΤ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΤΣΑΓΚΟΛΛΑΡΙ ΦΕΣΤΙΜ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2018

Πρόλογος

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην προσομοίωση και στον σχεδιασμό δικτύου παροχής νερού μέσω του λογισμικού προγράμματος EPANET.

Αρχικά γίνεται αναφορά στα βασικά υδραυλικά μεγέθη και στα δίκτυα ύδρευσης και την δομή τους. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στο λογισμικό πρόγραμμα EPANET. Γίνεται μια εισαγωγή σε αυτό και στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικές εργασίες και οι λειτουργίες του. Ακολουθεί η μελέτη, η προσομοίωση και ο σχεδιασμός δικτύων με το EPANET και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Καλογήρου καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., την Διεύθυνση και το προσωπικό της ΔΕΥΑΠ και ιδιαίτερα την κ. Ειρήνη Καραθανάση προϊσταμένη του γραφείου μελετών της ΔΕΥΑΠ για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας. Τέλος, τους αφανείς υποστηρικτές, την οικογένειά μου, που μου συμπαραστάθηκε υπομονετικά.

Τσαγκολάρι Φεστήμ
Δεκέμβριος 2018

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

Περίληψη

Αντικείμενο της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη, η προσομοίωση και ο σχεδιασμός δικτύων παροχής νερού μέσω του λογισμικού προγράμματος EPANET. Μέσα από την προσομοίωση και τον σχεδιασμό δικτύου παροχής νερού έχουμε την εξοικείωση και τα αποτελέσματα της βέλτιστης λειτουργίας του κάθε δικτύου μέσω του λογισμικού προγράμματος EPANET.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε εισαγωγικές έννοιες όπως στα δίκτυα ύδρευσης και τη δομή τους, στα βασικά υδραυλικά μεγέθη και τα μοντέλα προσομοίωσης και επίλυσης δικτύων ύδρευσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται ο χώρος εργασίας του προγράμματος EPANET και αναφέρονται οι βασικές εργασίες που εκτελούνται σε αυτό καθώς και τα βήματα που ακολουθούνται για την χρήση του προγράμματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι λειτουργίες του υπολογιστικού προγράμματος της αγοράς με την εμπορική ονομασία EPANET. Ως εκ τούτου αναφέρονται οι δυνατότητες του προγράμματος και βήμα βήμα οι οδηγίες για την δημιουργία ενός νέου έργου

Στο τέταρτο κεφάλαιο προσομοιώνονται τρία διαφορετικά ροϊκά δίκτυα και υπολογίζονται στο καθένα τα ζητούμενα μεγέθη με την χρήση του EPANET. Τα αποτελέσματα του προγράμματος επαληθεύονται και θεωρητικά.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	2
Περίληψη	3
Εισαγωγή.....	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικές έννοιες	8
1.1 Δίκτυα ύδρευσης.....	8
1.2 Δομή δικτύων ύδρευσης.....	8
1.3 Βασικά υδραυλικά μεγέθη	9
1.4 Μοντέλα προσομοίωσης και επίλυσης δικτύων ύδρευσης.....	15
1.4.1 Δυνατότητες μοντέλων	15
1.4.2 Ανάγκη για τη χρήση μοντέλων	16
1.4.3 Βήματα χρήσης μοντέλων	17
1.5 Εισαγωγή στο EPANET	17
1.6 Δυνατότητες του προγράμματος EPANET	18
1.7 Μέθοδος επίλυσης δικτύων μέσω του EPANET	19
1.8 Τρόπος λειτουργίας του προγράμματος	20
Κεφάλαιο 2: Ο χώρος εργασίας του προγράμματος EPANET	22
2.1 Βασικές εργασίες.....	22
2.2 Βήματα για την χρήση του προγράμματος EPANET	31
Κεφάλαιο 3: Λειτουργίες του EPANET.....	34
3.1 Δημιουργία νέου έργου.....	34
3.1.1 Ρύθμιση προεπιλογών προγράμματος.....	35
3.1.2 Ρύθμιση προτιμήσεων.....	36
3.2 Δημιουργία του σεναρίου του έργου: Εργασία με αντικείμενα	37
3.2.1 Προσθήκη αντικειμένου: Κόμβου (Junction)	37
3.2.2 Προσθήκη αντικειμένου: Σύνδεσμοι (Links)	39
3.2.3 Καθορισμός του σημείου εκκίνησης για το νερό: Προσθήκη δεξαμενής	40
3.2.4 Επιλογή αντικειμένου (Πώς να επιλέξετε αντικείμενα από τον χάρτη για να προσθέσετε πληροφορίες)	41

3.2.5 Επεξεργασία αντικειμένου (Προσθήκη πληροφοριών σε συνδέσμους και συνδέσεις).....	41
3.2.6 Επεξεργασία αντικειμένου που εμφανίζεται στο πρόγραμμα περιήγησης.....	42
3.2.7 Προσθήκη ετικέτας στο χάρτη	43
3.2.8 Αντιγραφή και επικόλληση ιδιοτήτων αντικειμένου.....	46
3.2.9 Διαγραφή αντικειμένου	46
3.2.11 Επιλογή ομάδας αντικειμένων	47
3.2.12 Επεξεργασία ομάδας αντικειμένων.....	47
3.3 Τροποποίηση υπομνήματος και των προτιμήσεων ρύθμισης.....	47
3.4 Εμφάνιση υπομνήματος.....	48
3.5 Ανάλυση ενός δικτύου	49
3.5.1 Ρύθμιση επιλογών ανάλυσης	49
3.5.2 Εκτέλεση ανάλυσης.....	49
3.6 Προβολή των αποτελεσμάτων σε πίνακες.....	51
3.7 Δημιουργία νέου πρότυπου ζήτησης.....	52
3.8 Δημιουργία ανάλυσης χρονοσειρών	52
3.8.1 Οπτικοποίηση προσομοίωσης Χρονικών Σειρών	52
3.9 Δεξαμενή.....	53
3.10 Αντλία.....	54
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση δικτύων με το EPANET	55
4.1 Περιγραφή του 1 ^{ου} δικτύου	55
4.1.1 Σχεδιασμός του 1 ^{ου} δικτύου στο EPANET	56
4.1.2 Εκτέλεση εφαρμογής EPANET.....	64
4.1.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	66
4.2 Περιγραφή του 2 ^{ου} δικτύου	67
4.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	70
4.3 Περιγραφή του 3 ^{ου} δικτύου	70
4.3.1 Σχεδιασμός του 3 ^{ου} δικτύου στο EPANET	71
4.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	78

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....	79
Βιβλιογραφία.....	80

Εισαγωγή

Στις μέρες μας θεωρείται δεδομένο ότι μόλις ανοίξουμε την βρύση του σπιτιού μας θα έχουμε καλής ποιότητας πόσιμο νερό. Όμως οι πιο πολλοί από εμάς δεν σκεφτόμαστε την διαδικασία και το ταξίδι που κάνει το νερό για να φτάσει σε εμάς. Όσο περνάνε τα χρόνια γίνεται όλο και πιο δύσκολο να βρεθεί η ποσότητα της καλής ποιότητας που χρειάζεται κάθε οικισμός. Για τον παραπάνω λόγο είναι σημαντικό να εκμεταλλευόμαστε με αποτελεσματικό τρόπο και χωρίς απώλειες, είτε ποιοτικές είτε ποσοτικές, την ποσότητα του νερού που διαθέτουμε.

Ο ρόλος του μηχανικού των εγκαταστάσεων ύδρευσης είναι πολύ σημαντικός και θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει όλα τα προβλήματα λειψυδρίας λόγω βλάβης ή και ακόμα να μπορεί να βελτιώσει ένα κλειστό δίκτυο με την εφαρμογή νέων τεχνολογιών και να επιβλέπει την εγκατάσταση της ύδρευσης.

Σε αυτή την πτυχιακή θα μελετηθούν τρία διαφορετικά δίκτυα παροχής νερού τα οποία στη συνέχεια θα προσομοιωθούν με το λογισμικό EPANET, το οποίο θα τα επιλύσει και θα δώσει τα κατάλληλα αποτελέσματα. Στη συνέχεια αυτά θα επαληθευτούν και μαθηματικά με το χέρι για να γίνει η απαραίτητη σύγκριση των αποτελεσμάτων ώστε να διαπιστωθεί ο βαθμός της εύρυθμης λειτουργίας του κάθε δικτύου. Τέλος θα εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα και θα γίνουν προτάσεις για επιπλέον έρευνα και μελέτη.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικές έννοιες

1.1 Δίκτυα ύδρευσης

Κάθε δίκτυο ύδρευσης αποτελεί ένα σύστημα αγωγών υπό πίεση, που παραλαμβάνει νερό από ολιγάριθμες πηγές (σημεία εισόδου) και το οδηγεί προς πολλαπλά σημεία προορισμού (σημεία εξόδου ή καταναλωτές). Ουσιαστικά διανέμει το επεξεργασμένο (καθαρό) νερό από τις δεξαμενές σε πολλαπλά σημεία προορισμού (καταναλωτές) μιας αστικής περιοχής (Κουτσογιάννης Δ., 2006).

1.2 Δομή δικτύων ύδρευσης

Κάθε δίκτυο ύδρευσης μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη:

1. Το εξωτερικό υδραγωγείο
2. Το εσωτερικό υδραγωγείο

Εξωτερικό υδραγωγείο

Το εξωτερικό υδραγωγείο είναι η διάταξη έργων μεταφοράς νερού από την υδροληψία στη δεξαμενή ρύθμισης, αποθήκευσης του οικισμού. Το εξωτερικό υδραγωγείο μπορεί να αποτελείται από:

- Ανοικτούς αγωγούς βαρύτητας
- Κλειστούς αγωγούς υπό πίεση. Οι υπό πίεση αγωγοί μπορεί να είναι είτε βαρύτητας είτε να είναι αγωγοί κατάθλιψης, δηλαδή να υποβοηθούνται από αντλητικό συγκρότημα.
- Κλειστούς αγωγούς που λειτουργούν όμως σαν αγωγοί ελευθέρως επιφάνειας.

Εσωτερικό υδραγωγείο

Το εσωτερικό υδραγωγείο είναι το σύστημα διανομής ύδατος και περιλαμβάνει το άθροισμα των αγωγών που μεταφέρουν το νερό από τη δεξαμενή αποθήκευσης σε κάθε σημείο της υδροδοτούμενης περιοχής. Εκτός από το δίκτυο των αγωγών περιλαμβάνει και όλα τα υπόλοιπα έργα διανομής κατάντη της δεξαμενής αποθήκευσης του νερού, όπως τις αντλίες, τις δικλείδες, τους ρυθμιστές πίεσης κ.τ.λ. Δύο είναι οι βασικές απαιτήσεις για το εσωτερικό υδραγωγείο, οι οποίες αναλύονται ποσοτικά στην ενότητα που αναλύονται οι λειτουργικές απαιτήσεις των δικτύων ύδρευσης:

1. Η εξασφάλιση της απαιτούμενης παροχής σε κάθε σημείο του δικτύου με ικανοποιητική ταχύτητα.
2. Η διατήρηση της πίεσης (ύψος πίεσης) εντός των αποδεκτών ορίων.

Όσον αφορά τη δεξαμενή ρύθμισης ή αποθήκευσης είναι αυτή που οριοθετεί τα τμήματα του υδραγωγείου και για την διαστασιολόγησή της χρειάζονται πληροφορίες τόσο από το εσωτερικό όσο και από το εξωτερικό

υδραγωγείο. Συνήθως η δεξαμενή ρύθμισης έχει εικοσιτετράωρη βάση λειτουργίας και πληρεί τις δύο παρακάτω λειτουργίες:

- Την εξίσωση παροχών και καταναλώσεως ανακουφίζοντας την παροχή σχεδιασμού για το εξωτερικό υδραγωγείο.
- Την εξασφάλιση αποθηκευμένου νερού για την περίπτωση βλάβης ή πυρκαγιάς.

Έτσι η παροχή σχεδιασμού για το εξωτερικό υδραγωγείο είναι η μέγιστη ημερήσια, ενώ η παροχή σχεδιασμού για το εσωτερικό υδραγωγείο είναι η μέγιστη ωριαία. Προφανώς η δεξαμενή ρύθμισης θα πρέπει μέσα στο εικοσιτετράωρο (αν η δεξαμενή ρύθμισης έχει εικοσιτετράωρη βάση λειτουργίας) να έχει τέτοιο όγκο (όγκος ρυθμίσεως) ώστε να μπορεί να αποδώσει τις παροχές αιχμής για τον οικισμό για σταθερή εισροή από το εξωτερικό υδραγωγείο.

1.3 Βασικά υδραυλικά μεγέθη

Στα υδραυλικά όπως και σε κάθε τεχνικό θέμα, δεν μπορεί να υπάρξει πλήρης κατανόηση αν πρώτα δεν υπάρχει εξοικείωση με τη βασική τεχνολογία και τις κύριες αρχές. Οι υδραυλικές έννοιες που περιγράφονται παρακάτω βάζουν τις βάσεις για πιο πολύπλοκες αναλύσεις.

Μεταφορά της παροχής

Όπως είναι γνωστό, το νερό κινείται από υψηλότερα σε χαμηλότερα σημεία, ώσπου να φτάσει σε ένα “επίπεδο” σημείο, όπως για παράδειγμα σε ένα ωκεανό. Η τάση αυτή του νερού διευκολύνεται από την παρουσία των φυσικών καναλιών μεταφοράς όπως είναι τα ρυάκια, οι χείμαρροι και τα ποτάμια. Η διαδρομή αυτή του νερού μπορεί επίσης να διευκολυνθεί από τεχνικές κατασκευές όπως είναι οι αποχετευτικοί αγωγοί, οι οχετοί και τα κανάλια. Αν και στον τεχνικό σχεδιασμό το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων και χαρακτηριστικών, οι υδραυλικές έννοιες μπορούν να εφαρμοστούν εξίσου καλά και σε φυσικά χαρακτηριστικά.

Η ροή στους κλειστούς αγωγούς στο χρόνο και στο χώρο

Ως προς το χρόνο, η ροή στους κλειστούς αγωγούς διακρίνεται σε μόνιμη και μη μόνιμη ροή. Μόνιμη ροή παρουσιάζεται όταν η ταχύτητα παραμένει σταθερή, σε όλα τα σημεία, και αμετάβλητη με το χρόνο (μπορεί όμως να μεταβάλλεται με τη θέση). Μη μόνιμη ροή παρουσιάζεται όταν η ταχύτητα μεταβάλλεται, σε όλα τα σημεία, με το χρόνο. Με τον όρο υδραυλικό πλήγμα χαρακτηρίζονται τα φαινόμενα υπερπίεσης, που αντιστοιχούν σε καθεστώς μη μόνιμης ροής σε κλειστούς αγωγούς, μετά από χειρισμούς σε δικλείδες (άνοιγμα ή κλείσιμο, μερικό ή πλήρες, βραδύ ή απότομο), ή εξαιτίας διακυμάνσεων στην παροχή αντλιοστασίων (εκκίνηση ή στάση αντλιών). Στους κλειστούς αγωγούς, το ενδιαφέρον για μεταβαλλόμενη στο χώρο ροή περιορίζεται στη μελέτη των απωλειών φορτίου, που παρατηρούνται σε αλλαγές διαμέτρου, σε στόμια, διακλαδώσεις ή στενώσεις.

Στρωτή και τυρβώδης ροή

Ανάλογα με την ταχύτητα του ρευστού διακρίνονται δύο τύποι ροής. Για μικρές ταχύτητες η ροή θεωρείται στρωτή και τα σωματίδια του ρευστού κινούνται σε στρώσεις. Για μεγαλύτερες ταχύτητες η ροή θεωρείται τυρβώδης και τα σωματίδια του ρευστού κινούνται ακανόνιστα με στροβιλισμούς. Συνήθως η ροή στα πρακτικά προβλήματα κλειστών αγωγών υπό πίεση είναι τυρβώδης. Οι νόμοι που περιγράφουν την τυρβώδη ροή δεν είναι πλήρως γνωστοί και απαιτούνται πειραματικά στοιχεία για την κατανόηση του φαινομένου. Κριτήριο διαχωρισμού της ροής, σε στρωτή ή τυρβώδη, αποτελεί ο γνωστός αριθμός Reynolds, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$R_e = \frac{uD}{\nu}$$

Όπου: η μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό (m/s)

D: η διάμετρος του αγωγού (m)

ν : ο συντελεστής κινηματικής συνεκτικότητας

Όπως έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά, σε κλειστούς αγωγούς δεν υφίσταται άνω όριο του αριθμού Reynolds για τη διατήρηση της στρωτής ροής. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Rouse (1961), ακριβώς με τον ίδιο πειραματικό εξοπλισμό, που χρησιμοποίησε ο Reynolds έχει επιβεβαιωθεί η διατήρηση της στρωτής ροής για τιμές του $Re > 40000$. Βέβαια με την παραμικρή διατάραξη η ροή μεταπίπτει σε απόλυτα τυρβώδη μορφή. Ανάλογα πειράματα έδειξαν, ότι αντίθετα υπάρχει συγκεκριμένο κατώτερο όριο διατήρησης της τύρβης, που για κυκλικούς αγωγούς αντιστοιχεί σε Re περίπου ίσο με 2320, κάτω από το οποίο οποιαδήποτε ανατάραξη αποσβένεται κάτω από την επίδραση δυνάμεων συνεκτικότητας (Αφτιάς Μ., 1992).

Σε κλειστούς αγωγούς εξωτερικών υδραγωγείων, εξαιτίας των σημαντικών διαστάσεων των διατομών που χρησιμοποιούνται και των ταχυτήτων που εφαρμόζονται, η ροή είναι αποκλειστικά τυρβώδης.

Επιφάνεια διατομής αγωγών

Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα ύδρευσης είναι αγωγοί υπό πίεση, κυκλικής διατομής. Η επιφάνεια της διατομής των κυκλικών αγωγών είναι:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

όπου D: η διάμετρος του αγωγού (m)

Ταχύτητα

Η ταχύτητα σε έναν αγωγό δεν είναι σταθερή σε όλη την επιφάνεια της διατομής του. Αντιθέτως, ποικίλει ανάλογα με τη θέση και το χρόνο. Εκεί όπου το υγρό είναι σε επαφή με το τοίχωμα του αγωγού, η ταχύτητα είναι μηδενική. Το γεγονός αυτό, δυσκολεύει τους υδραυλικούς υπολογισμούς, με αποτέλεσμα να υπολογίζεται η μέση ταχύτητα της ροής στους αγωγούς. Η μέση ταχύτητα ροής καθορίζεται ως η συνολική παροχή διαιρούμενη με το εμβαδόν της διατομής του αγωγού και η μονάδα της είναι μήκος ανά μονάδα χρόνου.

$$u = \frac{Q}{A}$$

όπου: u: η μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό (m/s)

Q: η παροχή (m^3/s)

A: η επιφάνεια της διατομής του αγωγού (m^2)

Ενέργεια

Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, για κάθε δεδομένο σύστημα, η μεταβολή της ενέργειάς του (ΔE) ισούται με τη διαφορά μεταξύ της θερμότητας που μεταφέρθηκε στο σύστημα (Q) και του έργου που παρήχθη από το ίδιο το σύστημα (W), κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Η ενέργεια που αναφέρεται στην παραπάνω αρχή αντιπροσωπεύει τη συνολική ενέργεια του συστήματος, δηλαδή το άθροισμα της δυναμικής, της κινητικής και της εσωτερικής ενέργειας, όπως είναι η ηλεκτρική και η χημική ενέργεια.

Όμως αν και οι μορφές αυτές της εσωτερικής ενέργειας είναι σημαντικές για τη θερμοδυναμική ανάλυση, συνήθως απορρίπτονται κατά τις υδραυλικές αναλύσεις εξαιτίας του σχετικά μικρού τους μεγέθους.

Στις υδραυλικές εφαρμογές, οι τιμές της ενέργειας έχουν μονάδες μήκους και εκφράζουν την ενέργεια ανά μονάδα μάζας του ρευστού. Η μετατροπή αυτή συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Η μηχανική ενέργεια ή όπως αλλιώς ονομάζεται το ολικό ύψος ή φορτίο ενέργειας, σε κάθε σημείο μέσα σε ένα υδραυλικό σύστημα δίνεται από την εξίσωση:

$$H = \frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z$$

Οι όροι της εξίσωσης έχουν διαστάσεις μήκους. Ο όρος $u^2/2g$ ονομάζεται ύψος ή φορτίο ταχύτητας, ο όρος $\frac{p}{\gamma}$ ονομάζεται ύψος ή φορτίο πίεσης ενώ ο όρος z ονομάζεται ύψος ή φορτίο θέσης. Με p , συμβολίζεται η πίεση του ρευστού ενώ με γ το ειδικό του βάρος. Το άθροισμα $\frac{p}{\gamma} + z$ ονομάζεται πιεζομετρικό ύψος ή φορτίο. Για τους αγωγούς υπό πίεση, το πιεζομετρικό φορτίο αναπαριστά το ύψος στο οποίο μπορεί να ανέλθει η στήλη του νερού σε ένα πιεζόμετρο, δηλαδή σε έναν σωλήνα τοποθετημένο κάθετα στον αγωγό.

Το ολικό ύψος ή φορτίο ενέργειας, είναι το άθροισμα του πιεζομετρικού φορτίου και του ύψους ταχύτητας. Αυτό είναι το ύψος στο οποίο μπορεί να ανέλθει η στήλη του νερού σε έναν Pitot, δηλαδή μια συσκευή όμοια με το πιεζόμετρο, με τη διαφορά ότι αυτή υπολογίζει και την ταχύτητα του υγρού.

Σε ένα σύστημα όμως, μπορεί είτε να προστεθεί ενέργεια (για παράδειγμα μέσω αντλίας) είτε να αφαιρεθεί από αυτό ενέργεια, λόγω συσκευών τριβών ή άλλων διαταραχών. Εάν υπάρχουν λοιπόν μηχανές που παρεμβάλλονται στην κίνηση του νερού καθώς και τοπικές και γραμμικές απώλειες, τότε η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας γράφεται ως εξής:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + h_f + h_L + h_M$$

Όπου p : η πίεση του ρευστού (N/m^2)

γ : το ειδικό βάρος του υγρού (N/m^3)

z : το υψόμετρο (m)

u : η μέση ταχύτητα του υγρού (m/s)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

h_f : γραμμικές απώλειες (m)

h_L : τοπικές απώλειες (m)

Η ποσότητα h_M εκφράζει την ενέργεια που απομακρύνεται από το σύστημα μέσω μηχανικού άξονα ανά μονάδα βάρους ρευστού. Δίνεται από την εξίσωση $h_M = -h_a + h_u$, όπου η ποσότητα h_a εκφράζει την ενέργεια που

προσφέρεται στο σύστημα από αντλία, ενώ η ποσότητα h_u εκφράζει ενέργεια που αποδίδεται σε υδροστρόβιλο.

Οι γραμμικές απώλειες σε ένα σύστημα μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Η κυριότερη αιτία των απωλειών είναι συνήθως οι εσωτερικές τριβές μεταξύ των μορίων του υγρού που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Επίσης οι απώλειες οφείλονται και σε τοπικές περιοχές του αγωγού όπου διαταράσσεται η ροή, όπως είναι οι βαλβίδες και άλλα εξαρτήματα των αγωγών υπό πίεση.

Απώλειες ενέργειας λόγω τριβών

Είναι γνωστό ότι, όταν ένα σώμα κινείται και βρίσκεται σε επαφή με ένα άλλο, τότε στην επιφάνεια επαφής δημιουργείται δύναμη τριβής. Έτσι, για έναν κλειστό αγωγό ύδατος που μεταφέρει νερό μεταξύ δύο σημείων, διαμέτρου D , μήκους L , ταχύτητας u , αναπτύσσονται απώλειες ενέργειας που οφείλονται στις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται κατά την επαφή του κινούμενου υγρού με το στερεό τοίχωμα του αγωγού. Η διατμητική τάση είναι συνάρτηση της ταχύτητας u , της πυκνότητας ρ , του ιξώδους μ του κινούμενου ρευστού, της διαμέτρου D και της τραχύτητας κ του αγωγού. Δηλαδή:

$$\tau_0 = f(u, D, \mu, \rho, \kappa)$$

Με βάση την διαστατική ανάλυση προκύπτει ο συντελεστής τριβής f :

$$\frac{\tau_0}{\rho u^2} = f\left[\frac{uD\rho}{\mu}, \frac{\kappa}{D}\right]$$

Για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας έχουν αναπτυχθεί διάφορες εξισώσεις όπως των Darcy – Weisbach, των Colebrook – White, των Hazen – Williams και των Chezy – Manning εκ των οποίων η πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η πρώτη και σε αυτή θα αναφερθούμε

Εξίσωση των Darcy – Weisbach

Οι Darcy-Weisbach θεωρώντας μόνιμη ροή (ως προς τις μέσες τιμές) στον αγωγό, οδηγήθηκαν στην ισορροπία των δυνάμεων πίεσης, τριβής και των δυνάμεων βαρύτητας κατά μήκος ενός στοιχειώδους αγωγού. Με βάση την ισορροπία δυνάμεων και την προηγούμενη ανάλυση για την διατμητική τάση κατέληξαν στην παρακάτω σχέση που αποδίδει το γραμμικό ύψος απωλειών h_f , συναρτήσει του συντελεστή τριβής f :

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{u^2}{2g}$$

Όπου f : συντελεστής τριβής

L : μήκος αγωγού (m)

D : διάμετρος της διατομής του αγωγού (m)

u : η μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό (m/s)

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²)

Η εξίσωση των Darcy-Weisbach ισχύει για στρωτή και τυρβώδη ροή. Στα συνήθη πρακτικά προβλήματα κλειστών αγωγών υπό πίεση η ροή είναι τυρβώδης.

Τοπικές απώλειες

Πέραν των γραμμικών απωλειών, στα δίκτυα διανομής δημιουργούνται και τοπικές απώλειες, στις συνδέσεις των αγωγών και τις στροφές (τυπικές τοπικές απώλειες), και στις θέσεις των ειδικών συσκευών και διατάξεων (ειδικές τοπικές απώλειες). Οι τοπικές απώλειες οφείλονται κυρίως στην ανάπτυξη στροβίλων αποκόλλησης της ροής και εκφράζονται με όρους ύψους κινητικής ενέργειας, οι οποίοι είναι:

$$h_L = K \frac{u^2}{2g}$$

όπου K είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία της τοπικής μεταβολής διατομών και κατεύθυνσης και τα χαρακτηριστικά της ροής (αριθμός Reynolds).

Για να ληφθούν υπόψη οι τυπικές τοπικές απώλειες χωρίς αναλυτικό υπολογισμό, προτείνεται η χρήση των υψηλότερων τιμών της τραχύτητας k_s (προσαυξημένη ισοδύναμη τραχύτητα). Ειδικά για τις δικλείδες, οι τοπικές απώλειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ιδίως όταν αυτές περιορίζουν σημαντικά τη ροή. Στην περίπτωση αυτή, ανάλογα και με το άνοιγμα της δικλείδας, ο συντελεστής K μπορεί να αποκτήσει πολύ υψηλές τιμές (π.χ. 100-1000).

1.4 Μοντέλα προσομοίωσης και επίλυσης δικτύων ύδρευσης

Η προσομοίωση και επίλυση κάθε δικτύου διανομής νερού, πραγματοποιείται μέσω μιας μαθηματικής περιγραφής, δηλαδή μέσω της διατύπωσης εξισώσεων που αναφέρονται στην υδραυλική λειτουργία των συνιστωσών του δικτύου. Η μαθηματική περιγραφή κάθε δικτύου διανομής νερού, πραγματοποιείται αφού πρώτα γίνει δικτυακή απεικόνιση των συνιστωσών του φυσικού συστήματος, δηλαδή του δικτύου, ως συνιστώσες κάποιου μαθηματικού μοντέλου.

Συνιστώσες κάθε δικτύου διανομής νερού αποτελούν τα έργα αποθήκευσης νερού (δεξαμενές, υδατόπυργοι), τα έργα μεταφοράς νερού (αγωγοί υπό πίεση), οι διάφορες συσκευές ρύθμισης της ροής (δικλείδες, βαλβίδες), τα έργα ρύθμισης της πίεσης (μειωτές πίεσης, αντλιοστάσια) και γενικά πάσης φύσεως συσκευές διανομής.

Πιο συγκεκριμένα η μαθηματική περιγραφή του δικτύου επιτυγχάνεται με μετασχηματισμό του δικτύου σε ένα εννοιολογικό μοντέλο, βάσει του οποίου το σύνολο των συνιστωσών του δικτύου αναπαρίσταται με τη μορφή ιδεατών κόμβων και κλάδων.

Με τον όρο κόμβος νοούνται όλα τα σημεία εισροής ή εκροής νερού ή αλλαγής της γεωμετρίας του δικτύου ή μεταβολής των χαρακτηριστικών των αγωγών, με γνωστό απόλυτο υψόμετρο z , γνωστή παροχή εξόδου c και άγνωστο ενεργειακό υψόμετρο h .

Με τον όρο κλάδος (αγωγός), νοείται κάθε στοιχείο μεταφοράς νερού μήκους L , που αποτελείται από σύστημα σωλήνων σε σειρά, ομοιόμορφης διαμέτρου D , κλάσης και τραχύτητας k_s , κατά μήκος του οποίου θεωρείται ενιαία (άγνωστη) παροχή Q . (Ευστρατιάδης Α. & Κουτσογιάννης Δ., 2005).

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα υπολογιστικά πακέτα ανάλυσης δικτύων, τα οποία βάσει των μαθηματικών μοντέλων που αυτά υποστηρίζουν, υποβοηθούν τον μελετητή που σχεδιάζει ή την υπηρεσία που διαχειρίζεται ένα δίκτυο ύδρευσης για την λήψη ορθολογικών αποφάσεων, από τεχνική και οικονομική άποψη.

1.4.1 Δυνατότητες μοντέλων

Από τη δεκαετία του 60, όπου οι υπολογιστές δεν βρίσκονταν στο επίπεδο που βρίσκονται σήμερα, οι μηχανικοί προσπάθησαν να τους χρησιμοποιήσουν με απώτερο σκοπό την ανάλυση της ροής του νερού μέσα στα δίκτυα ύδρευσης. Από τότε, τόσο οι πρόοδοι στις αναλυτικές τεχνικές όσο και η “δύναμη” που απέκτησαν οι Η/Υ έδωσαν τη δυνατότητα, δίκτυα δεκάδων χιλιάδων αγωγών, να αναλύονται, μέσα σε μόλις μερικά δευτερόλεπτα.

Προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία ενός δικτύου ύδρευσης είναι η εξασφάλιση επαρκούς ποσότητας και ποιότητας νερού για την κάλυψη της κατανάλωσης, μέσα σε αποδεκτά όρια πίεσης. Τα υπολογιστικά πακέτα ανάλυσης και προσομοίωσης δικτύων, και τα σχετικά μαθηματικά μοντέλα που αυτά υποστηρίζουν, υποβοηθούν τον μελετητή που σχεδιάζει ή την υπηρεσία που διαχειρίζεται ένα δίκτυο ύδρευσης για την λήψη ορθολογικών αποφάσεων, από τεχνική και οικονομική άποψη. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μοντέλων, όπως και η θέσπιση των κριτηρίων επιλογής, υπόκεινται στην ανθρώπινη κρίση και εμπειρία.

Τα μοντέλα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα επίλυσης των δικτύων ύδρευσης, δηλαδή υπολογισμού των υδραυλικών χαρακτηριστικών της ροής,

σε συνθήκες σταθερής (στιγμιαίας) κατανάλωσης αλλά και σε συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης κατανάλωσης. Προσφέρουν:

- Επίλυση σταθερής κατάστασης (steady-state): Η επίλυση του δικτύου, δηλαδή ο υπολογισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών της ροής (παροχές, πιέσεις), γίνεται θεωρώντας σταθερή φόρτιση στους κόμβους (ο έλεγχος γίνεται για τη δυσμενέστερη φόρτιση). Με τον όρο φόρτιση νοείται η κατανάλωση στους κόμβους του δικτύου. Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για εφαρμογές διαστασιολόγησης αγωγών και αντλιών, καθώς και αποτίμησης της υδραυλικής επάρκειας υφιστάμενων δικτύων (Κουτσογιάννης Δ., 2006).
- Επίλυση χρονικά μεταβαλλόμενης κατάστασης (extended-period): Η επίλυση του δικτύου γίνεται σε διακριτά χρονικά βήματα, θεωρώντας χρονικά μεταβαλλόμενη κατανάλωση. Στόχος είναι ο έλεγχος της δυναμικής λειτουργίας του δικτύου σε κανονικές και έκτακτες συνθήκες. Κατά κανόνα, η διάρκεια της επίλυσης είναι μεγαλύτερη των 24 ωρών (τυπική τιμή 72 ώρες), ενώ το χρονικό βήμα εξαρτάται από τη διακύμανση των καταναλώσεων στο δίκτυο (τυπική τιμή μία ώρα). Η εν λόγω προσέγγιση θεωρείται κατάλληλη για εφαρμογές χωροθέτησης και ελέγχου της επάρκειας δεξαμενών, υπολογισμού της ενέργειας άντλησης και ανάλυσης της διαίτας των ποιοτικών παραμέτρων του νερού (η τελευταία λειτουργία γίνεται μέσω συνδυασμένων μοντέλων προσομοίωσης τόσο των υδραυλικών όσο και των ποιοτικών χαρακτηριστικών της ροής) (Κουτσογιάννης Δ., 2006).

1.4.2 Ανάγκη για τη χρήση μοντέλων

Το βασικό πρόβλημα της ροής του νερού μέσα στα δίκτυα διανομής του, με δεδομένες τις εισροές και τις εκροές από αυτά, είναι ο καθορισμός της ροής και ο υπολογισμός των πιέσεων σε αυτά. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό απαιτούνται δύο σύνολα εξισώσεων. Το πρώτο απαιτεί τη διατήρηση της ροής σε κάθε κόμβο, δηλαδή σε κάθε ένωση σωλήνων και το δεύτερο καθορίζει μια μη γραμμική σχέση μεταξύ ροής και απώλειας ενέργειας σε κάθε σωλήνα. Τέτοιες εξισώσεις είναι οι γνωστές Hazen-Williams και Darcy-Weisbach. Αυτές οι εξισώσεις αποτελούν ένα σύνολο μη-γραμμικών εξισώσεων όταν το υπό μελέτη δίκτυο αποτελείται από βρόγχους και περισσότερες από μια κύριες πηγές.

Γενικά είναι πολύ σημαντικό να κατανοηθούν πλήρως οι μεθοδολογίες στις οποίες βασίζονται οι υδραυλικοί υπολογισμοί. Όταν όμως αφομοιωθούν αυτές οι έννοιες, η διαδικασία επίλυσης μπορεί να καταλήξει επαναληπτική και κουραστική, δηλαδή το είδος της επίλυσης που ταιριάζει τέλεια σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στη χρήση αυτοματοποιημένων επιλύσεων για τα περισσότερα υδραυλικά προβλήματα. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Δραστική μείωση του χρονικού διαστήματος για την πραγματοποίηση μιας ανάλυσης.
- Περισσότερο λεπτομερείς εξισώσεις στην επίλυση με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για την πραγματοποίηση μιας επίλυσης χωρίς υπολογιστή απαιτούνται συχνά πολλές υποθέσεις απλοποίησης.

- Συστηματική οργάνωση και έλεγχος, για πιθανά λάθη, των δεδομένων που απαιτούνται να εισαχθούν από το πρόγραμμα. Η μετατροπή των μονάδων και η επαναλαμβανόμενη αναγραφή των εξισώσεων για κάθε είδους λύση, είναι μόνο δύο παραδείγματα στα οποία οι υπολογισμοί χωρίς τη χρήση υπολογιστή παρουσιάζουν συχνά λάθη, ενώ ένα καλά ελεγμένο λογισμικό πρόγραμμα αποφεύγει τέτοιου είδους αλγεβρικά και αριθμητικά λάθη.
- Βοήθεια στην καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, μέσω της χρήσης πινάκων, διαγραμμάτων, έγχρωμων χαρτών, ιστογραμμάτων κ.τ.λ.
- Σύνδεση με άλλα λογισμικά προγράμματα, όπως για παράδειγμα με βάσεις δεδομένων, με σχεδιαστικά προγράμματα (CAD) ή με γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS).
- Δυνατότητα πραγματοποίησης περισσότερων συγκρίσεων και δοκιμών σχεδιασμού, εξαιτίας της ταχύτητας και της αυξημένης ακρίβειας που παρέχουν τα υπολογιστικά μοντέλα. Το πλεονέκτημα αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διερεύνηση περισσότερων περιπτώσεων σχεδιασμού, γεγονός το οποίο τελικά καταλήγει σε καλύτερο και πιο αποτελεσματικό σχεδιασμό των δικτύων.

1.4.3 Βήματα χρήσης μοντέλων

Κάθε μοντέλο προσομοίωσης και επίλυσης δικτύων διανομής νερού, αποτελείται από δύο μέρη (Walski, 1983). Το πρώτο μέρος που αφορά το υπολογιστικό κομμάτι και το δεύτερο που αφορά το σύνολο των δεδομένων που περιγράφουν τα φυσικά στοιχεία των δικτύων, τις καταναλώσεις καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Τα βήματα τα οποία ακολουθούνται κατά τη χρήση υπολογιστικών προτύπων, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν ως εξής:

Καθορισμός του είδους των ερωτήσεων, τις οποίες το μοντέλο καλείται να απαντήσει.

- Αναπαράσταση των βασικών στοιχείων, τα οποία στην ουσία αποτελούν το δίκτυο.
- Συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων, τα οποία είναι αναγκαία για την περιγραφή των στοιχείων του δικτύου.
- Καθορισμός, σε κάθε χρονική στιγμή της ανάλυσης, της χρήσης του νερού στο υπό μελέτη δίκτυο.
- Χαρακτηρισμός του τρόπου λειτουργίας του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή ανάλυσης.
- Έλεγχος του μοντέλου σε πιθανά λάθη που προκύπτουν.
- Επίλυση του μοντέλου με σκοπό την απάντηση των ερωτήσεων που τέθηκαν αρχικά και τεκμηρίωσης των αποτελεσμάτων.

1.5 Εισαγωγή στο EPANET

Το EPANET είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα το οποίο προσομοιώνει τη χρονική διακύμανση των υδραυλικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών της ροής σε δίκτυα διανομής υπό πίεση κάθε μεγέθους και

οποιασδήποτε τοπολογίας. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των ΗΠΑ (U.S. Environmental Protection Agency), και είναι ελεύθερα διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html>. Πρωτοεμφανίστηκε το 1993 (Rossman, 1993), ενώ το 1999 βγήκε η δεύτερη έκδοσή του.

Αποτελεί ένα χρήσιμο ερευνητικό εργαλείο, το οποίο βοηθάει το χρήστη στο να κατανοήσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την κίνηση, τη “συμπεριφορά” του νερού μέσα στα δίκτυα διανομής του και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα είδη εφαρμογών που σχετίζονται με την προσομοίωση και ανάλυση των δικτύων διανομής του νερού. Γενικά, τέτοιου είδους προγράμματα, παρέχουν εύκολη πρόσβαση στα εργαλεία εκείνα που χρειάζονται για να προσομοιωθούν και επιλυθούν σύνθετα υδραυλικά δίκτυα. Ειδικότερα το EPANET με τις πολύ εξελιγμένες δυνατότητες προσομοίωσης του, μπορεί να επιλύσει υδραυλικά αλλά και ποιοτικά το δίκτυο, δίνοντας τα αποτελέσματα σε διάφορες μορφές, όπως για παράδειγμα χάρτες, γραφήματα, πίνακες.

Στις μέρες μας, στον τομέα της μηχανικής, το EPANET δε χρησιμοποιείται όσο τα προηγούμενα χρόνια, μιας και έχουν εμφανιστεί νέα και πιο εξελιγμένα λογισμικά προγράμματα, τα οποία κατά βάση ανήκουν στο χώρο των GIS. Παρ’ όλα αυτά το EPANET, θεωρείται ο προκάτοχος τέτοιων μοντέλων προσομοίωσης, οπότε πάντα θα λειτουργεί ως βάση για την κατανόηση και χρήση των μεταγενέστερων αυτού, προγραμμάτων.

1.6 Δυνατότητες του προγράμματος EPANET

Η επιλογή του EPANET, δεν οφείλεται μόνο στη δυνατότητα της αριθμητικής επίλυσης του γραμμικού προβλήματος που προκύπτει, αλλά και στην πληθώρα των επιπλέον δυνατοτήτων που προσφέρει. Επιγραμματικά μπορούμε να αναφέρουμε:

- Αναλύει όλα τα δίκτυα, ανεξαρτήτως μεγέθους.
- Λαμβάνει υπόψη γραμμικές αλλά και τοπικές απώλειες.
- Προσομοιώνει δεξαμενές σταθερής ή μεταβλητής γεωμετρίας, διάφορους τύπους ειδικών συσκευών (δικλείδες, μειωτές πίεσης) καθώς και αντλίες σταθερής ή μεταβλητής παροχής. Υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος λειτουργίας του δικτύου.
- Επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών προτύπων χρονικής διακύμανσης της κατανάλωσης για πολλαπλές χρήσεις και για κάθε κόμβο.
- Υποστηρίζει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης κανόνων λειτουργίας του δικτύου, μέσω κώδικα που γράφει ο χρήστης (συνήθως πρόκειται για χρονικούς περιορισμούς ή περιορισμούς παροχής της μορφής if...then).
- Εντοπίζει συντηρητικά και μη συντηρητικά συστατικά στο δίκτυο.
- Προσδιορίζει την πηγή του νερού καθώς επίσης την ηλικία και του νερού αλλά και των υπόλοιπων στοιχείων του δικτύου.
- Παρακολουθεί το ποσοστό του νερού που φτάνει, από ένα συγκεκριμένο κόμβο, σε όλους τους υπόλοιπους.
- Προσομοιώνει την αντίσταση που εμφανίζεται τόσο στη ροή όσο και στα τοιχώματα των σωλήνων.

1.7 Μέθοδος επίλυσης δικτύων μέσω του EPANET

Η επίλυση των κλειστών δικτύων στηρίζεται στην εξίσωση διατήρησης της μάζας και της ενέργειας και στη συσχέτιση του ύψους απωλειών με την παροχή για τα χαρακτηριστικά του αγωγού. Γενικά, οι δύο βασικές αρχές της υδραυλικής που ακολουθούνται κατά την επίλυση κλειστών δικτύων είναι οι εξής:

1. Αρχή διατήρησης μάζας ή αρχή συνέχειας παροχής: Σε ένα κόμβο το αλγεβρικό άθροισμα των παροχών ισούται με το μηδέν. Δηλαδή το άθροισμα των παροχών που εισρέουν σε αυτόν είναι ίσο με το άθροισμα των παροχών που εκρέουν από αυτόν και με την ποσότητα του νερού που καταναλώνεται στον κόμβο.
2. Αρχή διατήρησης ενέργειας ή αρχή συνέχειας πίεσης: Σε ένα κόμβο το ύψος της γραμμής ενέργειας είναι το ίδιο ανεξάρτητα από το ποια διαδρομή ακολουθεί το νερό για να φτάσει σε αυτόν. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια σε ένα βρόχο το αλγεβρικό άθροισμα των απωλειών φορτίου να ισούται με το μηδέν. Τα πρόσημα των απωλειών φορτίου καθορίζονται προεπιλέγοντας θετική φορά κίνησης του νερού μέσα στον βρόχο (συνήθως ως θετική επιλέγεται η ωρολογιακή φορά), όταν η φορά ροής είναι θετική τότε και το ύψος απωλειών φορτίου είναι θετικός αριθμός. Για την επίλυση κλειστών δικτύων, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι, οι οποίες αποτελούν επαναληπτικές μεθόδους. Τρεις όμως είναι οι βασικές επαναληπτικές μέθοδοι επίλυσης κλειστών δικτύων. Η πρώτη μέθοδος είναι η μέθοδος Q – Cross, η οποία αναπτύχθηκε από τον Αμερικανό πολιτικό μηχανικό HardyCross το 1938 και η οποία αποτελεί την παλιότερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη επαναληπτική μέθοδο υπολογισμού παροχών. Παρ' όλα αυτά ο προγραμματισμός της σε ηλεκτρονικό περιβάλλον είναι δύσκολος και λιγότερο αποτελεσματικός από άλλες μεθόδους που αναπτύχθηκαν αργότερα. Η επίλυσή της βασίζεται στις ΔQ -εξισώσεις. Στόχος της είναι να υπολογίσει τις διορθωτικές παροχές $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_L$ των L βρόχων του δικτύου. Αυτό επιχειρεί να το κάνει όχι με την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων ενέργειας, αλλά υπολογίζοντας τη διορθωτική παροχή κάθε βρόχου ξεχωριστά.

Η δεύτερη μέθοδος αναπτύχθηκε από τους R. Epp και A. G. Fowler το 1970. Όπως και η Q-Cross είναι μια επαναληπτική μέθοδος και χρησιμοποιεί τις ΔQ -εξισώσεις για την επίλυσή της. Σε αντίθεση με την προηγούμενη, προσπαθεί να υπολογίσει την τιμή της διορθωτικής παροχής ΔQ επιλύοντας το σύστημα των μη γραμμικών εξισώσεων που προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της ενέργειας σε κάθε βρόχο. Για να γραμμικοποιηθούν οι εξισώσεις ενέργειας χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος των Newton-Raphson. Από τη χρήση αυτού του αλγόριθμου προέρχεται και το όνομα της μεθόδου. Η προηγούμενη μέθοδος (Q-Cross) αποτελεί υποπερίπτωση αυτής. Βρήκε ιδιαίτερη ανταπόκριση γιατί συγκλίνει πολύ γρήγορα στις πραγματικές τιμές των παροχών.

Η τρίτη μέθοδος αναπτύχθηκε από τους D. J. Wood και C. O. A. Charles το 1972 και είναι γνωστή ως γραμμική μέθοδος. Έχει δυο βασικά πλεονεκτήματα απέναντι στις μεθόδους που περιγράφονται παραπάνω. Το πρώτο ότι μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί σε περιβάλλον ηλεκτρονικού

υπολογιστή και το δεύτερο ότι για να ξεκινήσει η διαδικασία επίλυσης δε χρειάζεται επιλογή αρχικών τιμών των παροχών των κλάδων, αλλά μονό μια υπόθεση της κατεύθυνσης του νερού στους κλάδους. Είναι η μέθοδος που χρησιμοποιούν τα περισσότερα υπολογιστικά προγράμματα κατασκευής και επίλυσης δικτύων ύδρευσης και μπορεί να δώσει έγκυρα αποτελέσματα ακόμα και για περίπλοκα δίκτυα που αποτελούνται από χιλιάδες κλάδους. Η θεωρία αυτής της μεθόδου βασίζεται στις Q-εξισώσεις και προσπαθεί να υπολογίσει τις παροχές των κλάδων επιλύοντας τις εξισώσεις που προκύπτουν και από την αρχή συνέχειας παροχής των κόμβων και από την αρχή διατήρησης ενέργειας των βρόχων ταυτόχρονα σε ένα κοινό σύστημα εξισώσεων.

Το EPANET για την επίλυση δικτύων ύδρευσης χρησιμοποιεί μια μέθοδο επίλυσης η οποία αναπτύχθηκε από τους Todini και Pilati το 1987. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια υβριδική, βαθμωτή μέθοδο και είναι γνωστή ως "GradientMethod". Αποτελεί και αυτή μια επαναληπτική μέθοδο μεταγενέστερη των τριών παραπάνω μεθόδων. Ουσιαστικά είναι μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί στοιχεία και από τη μέθοδο Newton – Raphson αλλά και από τη γραμμική μέθοδο. Επιλύει τα δίκτυα βάσει και των δύο βασικών υδραυλικών αρχών και χρησιμοποιεί μερικές παραγώγους για τη γραμμικοποίηση των μη γραμμικών εξισώσεων.

Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι ολικές απώλειες ενέργειας που αναπτύσσονται κατά μήκος των αγωγών του δικτύου. Η μέθοδος αυτή, ξεκινάει την επίλυση θεωρώντας αρχικές παροχές στους αγωγούς του δικτύου, χωρίς να είναι απαραίτητη η εξασφάλιση της αρχής της συνέχειας των παροχών. Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου, επιλύοντας μια σειρά εξισώσεων μέσω πινάκων, υπολογίζονται τα ύψη ενέργειας σε κάθε κόμβο. Αφού υπολογιστούν τα ύψη ενέργειας στους κόμβους, υπολογίζονται οι νέες παροχές για τους αγωγούς του δικτύου, οι οποίες αποτελούν τις διορθωτικές παροχές. Με τις διορθωτικές παροχές υπολογίζονται οι νέες ολικές απώλειες ενέργειας κατά μήκος των αγωγών και ακολουθείται πάλι η ίδια διαδικασία. Οι επαναλήψεις σταματάνε όταν οι διορθωτικές παροχές είναι μικρότερες από ένα όριο που έχει ορίσει ο χρήστης. Γενικά στις επαναληπτικές τεχνικές επίλυσης, ορίζονται αυθαίρετες αρχικές τιμές στις μεταβλητές του προβλήματος και επιδιώκεται η σταδιακή μείωση του σφάλματος μέχρι να επέλθει σύγκλιση. Η αρχή διατήρησης της μάζας μπορεί να μην ικανοποιείται μόνο κατά την πρώτη επίλυση του δικτύου. Από την πρώτη επανάληψη αλλά και στο σύνολο των επαναλήψεων που ακολουθούν, ικανοποιείται η αρχή συνέχειας της παροχής.

1.8 Τρόπος λειτουργίας του προγράμματος

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος EPANET (Rossman, 2000): «Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα EPANET για την επίλυση της συνεχούς ροής και των εξισώσεων απωλειών ενέργειας, τα οποία χαρακτηρίζουν την υδραυλική κατάσταση ενός δικτύου αγωγών για μια χρονική στιγμή μπορεί να οριστεί ως υβριδική επαναληπτική προσέγγιση επίλυσης κόμβων. Οι Todini και Pilati (1987) και αργότερα οι Sadiago κ.ά. (1988) την αποκάλεσαν «Gradient Method». Παρόμοιες προσεγγίσεις έχουν γίνει και από άλλους, όμως η προσέγγιση του Todini είναι η πιο απλή και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η χρήση του στο EPANET.

Ο συντελεστής τραχύτητας f για έναν αγωγό, για τον τύπο υπολογισμού απωλειών ενέργειας Darcy-Weisbach, υπολογίζεται με διαφορετικές εξισώσεις, ανάλογα με την τιμή του αριθμού Reynolds (Re):

- Hagen – Poiseuille τύπος για $Re < 2000$ (Bhave, 1991)

$$f = \frac{64}{Re}$$

- Swamee and Jain προσέγγιση στην εξίσωση Colebrook – White για $Re > 4000$ (Bhave, 1991)

$$f = \frac{0.25}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) \right]^2}$$

- Κυβική Παρεμβολή από το διάγραμμα Moody για $2000 < Re < 4000$ (Dunlop, 1991):

$$R = \frac{Re}{2000}$$

$$X1 = 7FA - FB$$

$$X2 = 0.128 - 17FA + 2.5FB$$

$$X3 = -0.128 + 13FA - 2FB$$

$$X4 = R(0.032 - 3FA + 0.5FB)$$

$$FA = (Y3)^{-2}$$

$$FB = FA \left(2 - \frac{0.00514215}{(Y2)(Y3)} \right)$$

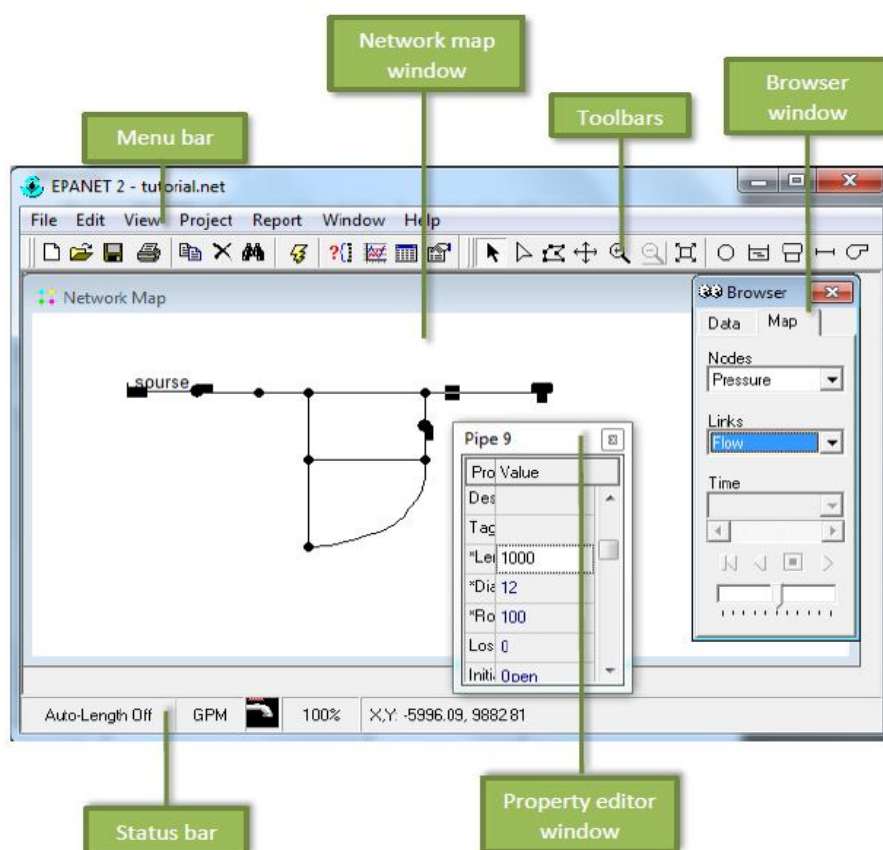
$$Y2 = \frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}$$

$$Y3 = -0.86859 \ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{4000^{0.9}}\right)$$

όπου ε = τραχύτητα του αγωγού και d = διάμετρος αγωγού»

Κεφάλαιο 2: Ο χώρος εργασίας του προγράμματος EPANET

Ο βασικός χώρος εργασίας του EPANET παρουσιάζεται παρακάτω. Αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία του περιβάλλοντος εργασίας: Menu Bar , Toolbars , Status Bar , Network Map window , Browser window, Property Editor window. Στο χώρο εργασίας του EPANET, συναντώνται τρεις “μπάρες εργαλείων” και δύο “παράθυρα”. Στις μπάρες εργαλείων ανήκουν τα εξής:



Εικόνα 1: Ο βασικός χώρος εργασίας του προγράμματος

2.1 Βασικές εργασίες

Menu Bar

Βρίσκεται στο πάνω μέρος του χώρου εργασίας του προγράμματος και περιλαμβάνει μια σειρά εντολών με τις οποίες ο χρήστης ελέγχει το πρόγραμμα. Περιλαμβάνει τις εξής εντολές:

- File menu: περιλαμβάνει εντολές για άνοιγμα, αποθήκευση και εκτύπωση αρχείων).
- Edit menu: περιλαμβάνει εντολές για αντιγραφή του χάρτη, των αποτελεσμάτων

- View menu: περιλαμβάνει κυρίως εντολές που αφορούν την παρουσίαση του χάρτη στο χρήστη.
- Project menu: περιλαμβάνει κυρίως εντολές που αφορούν την ανάλυση και τον τρόπο με τον οποίο θα επιλυθεί το δίκτυο.
- Report menu: περιλαμβάνει κυρίως εντολές που αφορούν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του δικτύου.
- Window menu: περιλαμβάνει κυρίως εντολές που αφορούν την επαναφορά των παραθύρων του προγράμματος σε περίπτωση κλεισίματός τους.
- Help menu: περιλαμβάνει εντολές που βοηθούν το χρήστη στο να κατανοήσει καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το πρόγραμμα.

Το **File menu** περιέχει εντολές για το άνοιγμα, την αποθήκευση και την εκτύπωση αρχείων δεδομένων:

Εντολές	Περιγραφή
New	Δημιουργεί ένα νέο EPANet project
Open	Ανοίγει ένα ήδη υπάρχον σχέδιο
Save	Αποθηκεύει το τρέχον πρόγραμμα
Save as	Αποθηκεύει το τρέχον πρόγραμμα με διαφορετικό όνομα
Import	Εισάγει δεδομένα για το δίκτυο ή ένα χάρτη ενός αρχείου
Export	Εξάγει δεδομένα από ένα δίκτυο ή ένα χάρτη απ το αρχείο
Page set up	Ρυθμίζει τις κεφαλίδες, τα υποσέλιδα και τα περιθώρια για εκτύπωση
Print preview	Προεπισκόπηση της εκτύπωσης της τρέχουσας προβολής
Print	Εκτύπωση της τρέχουσας προβολής
Preferences	Θέτει τις προτιμήσεις του προγράμματος
Exit	Έξοδος από το EPANet

Εικόνα 2: Οι εντολές του File menu

Το **Edit menu** περιέχει εντολές για επεξεργασία και αντιγραφή:

Εντολές	Περιγραφή
Copy to	Αντιγράφει την τρέχουσα εικόνα ως αρχείο
Select object	Επιτρέπει την επιλογή ενός αντικειμένου στον χάρτη
Select vertex	Επιτρέπει την επιλογή των κορυφών των συνδέσεων στο χάρτη
Select region	Επιτρέπει την επιλογή μίας περιγραφόμενης περιοχής στο χάρτη
Select all	Επιλέγει ολόκληρη την ορατή περιοχή στο χάρτη
Group edit	Επεξεργάζεται μία ιδιότητα για την ομάδα των αντικειμένων που εμπίπτουν στην περιγραφόμενη περιοχή του χάρτη

Εικόνα 3: Οι εντολές του Edit menu

Το **View menu** ελέγχει την εμφάνιση του χάρτη του δικτύου:

Εντολές	Περιγραφή
Dimensions	Διαστασιολόγηση του χάρτη
Backdrop	Επιτρέπει το άνοιγμα ενός χάρτη στο χώρο εργασίας μας
Pan	Μετακίνηση κατά μήκος του χάρτη
Zoom in	Μεγέθυνση του χάρτη
Zoom out	Σμίκρυνση του χάρτη
Full extent	Επανασχεδίαση του χάρτη σε νέα έκταση
Find	Εντοπισμός ενός συγκεκριμένου σημείου στο χάρτη
Query	Αναζήτηση στο χάρτη για σημεία που πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια
Overview map	Εναλλαγή χάρτη επισκόπησης σε ανοιχτό/κλειστό
Legends	Επιλογή εμφάνισης των στοιχείων των αντικειμένων στον χάρτη
Toolbars	Επιλογή εμφάνισης των toolbars
Options	Επιλογές ρύθμισης της εμφάνισης του χάρτη

Εικόνα 4: Οι επιλογές του View menu

Το **Project menu** περιέχει εντολές που σχετίζονται με το τρέχον έργο που αναλύεται:

Εντολές	Περιγραφή
Summary	Παρέχει μία συνοπτική περιγραφή των χαρακτηριστικών του έργου
Defaults	Επεξεργασία των προεπιλεγμένων ιδιοτήτων ενός έργου
Calibration data	Καταχωρεί δεδομένα που περιέχουν δεδομένα βαθμονόμησης με το έργο
Analysis options	Επεξεργασία επιλογών ανάλυσης
Run analysis	Τρέχει μία προσομοίωση

Εικόνα 5: Οι εντολές του Project menu

Το **Report menu** έχει εντολές που χρησιμοποιούνται για την αναφορά των αποτελεσμάτων ανάλυσης σε διαφορετικές μορφές:

Εντολές	Περιγραφή
Status	Αναφέρει αλλαγές στη κατάσταση των συνδέσεων με την πάροδο του χρόνου
Energy	Αναφέρει την ενέργεια που καταναλώνεται από κάθε αντλία
Calibration	Αναφέρει τις διαφορές μεταξύ προσομοιωμένων και μετρούμενων τιμών
Reaction	Αναφέρει τις μέσες τιμές αντίδρασης σε όλο το δίκτυο
Full	Δημιουργεί μία πλήρη έκθεση των αποτελεσμάτων σε ένα αρχείο κειμένου
Graph	Δημιουργεί διαγράμματα με επιλεγμένες παραμέτρους
Table	Δημιουργεί ένα πίνακα από επιλεγμένους κόμβους και ποσότητες συνδέσεων
Options	Ελέγχει το στυλ εμφάνισης της έκθεσης των γραφημάτων ή των πινάκων

Εικόνα 6: Οι εντολές του Report menu

Το **Window menu** περιέχει τις παρακάτω εντολές:

Εντολές	Περιγραφή
Arrange	Αναδιοργανώνει όλα τα μικρά παράθυρα για να χωρέσουν μέσα στο κύριο παράθυρο
Close all	Κλείνει όλα τα ανοιχτά παράθυρα (εκτός του χάρτη και του Browser)
Window list	Επιλογή παραθύρου

Εικόνα 7: Οι εντολές του Window menu

Το **Help menu** περιέχει εντολές για τη βοήθεια του χρήστη:

Εντολές	Περιγραφή
Help topics	Εμφανίζει το παράθυρο διαλόγου για θέματα βοήθειας του συστήματος
Units	Παραθέτει τις μονάδες μέτρησης για όλες τις παραμέτρους του EPAnet
Tutorial	Παρουσιάζει ένα σύντομο tutorial για την εισαγωγή του χρήστη στο EPAnet
About	Παραθέτει πληροφορίες για την έκδοση του EPAnet που χρησιμοποιείται













Εικόνα 8: Οι εντολές του Help menu

Toolbars















Η συγκεκριμένη “μπάρα εργαλείων” περιλαμβάνει μια σειρά εικονιδίων, σχεδιαστικών και μη, μέσω των οποίων δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να σχεδιάσει το προς επίλυση δίκτυο διανομής νερού αλλά και να επιλέξει αυτόματα την εκτέλεση βασικών εντολών όπως την αποθήκευση και εκτύπωση του project που έχει δημιουργήσει, να επιλέξει την επίλυση του δικτύου μέσω του προγράμματος, να εξάγει πίνακες, γραφήματα.

- Βασική γραμμή εργαλείων (standard toolbar)

Η βασική γραμμή εργαλείων περιέχει συντομεύσεις για εντολές που χρησιμοποιούνται συχνά:

-  Ανοίγει ένα νέο παράθυρο σχεδίασης
-  Ανοίγει ένα υπάρχον έργο
-  Αποθηκεύει το τρέχον έργο
-  Εκτυπώνει το επί του παρόντος ενεργό παράθυρο
-  Αντιγράφει την επιλογή στο πρόχειρο ή σε ένα αρχείο
-  Διαγράφει το επιλεγμένο αντικείμενο
-  Εντοπίζει ένα συγκεκριμένο στοιχείο του χάρτη
-  Τρέχει μία προσομοίωση
-  Εκτελεί μία απορία στο χάρτη
-  Δημιουργεί ένα νέο γράφημα των αποτελεσμάτων
-  Δημιουργεί ένα νέο πίνακα των αποτελεσμάτων
-  Τροποποιεί τις επιλογές προβολής των αντικειμένων

· Γραμμή εργαλείων του χάρτη (map toolbar)
 Η γραμμή εργαλείων του χάρτη περιέχει συντομεύσεις για την εργασία πάνω στο χάρτη που δουλέψουμε το δίκτυο:

-  Επιλέγει ένα αντικείμενο στο χάρτη
-  Επιλέγει τα σημεία κορυφών των συνδέσεων
-  Επιλέγει μία περιοχή στο χάρτη
-  Μετακίνηση δικτύου κατά μήκος του χάρτη
-  Μεγέθυνση
-  Σμίκρυνση
-  Επαναφορά του χάρτη σε πλήρη έκταση
-  Τοποθέτηση κόμβου στον χάρτη
-  Τοποθέτηση ρεζερβουάρ στον χάρτη
-  Τοποθέτηση δεξαμενής στον χάρτη
-  Τοποθέτηση αγωγού στον χάρτη
-  Τοποθέτηση αντλίας στον χάρτη
-  Τοποθέτηση βαλβίδας στον χάρτη
-  Τοποθέτηση ετικέτας στον χάρτη

Οι γραμμές εργαλείων μπορούν να αναδιπλώνονται κάτω από το Κυρίως Μενού ή να σύρονται σε οποιοδήποτε θέση στο χώρο εργασίας του προγράμματος.

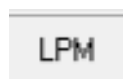
Status Bar

Εμφανίζεται στο κάτω μέρος του χώρου εργασίας του προγράμματος και περιλαμβάνει τις παρακάτω πληροφορίες:

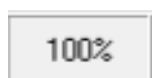
- Auto-Length: πληροφορεί το χρήστη εάν είναι ενεργοποιημένος (on) ή όχι (off) ο αυτόματος υπολογισμός του μήκους των αγωγών του δικτύου.



- Flow Units: πληροφορεί το χρήστη για την μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για την παροχή κατανάλωσης (π.χ. Litre Per Second- LPS).



- Zoom Level: πληροφορεί το χρήστη για το επίπεδο μεγέθυνσης του χάρτη.



- X , Y Location: πληροφορεί το χρήστη για τη θέση του κέρσορα στο χάρτη, κάθε στιγμή.



Network Map

Το παράθυρο αυτό παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα σχεδίασης του προς επίλυση δικτύου διανομής νερού. Στο παράθυρο αυτό εισάγονται με χρήση των αντίστοιχων εικονιδίων, όλες οι βασικές συνιστώσες (κόμβοι (junctions), δεξαμενές, αγωγοί, ειδικές συσκευές) που απαρτίζουν ένα δίκτυο διανομής νερού. Η τοποθέτησή τους στο χάρτη καθώς επίσης και οι αποστάσεις μεταξύ τους, δεν είναι αναγκαίο να ανταποκρίνονται στις πραγματικές τους τιμές.

Στο χώρο αυτό, επιλεγμένα μεγέθη των συνιστωσών του δικτύου (π.χ. πιέσεις στους κόμβους, ταχύτητες ροής στους αγωγούς), μπορούν να εμφανιστούν γραφικά μέσω χρωματικών διαβαθμίσεων. Νέες συνιστώσες του δικτύου μπορούν να προστεθούν αλλά και ήδη υπάρχοντες να διαγραφούν ή να μετακινηθούν σε νέα θέση.

Επίσης, όσον αφορά τους κόμβους και τους αγωγούς, μπορούν να σχεδιαστούν σε διαφορετικά μεγέθη, με σκοπό την καλύτερη και ευκρινέστερη παρουσίαση τους. Τέλος, το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα χρήσης κάποιου χάρτη ως υπόβαθρο (π.χ. ένα τοπογραφικό χάρτη, δρόμους κ.τ.λ.) σύμφωνα με το οποίο θα γίνει η σχεδίαση του προς επίλυση δικτύου διανομής νερού.

Browser Window

- Data Browser

Δίνει πρόσβαση σε διάφορα αντικείμενα, ανά κατηγορία (Κόμβους, Σωλήνες, κλπ.) που περιέχονται στο δίκτυο που αναλύεται. Τα κουμπιά στο κάτω μέρος χρησιμοποιούνται για τον πρόσθεση, την διαγραφή και την επεξεργασία των αντικειμένων.



Εικόνα 9: Data Browser

- Map Browser

Επιλέγει τις παραμέτρους και τη χρονική περίοδο που προβάλλονται σε χρηματιστή κωδικοποίηση για το Network Map.



Εικόνα 10: Map Browser

Property Editor Window

Το Property Editor Window χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των ιδιοτήτων των κόμβων του δικτύου, των συνδέσεων, των ετικετών, και την επιλογή ανάλυσης. Μπορεί να προβοληθεί μόνον όταν ένα από αυτά τα αντικείμενα έχει επιλεγεί (είτε στο δίκτυο είτε στον χάρτη ή στο Data Browser) και πιεστεί με διπλό κλικ ή πιεστεί κλικ στο κουμπί Browser Edit. Τα ακόλουθα σημεία εξηγούν τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται το πρόγραμμα επεξεργασίας.

Property	Value
*Junction ID	5
X-Coordinat	2137.00
Y-Coordinat	7030.00
Description	
Tag	
*Elevation	887.6
Base Dema	0

Εικόνα 11: Property Editor Window

- Ο Editor είναι ένα πλέγμα με δύο στήλες μία για το όνομα της ιδιότητας και η άλλη για την τιμή της.
- Οι στήλες μπορούν να αλλάξουν μέγεθος, αλλάζοντας το μέγεθος της κεφαλίδας στην κορυφή του Editor με το ποντίκι.
- Ο αστερίσκος δίπλα σε ένα όνομα ιδιότητας σημαίνει ότι είναι υποχρεωτική και η τιμή του δεν θα μπορεί να μείνει κενή.
- Η ιδιότητα στον Editor που δίνεται έμφαση τη στιγμή εκείνη επισημαίνεται με λευκό φόντο.

2.2 **Βήματα για την χρήση του προγράμματος EPANET**

Συνήθως τα βήματα για να διαμορφώσουμε ένα σύστημα διανομής νερού χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα είναι τα εξής:

1. Σχεδιάζουμε μία αναπαράσταση του δικτύου του συστήματος διανομής μας.
2. Επεξεργαζόμαστε τις ιδιότητες των αντικειμένων που συνθέτουν το σύστημα.
3. Περιγράφουμε πως λειτουργεί το σύστημα.
4. Επιλέγουμε μία σειρά από επιλογές ανάλυσης.
5. Εκτελούμε μία ανάλυση της ποιότητας των υδάτων ή μία υδραυλική ανάλυση.
6. Εξετάζουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Παρακάτω αναλύονται τα βήματα για πιο αποτελεσματικό τρόπο διαχείρισης του προγράμματος.

Εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων των στοιχείων του δικτύου

Για κάθε στοιχείο του δικτύου υπάρχουν κάποιες βασικές ποσότητες οι οποίες θα πρέπει να εισαχθούν ως δεδομένα στο πρόγραμμα. Οι ποσότητες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

Για τις συνδέσεις (junctions), ως δεδομένα εισάγονται:

- Το υψόμετρό τους (elevation), υπολογισμένο σε σχέση με κάποιο σημείο αναφοράς. Συνήθως είναι υπολογισμένο από τη μέση στάθμη της θάλασσας.
- Η κατανάλωση νερού (base demand). Για τους αγωγούς (pipes), ως δεδομένα εισάγονται:
- Η εσωτερική τους διάμετρος (diameter).
- Το μήκος τους (length).
- Ο συντελεστής τραχύτητας (roughness coefficient).

Για τις δεξαμενές (reservoirs), ως δεδομένα εισάγονται:

- Το υψόμετρο της δεξαμενής (total head), το οποίο αντιστοιχεί στο υψόμετρο της επιφάνειας του νερού στη δεξαμενή, όταν αυτή δεν βρίσκεται υπό πίεση.

Για τις δεξαμενές αποθήκευσης (tanks), ως δεδομένα εισάγονται:

- Το υψόμετρο πυθμένα στο οποίο αντιστοιχεί μηδενική στάθμη νερού (elevation).
- Η διάμετρος της δεξαμενής (diameter).
- Το υψόμετρο της στάθμης του νερού πάνω από τον πυθμένα της, στην αρχή της προσομοίωσης (initial level).
- Το ελάχιστο υψόμετρο της στάθμης του νερού πάνω από τον πυθμένα της, κάτω από το οποίο η δεξαμενή δεν μπορεί να λειτουργήσει (minimum level).
- Το μέγιστο υψόμετρο της στάθμης του νερού πάνω από τον πυθμένα της, το οποίο η δεξαμενή δεν μπορεί να ξεπεράσει (maximum level).

Για τις αντλίες (pumps), ως δεδομένα εισάγονται:

- Οι χαρακτηριστικές τους καμπύλες (pump curves), οι οποίες στην ουσία αναπαριστούν τη σχέση μεταξύ ύψους ενέργειας και ροής που μπορούν να παράγουν οι αντλίες.

Για τις βαλβίδες (valves), ως δεδομένα εισάγονται:

- Η διάμετρος τους (diameter).
- Η κατάσταση τους, δηλαδή αν είναι ανοιχτές ή κλειστές (status).
- Ο τύπος βαλβίδας (setting).

Περιγραφή της λειτουργίας του δικτύου

Στο στάδιο αυτό ο χρήστης επιλέγει τον τρόπο με τον οποίο θα λειτουργήσει και επομένως θα αναλυθεί το δίκτυο διανομής νερού που μελετά. Ουσιαστικά μπορεί να επιλέξει, για το δίκτυο, προσομοίωση παρατεταμένης περιόδου με τη χρήση χρονικών προτύπων (time patterns), τη χρήση αλγόριθμων οι οποίοι θα καθορίσουν τη ροή του νερού στο υπό μελέτη δίκτυο (controls) ή τη λειτουργία του βάσει των χαρακτηριστικών καμπύλων (curves), που έχει ορίσει ο χρήστης.

Επιλογή βασικών παραμέτρων για την επίλυση του δικτύου

Στο στάδιο αυτό καθορίζονται οι μονάδες μέτρησης των καταναλώσεων στους κόμβους και των παροχών στους αγωγούς. Επίσης καθορίζονται, η μέθοδος με την οποία το πρόγραμμα θα υπολογίσει τις γραμμικές απώλειες ενέργειας κατά μήκος των αγωγών, ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων που θα πραγματοποιήσει το πρόγραμμα για την επίλυση του δικτύου καθώς

επίσης και το όριο των διορθωτικών παροχών σύμφωνα με το οποίο θα σταματήσει η επίλυση του δικτύου.

Επίλυση του δικτύου

Αφού έχει σχεδιαστεί το δίκτυο και έχουν εισαχθεί όλα τα απαραίτητα δεδομένα, το πρόγραμμα είναι σε θέση να επιλύσει το δίκτυο. Σε περίπτωση που η ανάλυση δεν είναι επιτυχημένη, τότε εμφανίζεται ένα παράθυρο το οποίο διευκρινίζει τα πιθανά λάθη που υπάρχουν και τα οποία θα πρέπει να διορθωθούν από το χρήστη.

Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Το EPANET είναι ένα πρόγραμμα το οποίο προσφέρει στο χρήστη, διάφορες εναλλακτικές παρουσιάσεις τόσο των δεδομένων των στοιχείων όσο και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν μέσω χαρτών, πινάκων, αλλά και διαγραμμάτων. Πολύ χρήσιμοι για την εξαγωγή συμπερασμάτων αλλά και για την ευκολότερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των δικτύων είναι οι διάφοροι χάρτες που μπορούν να παραχθούν από το πρόγραμμα. Οι χάρτες αυτοί αποτελούν χάρτες με χρωματική διαβάθμιση, όπου κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών κάποιου μεγέθους.

Κεφάλαιο 3: Λειτουργίες του EPANET

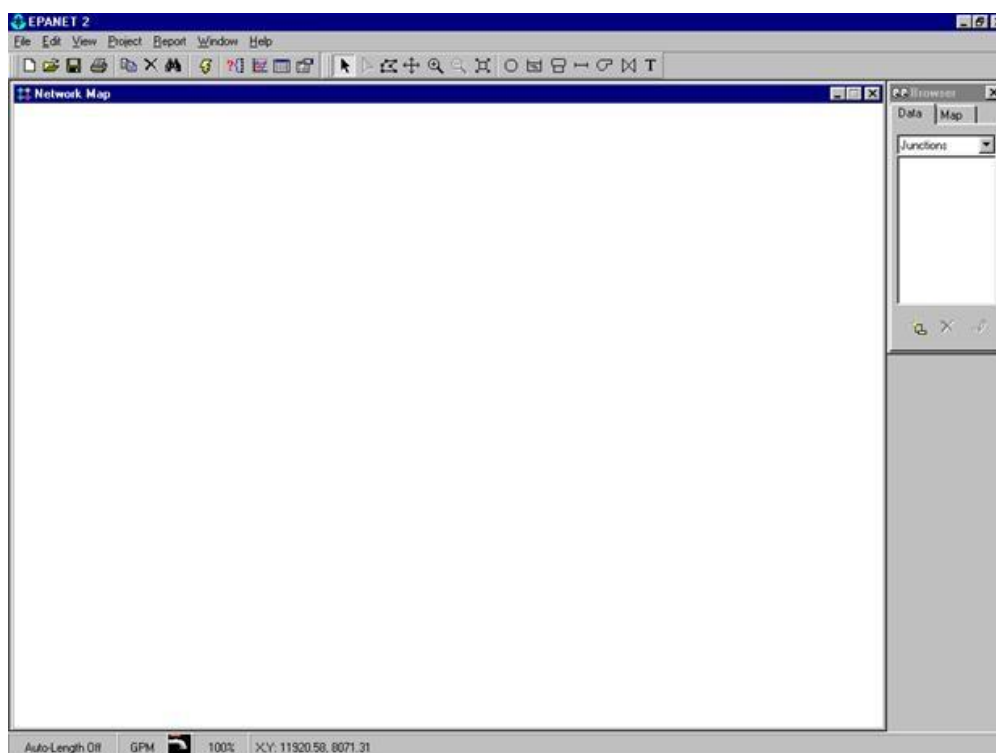
Τα αρχεία έργου περιέχουν όλες τις πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση ενός δικτύου. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας, ανοίγματος και αποθήκευσης έργων EPANET και ορισμού ορισμένων προεπιλεγμένων ιδιοτήτων.

3.1 Δημιουργία νέου έργου

Για να δημιουργήσουμε ένα νέο έργο εργαζόμαστε ως εξής:

1. Επιλέγουμε **File | New** ή κάνουμε κλικ στο **New Project** στο μενού γενικές γραμμές εργαλείων.
2. Θα ζητηθεί να αποθηκεύσουμε το εξερχόμενο έργο (εάν έχουν γίνει αλλαγές σε αυτό) πριν από τη δημιουργία του νέου έργου.
3. Δημιουργείται ένα νέο, ανώνυμο έργο με όλες τις επιλογές που έχουν οριστεί στις προεπιλεγμένες τιμές τους.

Ένα νέο έργο δημιουργείται αυτόματα κάθε φορά που αρχίζει το EPANET και η οθόνη μοιάζει με αυτή που φαίνεται στην εικόνα 12.

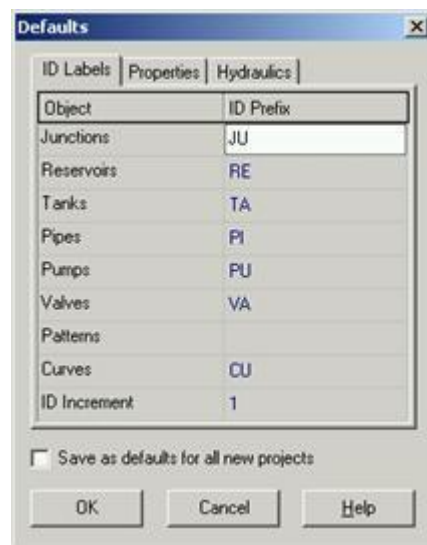


Εικόνα 12: Αρχική οθόνη του λογισμικού EPANET

3.1.1 Ρύθμιση προεπιλογών προγράμματος

Όταν έχουμε πολλούς σωλήνες με παρόμοιες διαμέτρους και μήκη και όλοι οι κόμβοι βρίσκονται στο ίδιο ύψος θα είναι χρήσιμο να δημιουργήσουμε ορισμένες προεπιλεγμένες τιμές για όλα τα στοιχεία που θα δημιουργηθούν στο έργο. Για να ορίσουμε προεπιλεγμένες τιμές για ένα έργο:

- 1 Επιλέγουμε **Project | Defaults**.
- 2 Θα εμφανιστεί μια φόρμα διαλόγου **Defaults** με τρεις σελίδες προκαθορισμένων κατηγοριών που μπορούμε να επεξεργαστούμε: Προεπιλεγμένες ετικέτες ταυτότητας. Προεπιλεγμένες ιδιότητες κόμβου / συνδέσμου. Προεπιλεγμένες επιλογές υδραυλικού συστήματος.
- 3 Κάνοντας κλικ σε οποιοδήποτε πλαίσιο στη δεξιά στήλη οποιουδήποτε από αυτά τα μενού, όπου έχουν συμπληρωθεί οι επιλογές, εμφανίζεται ένα αναπτυσσόμενο μενού όπου μπορούμε να επιλέξουμε από τις διαθέσιμες επιλογές.
- 4 Ελέγχουμε το πλαίσιο στο κάτω δεξιά μέρος της φόρμας διαλόγου αν θέλουμε να αποθηκεύσουμε τις επιλογές μας για χρήση σε όλα τα νέα μελλοντικά έργα επίσης.
- 5 Κάνουμε κλικ στο κουμπί OK για να αποδεχθούμε την επιλογή των προεπιλογών.

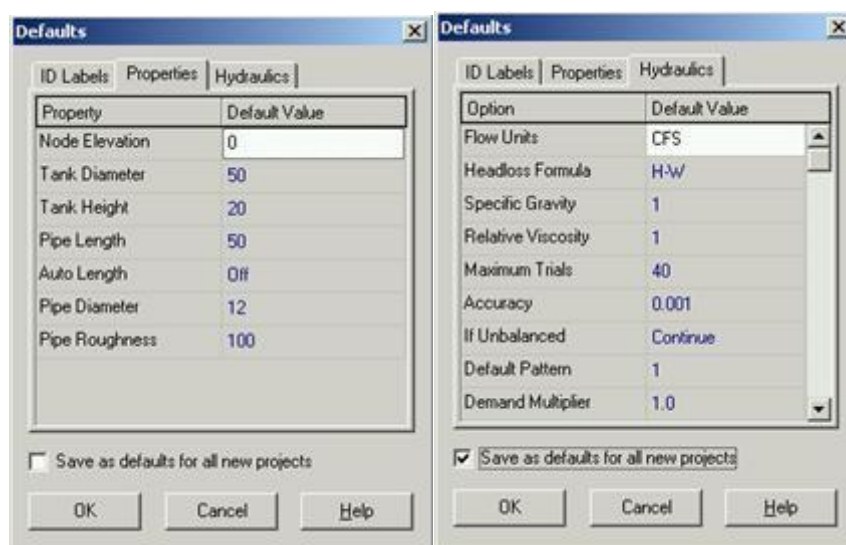


Εικόνα 13: Προεπιλεγμένες τιμές - Ετικέτες ταυτότητας

Σε αυτό το παράθυρο μπορούμε να αντιστοιχίσουμε χαρακτήρες για να εντοπίσουμε κάθε στοιχείο του δικτύου. Για παράδειγμα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε JU για όλες τις διασταυρώσεις, RE για δεξαμενές, TA για δεξαμενές, PI για σωλήνες, PU για αντλίες, VA για βαλβίδες, PA για μοτίβα και CU για καμπύλες. Αφήνουμε την προκαθορισμένη τιμή 1 ως αύξηση της ταυτότητας κατά τη διάρκεια της αριθμητικής. Όταν το δίκτυο είναι μεγάλο, αυτό το βήμα βοηθάει στο να εντοπίσουμε γρήγορα συγκεκριμένα στοιχεία με ανεπιθύμητες ροές ή πιέσεις.

Η εικόνα 3 δείχνει τις ιδιότητες και τις υδραυλικές επιλογές. Σε αυτό το πρόβλημα υπάρχει μόνο μία δεξαμενή που χρησιμοποιείται για την παροχή νερού στην κοινότητα, αλλά το ύψος και τα μήκη σωλήνων είναι σχεδόν το ίδιο για όλους τους σωλήνες. Όλες οι απαιτήσεις στο πρόβλημα είναι σε κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο.

Ως εκ τούτου, επιλέγουμε ως default flow units CFS. Επίσης, επιλέγουμε την επιλογή Hazen-Williams (HW) ως προεπιλεγμένο τύπο headloss. Θα μπορούσαμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε τις επιλογές Darcy-Weisbach και Chezy-Manning, αλλά σε αυτό το παράδειγμα, ο συντελεστής τραχύτητας ήταν συγκεκριμένος για τη χρήση του τύπου HW. Επιλέγουμε το πλαίσιο "Αποθήκευση ως προεπιλογές για όλα τα νέα έργα", για να εφαρμόσουμε αυτήν την αλλαγή σε όλα τα νέα έργα.



Εικόνα 14: Προεπιλεγμένες τιμές - ιδιότητες και υδραυλικό σύστημα

3.1.2 Ρύθμιση προτιμήσεων

Εάν εργαζόμαστε σε κοινό δίκτυο σε υπολογιστικό εργαστήριο με περιορισμένη πρόσβαση στον τοπικό σκληρό δίσκο είναι απαραίτητο να ρυθμίσουμε τις ακόλουθες προτιμήσεις για να αποθηκεύσουμε όλα τα αρχεία στον προσωρινό κατάλογο της μονάδας C (Εικόνα 15). Εάν εργαζόμαστε στον δικό σας υπολογιστή, μπορούμε να ορίσουμε τον προσωρινό κατάλογο με τις προτιμήσεις μας.

Για να ορίσουμε προεπιλεγμένες προτιμήσεις για ένα έργο:

- 1 Επιλέγουμε **File | Preferences**.
- 2 Θα εμφανιστεί το παράθυρο διαλόγου **Preferences**. Πατάμε **Select** κάτω από τον προσωρινό κατάλογο.
- 3 Αναζητάμε τον κατάλογο c:\ temp και πατάμε OK για να αποδεχτούμε τον προεπιλεγμένο κατάλογο.

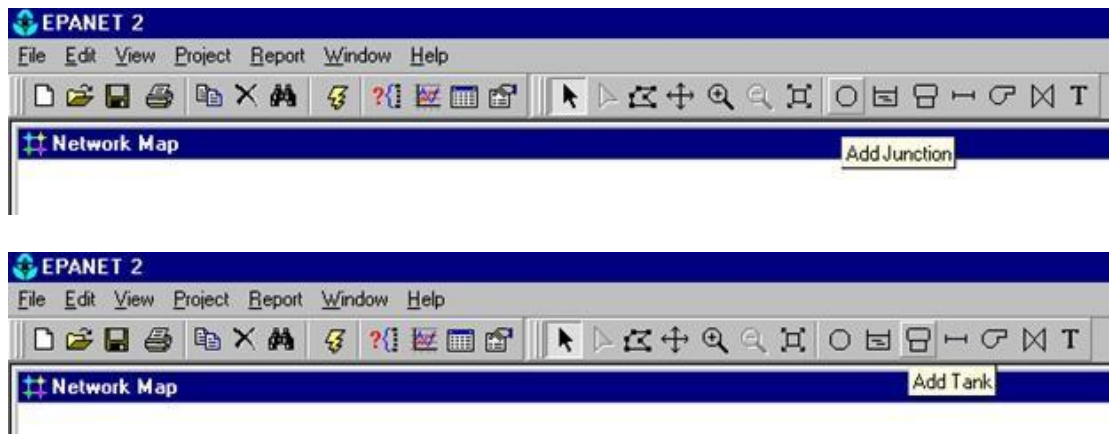


Εικόνα 15: Προτιμήσεις

3.2 Δημιουργία του σεναρίου του έργου: Εργασία με αντικείμενα

3.2.1 Προσθήκη αντικειμένου: Κόμβου (Junction)

Για να προσθέσετε μια σύνδεση χρησιμοποιώντας το Maptoolbar επιλέγουμε τον τύπο διασταύρωσης (κόμβος, δεξαμενή ή δεξαμενή αποθήκευση) για να προσθέσουμε από το Map toolbar. Μετακινούμε το ποντίκι στην επιθυμητή θέση στο χάρτη και κάνουμε κλικ.

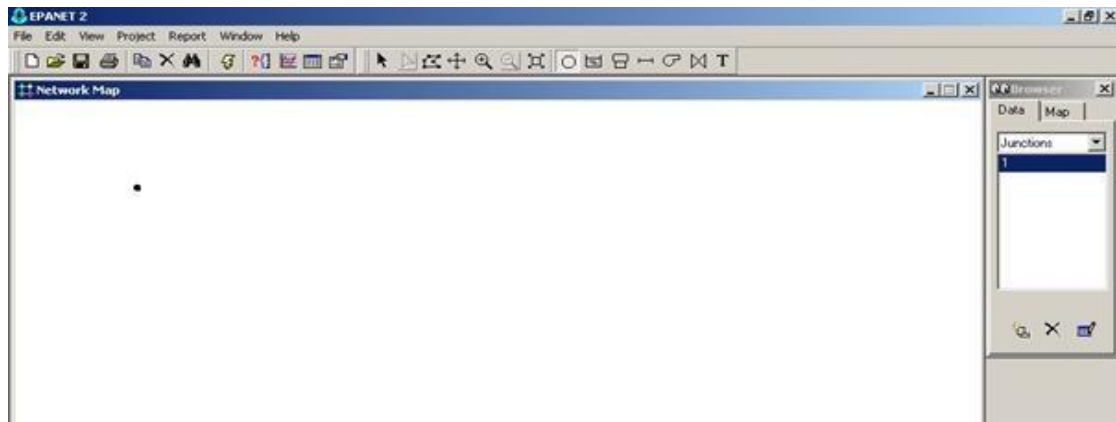


Εικόνα 16: Προσθήκη κόμβου ή δεξαμενή

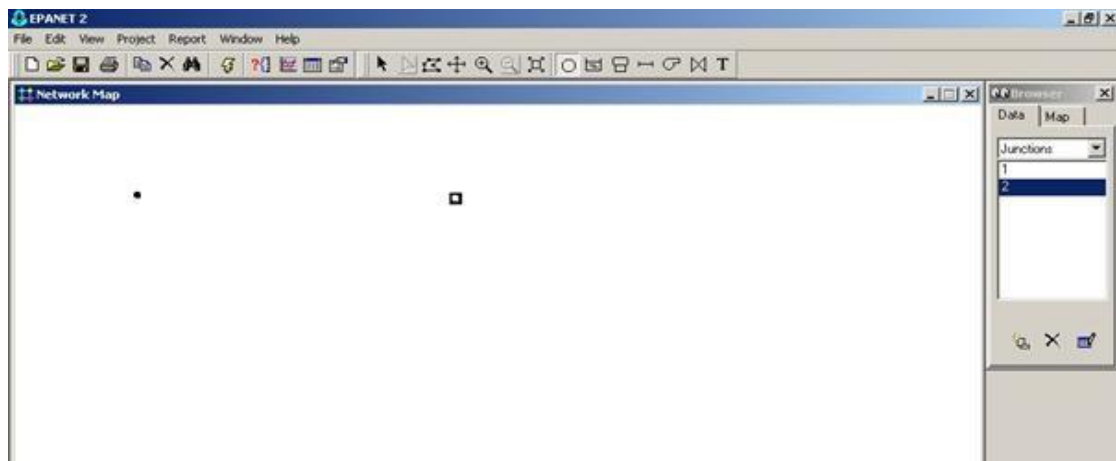
Πάντοτε να ένα έργο θα πρέπει να ξεκινάει τοποθετώντας τουλάχιστον δύο κόμβους στο χάρτη (πρέπει να υπάρχει κάτι στο οποίο να μπορεί να συνδεθεί ο σωλήνας και στα δύο άκρα). Μπορούν να προστεθούν όλες οι διασταυρώσεις αυτή τη στιγμή ή να προσθέσουμε επιπλέον κόμβους αργότερα.

Για να προσθέσουμε μια διασταύρωση στον χάρτη: στη γραμμή εργαλείων, επιλέγουμε το εργαλείο "addjunctiontool" και, στη συνέχεια, κάνουμε αριστερό κλικ με το ποντίκι στο χάρτη στη θέση όπου είναι επιθυμητή

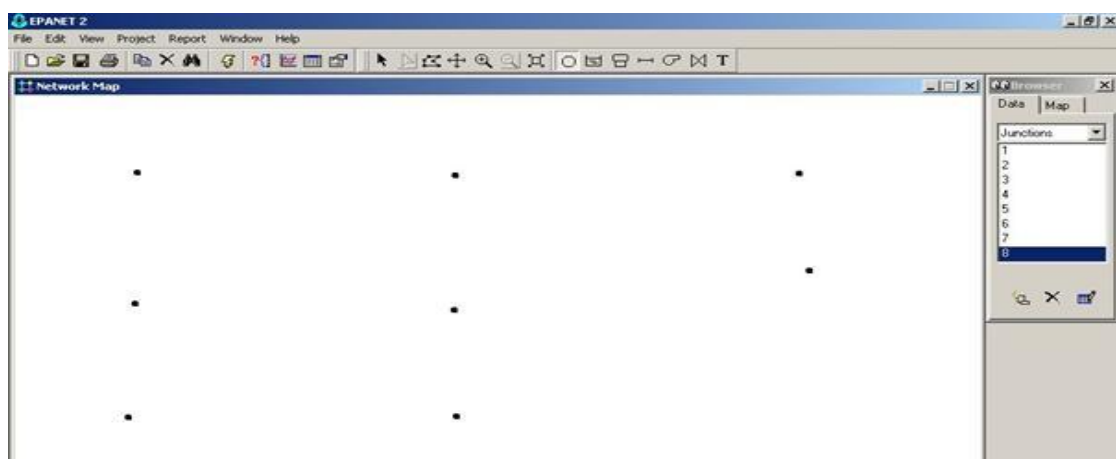
η διασταύρωση. Επαναλαμβάνουμε για όλες τις διασταυρώσεις. Ελέγχουμε το πρόβλημα. Οι κόμβοι αριθμούνται από πάνω προς τα κάτω, από αριστερά προς τα δεξιά. Χρησιμοποιούμε αυτή την σειρά για να δημιουργήσουμε τις διασταυρώσεις .



Εικόνα 17: Προσθήκη κόμβου



-



Εικόνα 18: Προσθήκη όλων των κόμβων ταυτόχρονα

Όλα τα έργα πρέπει να έχουν τουλάχιστον μία δεξαμενή ή δεξαμενή αποθήκευσης για να τρέξουν. Πρέπει να δημιουργήσουμε πίεση στο σύστημα για να μετακινήσουμε το νερό στο δίκτυο. Σε αυτό το παράδειγμα, θα δημιουργήσουμε πρώτα μια δεξαμενή νερού.

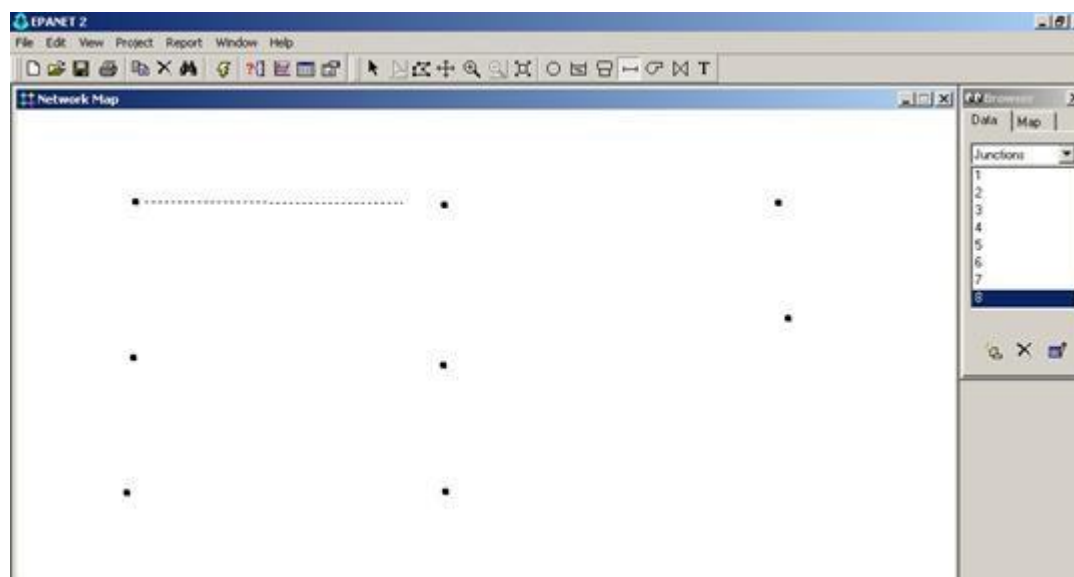
3.2.2 Προσθήκη αντικειμένου: Σύνδεσμοι (Links)

Για να προσθέσετε μια σύνδεση χρησιμοποιώντας το MapToolbar, επιλέγουμε τον τύπο συνδέσμου που θέλουμε να προσθέσουμε (σωλήνας, αντλία ή βαλβίδα) από το MapToolbar.



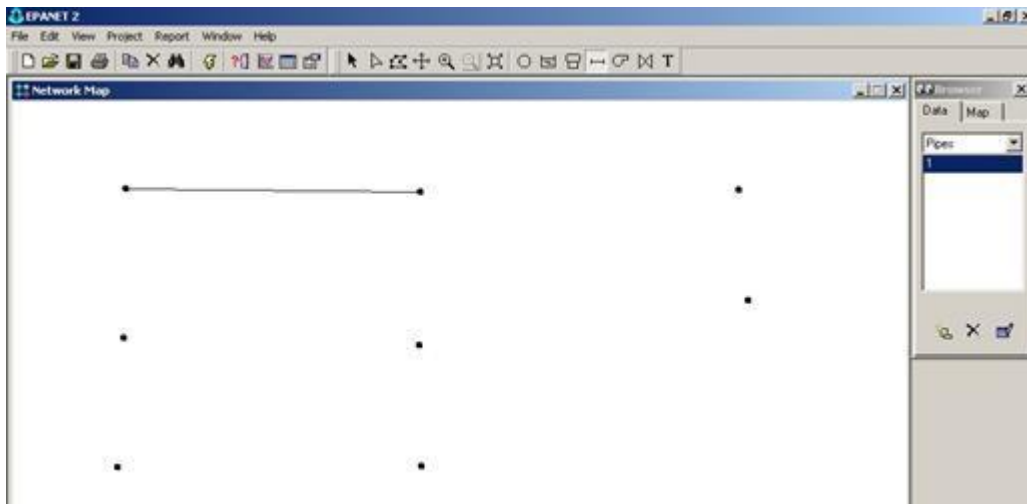
Εικόνα 19: Προσθήκη σωλήνα, επιλογή κουμπιών

Κάνουμε κλικ στο ποντίκι πάνω από τον κόμβο έναρξης του συνδέσμου. Ο κόμβος εκκίνησης θα αναβοσβήνει και στην οθόνη θα εμφανιστεί ένα μολύβι. Μετακινούμε το μολύβι ανάμεσα στους κόμβους έναρξης και τερματισμού.



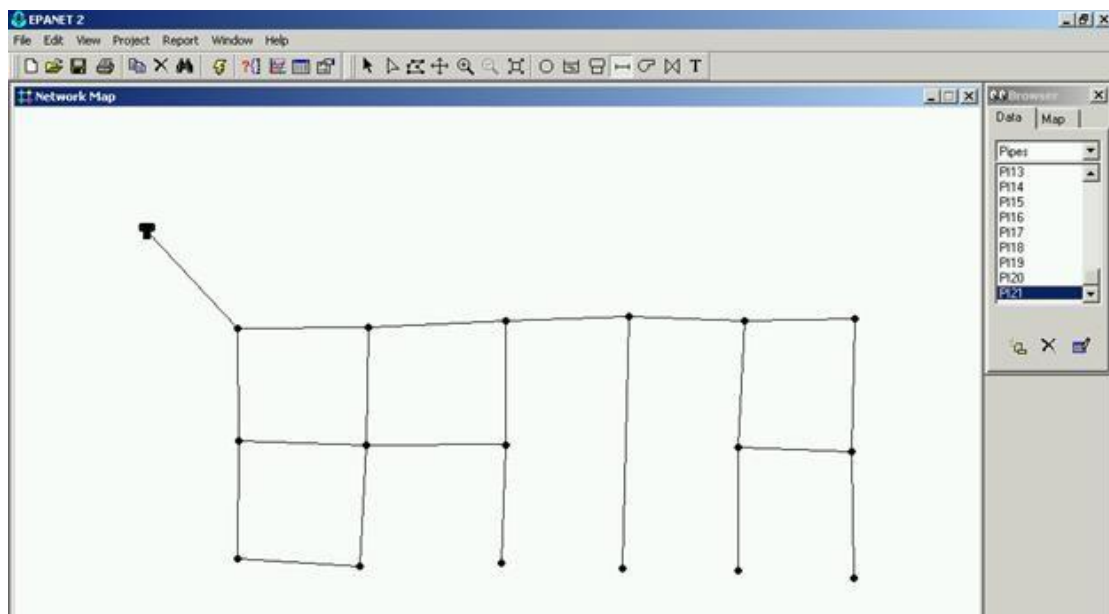
Εικόνα 20: Προσθήκη ενός σωλήνα που τελειώνει στον κόμβο

Κάνουμε κλικ πάλι με το ποντίκι πάνω από τον τελικό κόμβο του συνδέσμου.



Εικόνα 21: Προσθήκη σωλήνα

Η σειρά των σωλήνων αναφέρεται στο πρόβλημα. Χρησιμοποιούμε την ίδια σειρά όπως στην εικόνα 20. Το τελικό δίκτυο είναι που φαίνεται στο εικόνα 22.



Εικόνα 22: Τελικό δίκτυο

3.2.3 Καθορισμός του σημείου εκκίνησης για το νερό: Προσθήκη δεξαμενής

Χρησιμοποιώντας τη γραμμή εργαλείων χάρτη, επιλέγουμε το κουμπί "Addingatank". Τοποθετούμε τη δεξαμενή στον χάρτη στην επιθυμητή θέση (πάνω αριστερή γωνία για αυτό το παράδειγμα).

3.2.4 Επιλογή αντικειμένου (Πώς να επιλέξετε αντικείμενα από τον χάρτη για να προσθέσετε πληροφορίες)

Για να επιλέξουμε ένα αντικείμενο στο χάρτη επιλέγουμε **Edit | Select** ή κάνουμε κλικ στο **SelectObject** (βέλος) στο MapToolbar και στη συνέχεια κάνουμε κλικ με το ποντίκι πάνω από το αντικείμενο που θέλουμε στο χάρτη.

Για να επιλέξουμε ένα αντικείμενο χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα περιήγησης επιλέγουμε τον τύπο του αντικειμένου από το πλαίσιο της λίστας των αντικειμένων του DatabaseBrowser και στη συνέχεια επιλέγουμε το αντικείμενο που θέλουμε από το πλαίσιο λίστας αντικειμένων.

3.2.5 Επεξεργασία αντικειμένου (Προσθήκη πληροφοριών σε συνδέσμους και συνδέσεις)

Για να επεξεργαστούμε ένα αντικείμενο που εμφανίζεται στο χάρτη επιλέγουμε το αντικείμενο στο χάρτη και κάνουμε κλικ στο κουμπί επεξεργασία στο DatabaseBrowser (ή απλά κάνουμε διπλό - κλικ στο αντικείμενο στο χάρτη). Θα εμφανιστεί ο κατάλληλος πίνακας (που φαίνεται παρακάτω). Για τους κόμβους, οι ελάχιστες απαιτούμενες πληροφορίες είναι η ζήτηση και η ανύψωση.

Για τους σωλήνες, οι ελάχιστες απαιτούμενες πληροφορίες είναι οι εξής: αρχικοί και τελικοί κόμβοι, μήκη, διάμετροι και τραχύτητα. Η δεξαμενή πρέπει να έχει ανύψωση, διάμετρο, ελάχιστο, μέγιστο και αρχική στάθμη νερού. Τα στοιχεία με κίτρινο δεν έχουν εισαχθεί καθώς υπολογίζονται από το EPANET κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Γενικότερα καλό είναι να μην εισάγουμε όλα τα δεδομένα αυτήν τη στιγμή, μερικές μεταγενέστερες συμβουλές θα βοηθήσουν στην αντιγραφή και επικόλληση ιδιοτήτων.

The image shows two side-by-side windows from a software application. The left window is titled 'Junction JU1' and the right window is titled 'Pipe P11'. Both windows have a table with 'Property' and 'Value' columns. The 'Junction JU1' window has a text input field for 'Elevation' with the value '1'. The 'Pipe P11' window has a text input field for 'Length' with the value '50'. Both windows have several rows of properties with values like '#N/A' or 'Open'.

Property	Value
*Junction ID	JU1
X-Coordinate	1271.32
Y-Coordinate	6837.21
Description	
Tag	
*Elevation	1
Base Demand	-3.85
Demand Pattern	
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Actual Demand	#N/A
Total Head	#N/A
Pressure	#N/A
Quality	#N/A

Property	Value
*Pipe ID	P11
*Start Node	TA1
*End Node	JU1
Description	
Tag	
*Length	50
*Diameter	12
*Roughness	100
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	#N/A
Velocity	#N/A
Unit Headloss	#N/A
Friction Factor	#N/A
Reaction Rate	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

Εικόνα 23: Προσθέτοντας τις ιδιότητες των συνδέσεων και των σωλήνων

Παρατηρούμε ότι στη διασταύρωση 1, υπάρχει τοπική ζήτηση 0,15 cfs, αλλά η δεξαμενή τροφοδοτεί 4 cfs. Ο κόμβος 1 είναι όπου το νερό εισέρχεται στο σύστημα. Επομένως, η συνολική ζήτηση είναι αρνητική και έχει τιμή $0,15 - 4 = -3,85$ cfs. Ο πυθμένας της δεξαμενής βρίσκεται στα 400 ft και έχει αρχικό επίπεδο 10 ft πάνω από το κάτω μέρος της δεξαμενής. Τα δεδομένα που αντιστοιχούν στη δεξαμενή φαίνονται στο σχήμα 24.

Property	Value
*Tank ID	TA1
X-Coordinate	-108.53
Y-Coordinate	8279.07
Description	
Tag	
*Elevation	400
*Initial Level	10
*Minimum Level	0
*Maximum Level	20
*Diameter	50
Minimum Volume	
Volume Curve	
Mixing Model	Mixed
Mixing Fraction	
Reaction Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Net Inflow	#N/A
Elevation	#N/A
Pressure	#N/A
Quality	#N/A

Εικόνα 24: Ιδιότητες δεξαμενής

3.2.6 Επεξεργασία αντικείμενου που εμφανίζεται στο πρόγραμμα περιήγησης

Επιλέγουμε το αντικείμενο από το DatabaseBrowser και στη συνέχεια κάνουμε κλικ στο κουμπί Επεξεργασία (ή απλά κάνουμε διπλό - κλικ στο στοιχείο στο πρόγραμμα περιήγησης).



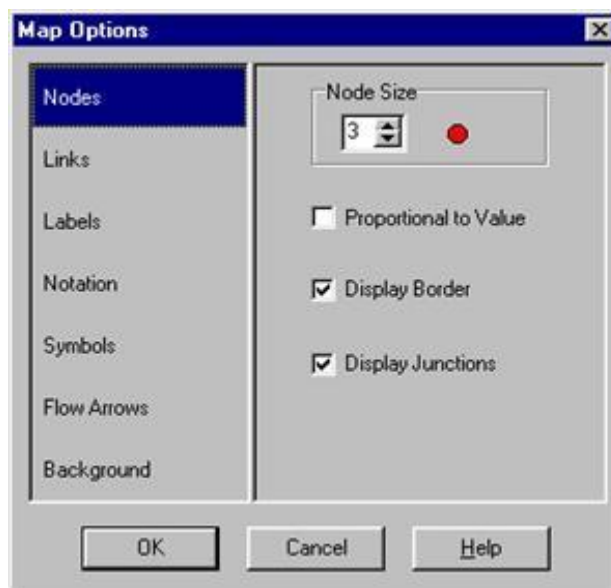
Εικόνα 25: Πρόγραμμα περιήγησης

3.2.7 Προσθήκη ετικέτας στο χάρτη

Οι ετικέτες μπορούν να βοηθήσουν να εντοπιστούν κοινοί σωλήνες, με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

1. Επιλέγουμε το **Label** στο κουμπί Maptoolbar.
2. Κάνουμε κλικ με το ποντίκι στο χάρτη όπου πρέπει να εμφανίζεται η ετικέτα.
3. Καταχωρούμε το κείμενο για την περιγραφή της ετικέτας.
4. Πατάμε **Enter**

Επίσης μπορούμε να αποκτήσουμε πρόσβαση στις δυνατότητες του χάρτη κάνοντας κλικ στο χάρτη και στη συνέχεια δεξί κλικ με το ποντίκι. Όταν εμφανιστεί το αναδυόμενο μενού, επιλέγουμε **Options**. Επεξεργαζόμαστε τα κατάλληλα χαρακτηριστικά όπως φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 26.1: Επιλογές χάρτη, κόμβοι



Εικόνα 26.2: Επιλογές χάρτη, σύνδεσμοι



Εικόνα 26.3: Επιλογές χάρτη, χρήση γραφικών συμβόλων



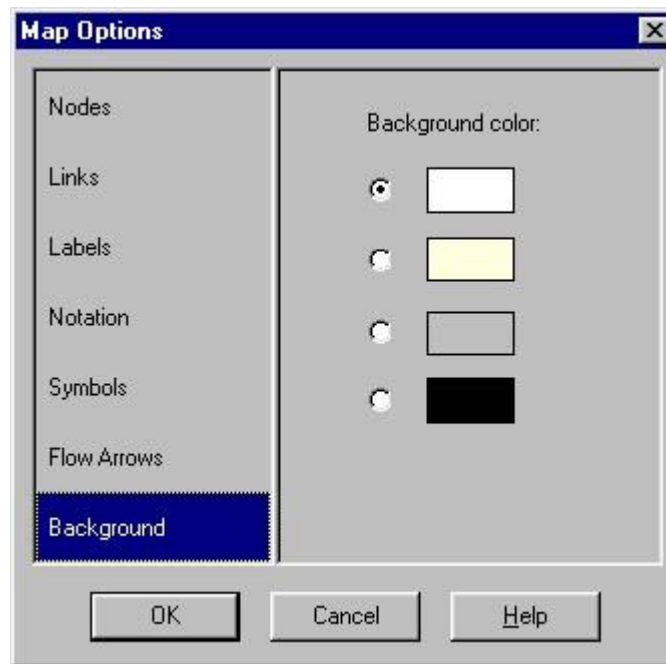
Εικόνα 26.4: Επιλογές χάρτη, επικέτες



Εικόνα 26.5: Επιλογές χάρτη, σύμβολα



Εικόνα 26.6: Επιλογές χάρτη, βέλη ροής



Εικόνα 26.7: Επιλογές χάρτη, φόντο

Στη σημείωση επιλογής χάρτη, επιλέγουμε το πλαίσιο που αντιστοιχεί στην εμφάνιση του Link ID's.

3.2.8 Αντιγραφή και επικόλληση ιδιοτήτων αντικειμένου

Οι ιδιότητες ενός αντικειμένου που εμφανίζεται στο χάρτη δικτύου μπορούν να αντιγραφούν και να επικολληθούν σε άλλο αντικείμενο από την ίδια κατηγορία.

Για να αντιγράψουμε τις ιδιότητες ενός αντικειμένου στο εσωτερικό πρόχειρο του EPANET κάνουμε δεξί κλικ στο αντικείμενο στο χάρτη και επιλέγουμε αντιγραφή από το popur μενού που εμφανίζεται.

Για να επικολλήσουμε τις ιδιότητες που αντιγράψαμε σε ένα αντικείμενο κάνουμε δεξί κλικ στο αντικείμενο στο χάρτη και επιλέγουμε επικόλληση από το popur μενού που εμφανίζεται.

3.2.9 Διαγραφή αντικειμένου

Για να διαγράψουμε ένα αντικείμενο, επιλέγουμε το αντικείμενο στο χάρτη ή από το DatabaseBrowser και το διαγράφουμε είτε με:

- κλικ στο κουμπί Delete στο GeneralToolbar.
- κλικ στο κουμπί Del στο DatabaseBrowser.
- πατώντας το Del key.

Επίσης μπορούμε να ζητήσουμε να επιβεβαιώνονται όλες οι διαγραφές πριν τεθούν σε ισχύ.

3.2.10 Μετακίνηση αντικειμένου

Για να μετακινήσουμε έναν κόμβο ή μια ετικέτα σε μια άλλη θέση στο χάρτη επιλέγουμε τον κόμβο ή την ετικέτα, με το αριστερό πλήκτρο του ποντικιού που κρατείται κάτω από το αντικείμενο το μεταφέρουμε στη νέα του θέση και στη συνέχεια αφήνουμε το αριστερό κουμπί.

Εναλλακτικά, νέες συντεταγμένες X και Y για το αντικείμενο μπορούν να πληκτρολογηθούν με το χέρι στο PropertyEditor. Κάθε φορά που ο κόμβος μετακινείται, όλες οι συνδέσεις που συνδέονται με αυτόν μετακινούνται επίσης.

3.2.11 Επιλογή ομάδας αντικειμένων

Για να επιλέξουμε μια ομάδα αντικειμένων που βρίσκονται μέσα σε μια ακανόνιστη περιοχή του χάρτη δικτύου ακολουθούμε τα εξής βήματα:

1. Επιλέγουμε **Edit | GroupSelect** ή κάνουμε κλικ στο **SelectGroup** στο κουμπί MapToolbar.
2. Σχεδιάζουμε μια γραμμή πολυγώνου περιφραξης γύρω από την περιοχή ενδιαφέροντος στο χάρτη κάνοντας κλικ στο αριστερό πλήκτρο του ποντικιού σε κάθε διαδοχική κορυφή του πολυγώνου.
3. Κλείνουμε το πολύγωνο κάνοντας κλικ στο δεξί κουμπί ή πατώντας το πλήκτρο Enter. Ακυρώνουμε την επιλογή πατώντας το πλήκτρο Escape.

Για να επιλέξουμε όλα τα αντικείμενα που εμφανίζονται στον χάρτη επιλέγουμε **Edit | Select all**.

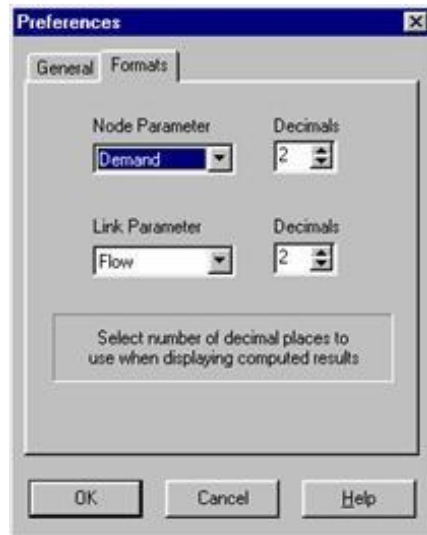
3.2.12 Επεξεργασία ομάδας αντικειμένων

Για να επεξεργαστούμε μια ιδιότητα για μια ομάδα αντικειμένων:

1. Σχεδιάζουμε μια περιοχή πολύγωνων γύρω από την ομάδα αντικειμένων που πρόκειται να επεξεργαστείτε εάν δεν υπάρχει ήδη (Selecting a Group of Objects) ή επιλέγουμε **Edit | GroupEdit** για να επιλέξουμε όλο το αντικείμενο που βρίσκεται επί του παρόντος στο χάρτη.
2. Επιλέγουμε **Edit | Group Edit**.

3.3 Τροποποίηση υπομνήματος και των προτιμήσεων ρύθμισης

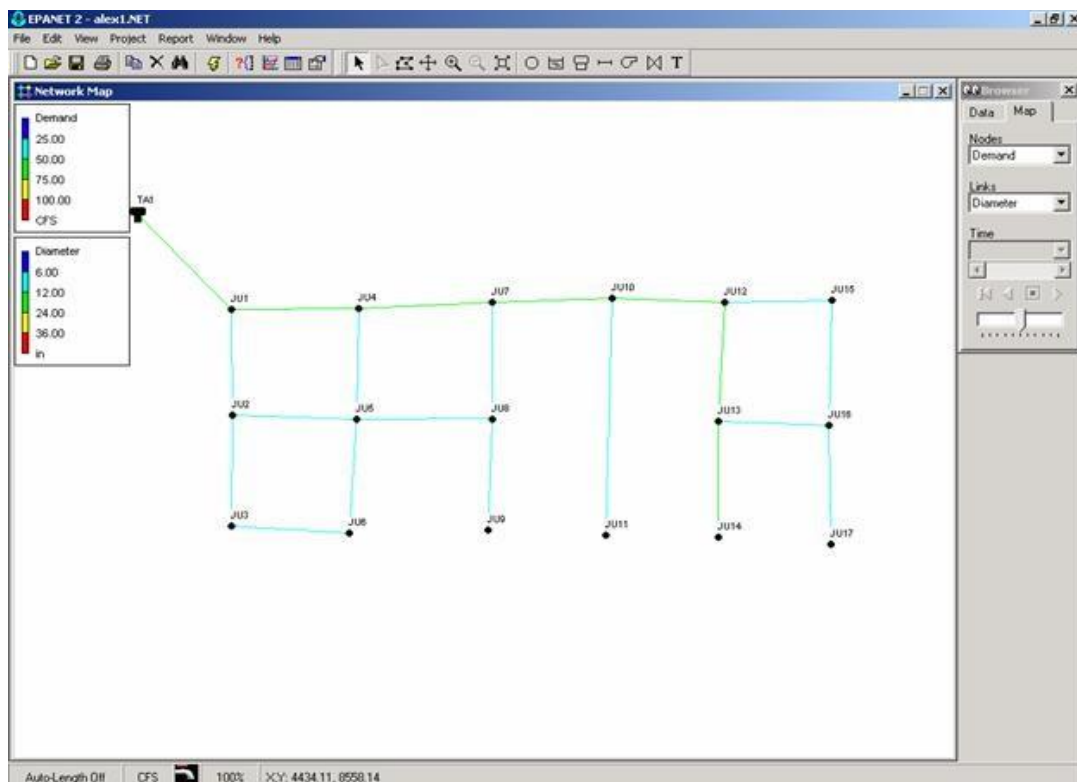
Το μενού μορφοποίησης βρίσκεται κάτω από **File | Preferences** όπου μπορεί να επιλεγεί ο αριθμός των δεκαδικών σημείων που θα χρησιμοποιηθούν.



Εικόνα 27: Προτιμήσεις μορφοποίησης

3.4 Εμφάνιση υπομνήματος

Στο MapBrowser , επιλέγουμε τι πρέπει να εμφανίζεται και το κατάλληλο υπόμνημα θα εμφανίζεται στο πλάι του χάρτη δικτύου. Το υπόμνημα μπορεί να επεξεργαστεί κάνοντας δεξί κλικ στο υπόμνημα. Το EPANET έχει τη δυνατότητα να επιτρέπει στον χρήστη να επιλέγει τα διαστήματα των υπομνημάτων.



Εικόνα 28: Διάγραμμα με υπομνήματα

3.5 Ανάλυση ενός δικτύου

Αφού περιγραφεί κατάλληλα το δίκτυο, μπορεί να αναλυθεί η υδραυλική και η ποιοτική συμπεριφορά του. Αυτή η ενότητα περιγράφει τον τρόπο καθορισμού των επιλογών που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, τον τρόπο εκκίνησης της ανάλυσης και τον τρόπο αντιμετώπισης προβλημάτων που ενδέχεται να έχουν παρουσιαστεί με την ανάλυση.

3.5.1 Ρύθμιση επιλογών ανάλυσης

Ο ορισμός των επιλογών ανάλυσης γίνεται ως εξής:

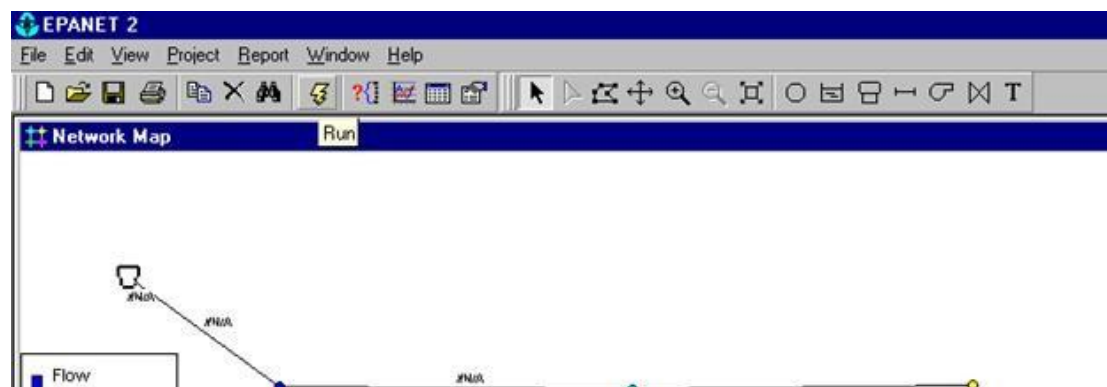
1. Επιλέγουμε Options από το Object list του Database Browser
2. Επιλέγουμε Hydraulics, Quality, Reactions, or Energy από τη λίστα στοιχείων.
3. Εάν το PropertyEditor δεν είναι ήδη ορατό, κάνουμε κλικ στο πλήκτρο **Edit**.
4. Επεξεργαζόμαστε τις επιλογές στο PropertyEditor.

3.5.2 Εκτέλεση ανάλυσης

Η εκτέλεση μιας ανάλυσης μιας υδραυλικής / ποιότητας νερού γίνεται ως εξής:

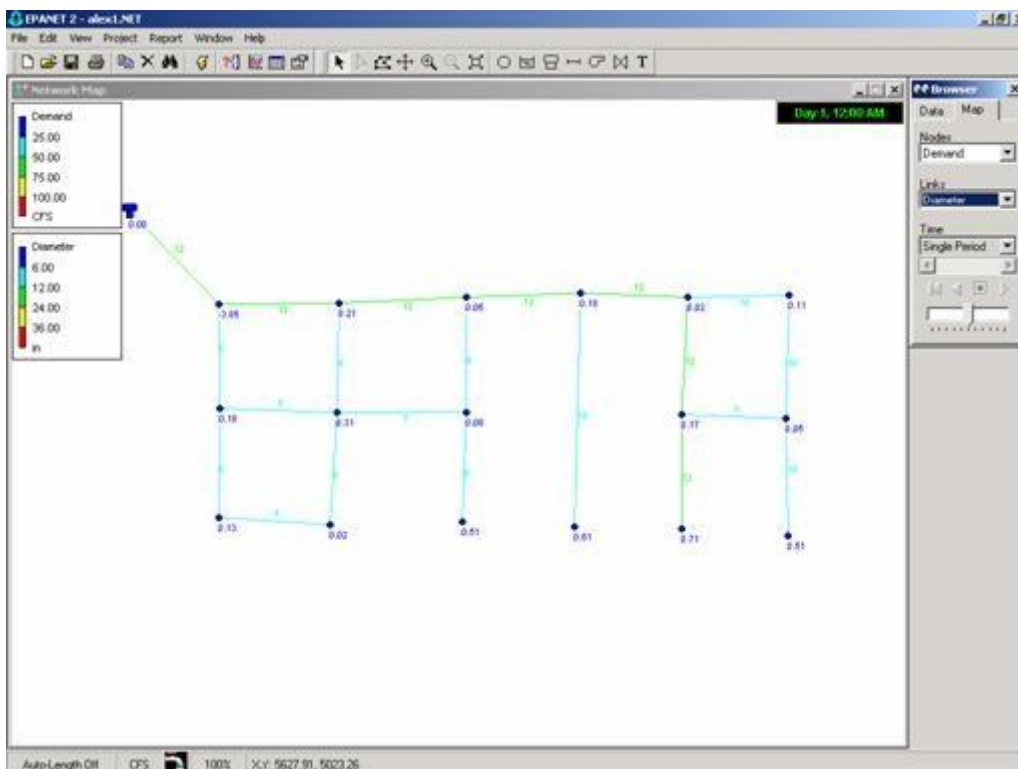
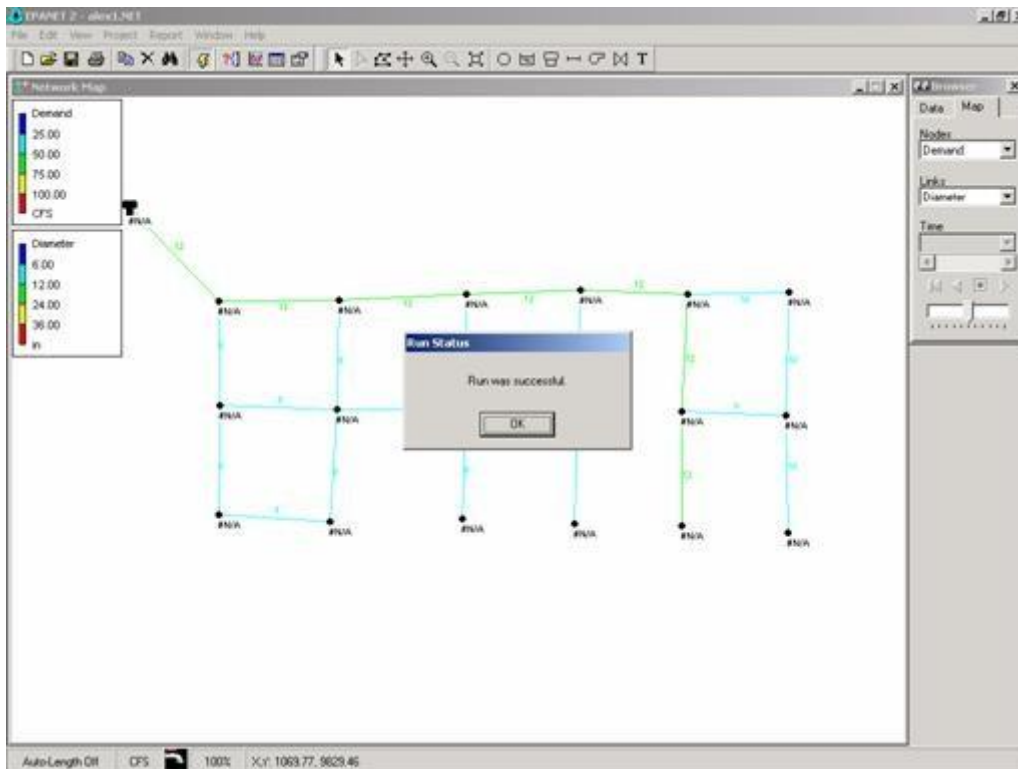
1. Επιλέγουμε **Project | RunAnalysis** ή κάνουμε κλικ στο κουμπί **Run** (κεραυνός) στο GeneralToolbar.
2. Η πρόοδος της ανάλυσης θα εμφανιστεί σε **RunStatus** παράθυρο.
3. Κάνουμε κλικ στο πλήκτρο OK όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση.

Εάν η ανάλυση εκτελείται με επιτυχία, το εικονίδιο του τέλους εκτέλεσης θα εμφανιστεί στην ενότητα RunStatus (εκτέλεση κατάστασης) στο StatusBar στο κάτω μέρος του χώρου εργασίας του EPANET. Οποιαδήποτε σφάλματα ή προειδοποιητικά μηνύματα θα εμφανιστούν στο StatusReport παράθυρο.



Εικόνα 29: Κουμπί εκτέλεσης

Εάν η πορεία ήταν επιτυχής, τότε οι τιμές των σωλήνων θα αλλάξουν από "# N / A" στις υπολογιζόμενες τιμές, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 30: Επιτυχής εκτέλεση

3.6 Προβολή των αποτελεσμάτων σε πίνακες

Στη γραμμή εργαλείων, επιλέγουμε **Table**. Στη συνέχεια, επιλέγουμε τις πληροφορίες που θέλουμε. Οι στήλες προς εκτύπωση μπορούν να επιλεγούν χρησιμοποιώντας τη μεσαία καρτέλα στο ενεργό παράθυρο. Τα αποτελέσματα των διασταυρώσεων και των αγωγών παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Network Table - Nodes				
Node ID	Demand CFS	Head ft	Pressure psi	Quality
Junc JU1	-3.85	410.00	177.65	0.00
Junc JU2	0.18	409.69	177.52	0.00
Junc JU3	0.13	409.65	177.50	0.00
Junc JU4	0.21	409.67	177.51	0.00
Junc JU5	0.31	409.61	177.49	0.00
Junc JU6	0.02	409.63	177.49	0.00
Junc JU7	0.05	409.44	177.41	0.00
Junc JU8	0.08	409.45	177.41	0.00
Junc JU9	0.51	409.35	177.37	0.00
Junc JU10	0.18	409.22	177.31	0.00
Junc JU11	0.61	409.12	177.27	0.00
Junc JU12	0.02	409.11	177.27	0.00
Junc JU13	0.17	409.06	177.25	0.00
Junc JU14	0.71	409.03	177.23	0.00
Junc JU15	0.11	409.07	177.25	0.00
Junc JU16	0.05	409.05	177.24	0.00
Junc JU17	0.51	409.02	177.23	0.00
Tank TA1	0.00	410.00	4.33	0.00

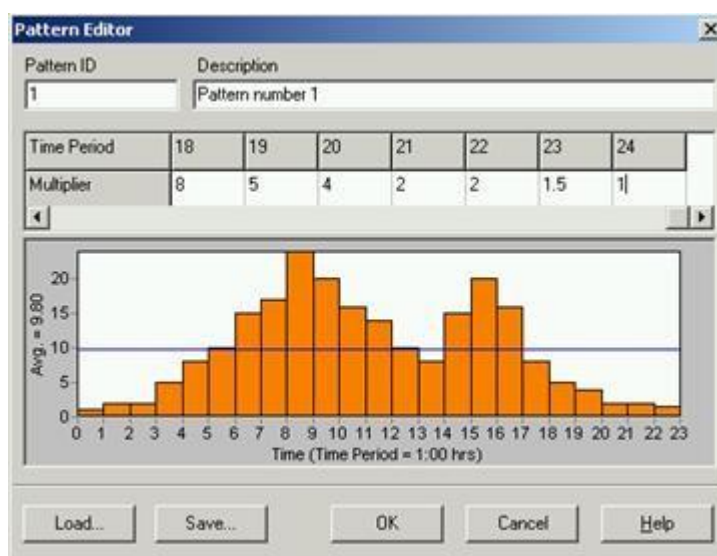
Network Table - Links				
Link ID	Flow CFS	Velocity fps	Unit Headloss ft/Kft	Status
Pipe P11	0.00	0.00	0.00	Open
Pipe P12	0.96	2.74	6.21	Open
Pipe P13	0.33	0.95	0.87	Open
Pipe P14	2.89	3.68	6.68	Open
Pipe P15	0.45	1.28	1.51	Open
Pipe P16	0.20	0.58	0.35	Open
Pipe P17	0.36	1.04	1.04	Open
Pipe P18	-0.18	0.52	0.29	Open
Pipe P19	2.32	2.95	4.43	Open
Pipe P110	0.68	1.95	3.31	Open
Pipe P111	-0.09	0.26	0.08	Open
Pipe P112	0.51	1.46	1.94	Open
Pipe P113	2.36	3.00	4.58	Open
Pipe P114	0.61	1.12	0.91	Open
Pipe P115	1.57	2.00	2.15	Open
Pipe P116	1.02	1.30	0.97	Open
Pipe P117	0.71	0.90	0.50	Open
Pipe P118	0.53	0.97	0.70	Open
Pipe P119	0.14	0.40	0.18	Open
Pipe P120	0.42	0.77	0.45	Open
Pipe P121	0.51	0.94	0.65	Open

Εικόνα 31: Πίνακας αποτελεσμάτων

3.7 Δημιουργία νέου πρότυπου ζήτησης

Για να δημιουργήσουμε ένα νέο μοτίβο ζήτησης να κάνουμε τα εξής:

1. Κλικ στο κουμπί **Add** στο **PatternsEditor** στο **DatabaseBrowser**.
2. Στο παράθυρο επεξεργασίας μοτίβου, συμπληρώνουμε την περιγραφή και τους πολλαπλασιαστές για κάθε ώρα της ημέρας.
3. Αποθηκεύουμε το μοτίβο.
4. Κάνουμε κλικ στο OK για να αποδεχθούμε το μοτίβο.



Εικόνα 32: Πρότυπο μοτίβο

3.8 Δημιουργία ανάλυσης χρονοσειρών

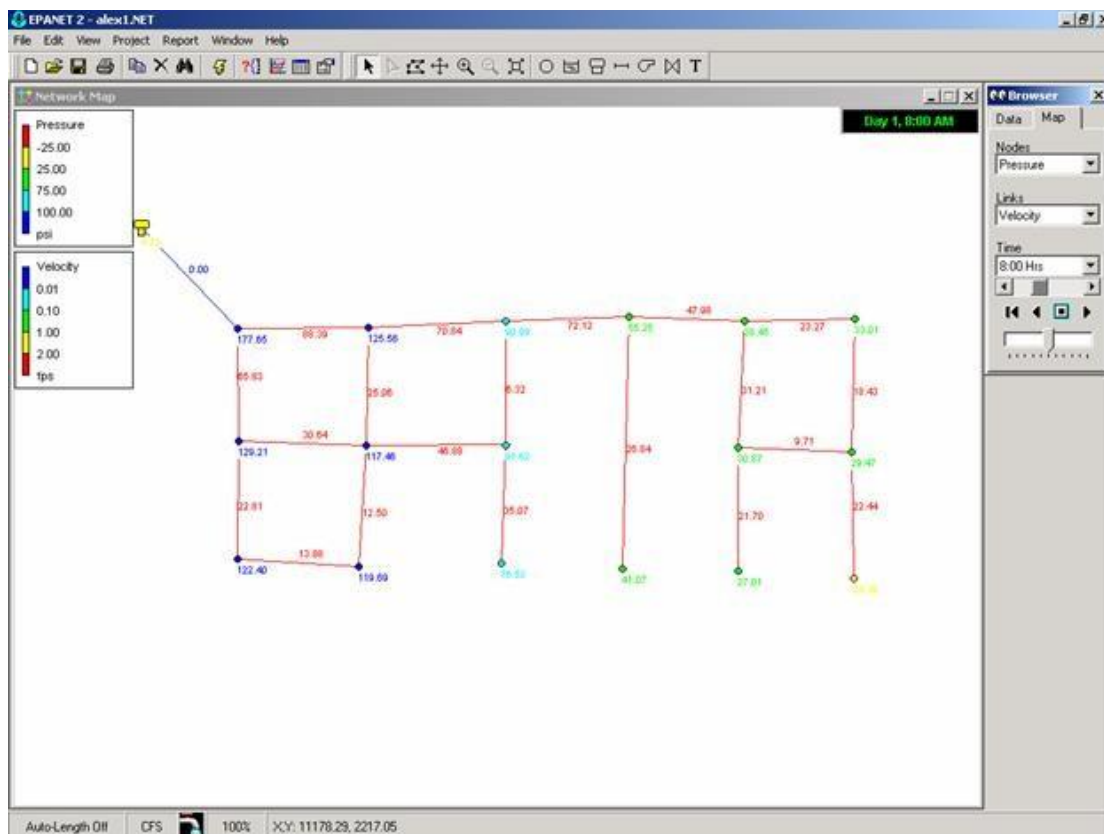
1. Επιλέγουμε **Options** από το **Objectlist** στο **Database Browser**.
2. Επιλέγουμε **Times** στη λίστα στοιχείων.
3. Εάν το **PropertyEditor** δεν είναι ήδη ορατό, κάνουμε κλικ στο κουμπί **Edit**.
4. Επιλέγουμε συνολική διάρκεια 24 ωρών για την προσομοίωση. Κλείνουμε το παράθυρο επιλογών χρόνου.
5. **Αποθηκεύουμε** το έργο και **Τρέχουμε** το πρόγραμμα ξανά.

Μόλις δημιουργηθούν οι χρονοσειρές, είναι δυνατή η παρακολούθηση της προσομοίωσης για διαφορετικές περιόδους της ημέρας.

3.8.1 Οπτικοποίηση προσομοίωσης χρονικών σειρών

1. Επιλέγουμε **Map** στην καρτέλα **Browser**.

2. Επιλέγουμε την πίεση και την ταχύτητα στους κόμβους και τους σωλήνες, ελέγχουμε ότι οι τιμές εμφανίζονται στο κύριο παράθυρο.
3. Ρυθμίζουμε το μύθο με τα επιθυμητά χρώματα και εύρη.
4. Στο παράθυρο Browser πατάμε το κουμπί προς τα εμπρός για να εκτελεστεί η προσομοίωση.



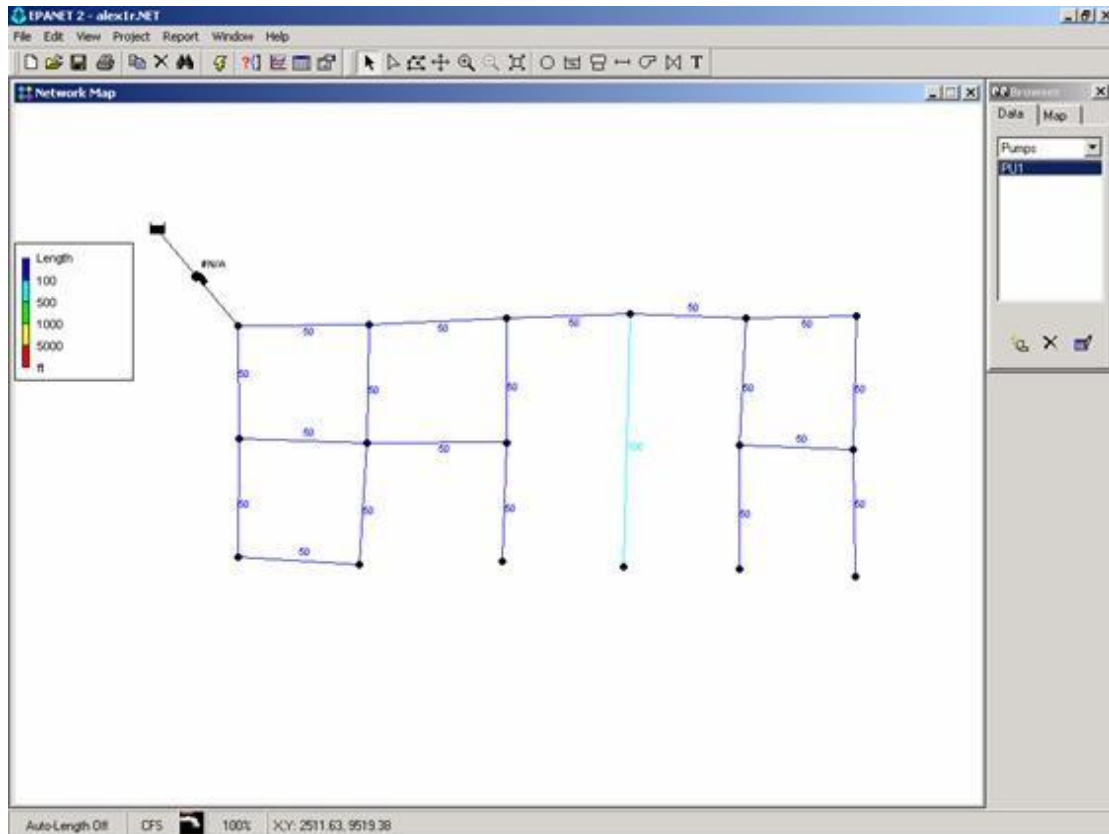
Εικόνα 33: 24ωρη προσομοίωση

3.9 Δεξαμενή

Για να προσθέσουμε δεξαμενή στο EPANET κάνουμε τα εξής:

1. Κάνουμε κλικ στο κουμπί δεξαμενής στη γενική γραμμή εργαλείων.
2. Η δεξαμενή βρίσκεται στην ίδια θέση όπου ήταν η δεξαμενή αποθήκευσης .
3. Κάνουμε κλικ στο κουμπί αντλίας στη γενική γραμμή εργαλείων.
4. Συνδέουμε τη δεξαμενή και τον κόμβο 1 με την αντλία.
5. Επιλέγουμε Curves από την καρτέλα δεδομένων στο πρόγραμμα περιήγησης.
6. Κάνουμε κλικ στο κουμπί Προσθήκη για να προσθέσετε μια νέα καμπύλη.
7. Στο παράθυρο επεξεργασίας καμπύλης, επιλέγουμε τύπο καμπύλης P_u.

8. Εισάγουμε ροή σχεδιασμού αντλίας 4 cfs και κεφαλή 300 ft. Αυτό θα υπολογίσει αυτόματα την εξίσωση της αντλίας ή θα σχεδιάσει τα δικά μας χαρακτηριστικά της αντλίας.
9. Αποθηκεύουμε την καμπύλη. Κάνουμε κλικ στο κουμπί OK.
10. Κάνουμε διπλό κλικ στην αντλία για να εμφανίσουμε τις ιδιότητές της.
11. Πληκτρολογούμε CU1 στην καμπύλη της αντλίας. Εκτελούμε το πρόγραμμα.



Εικόνα 34: Προσθήκη αντλίας και μήκη σωληνώσεων

3.10 Αντλία

Για να προσθέσουμε μια αντλία στο EPANET κάνουμε τα εξής:

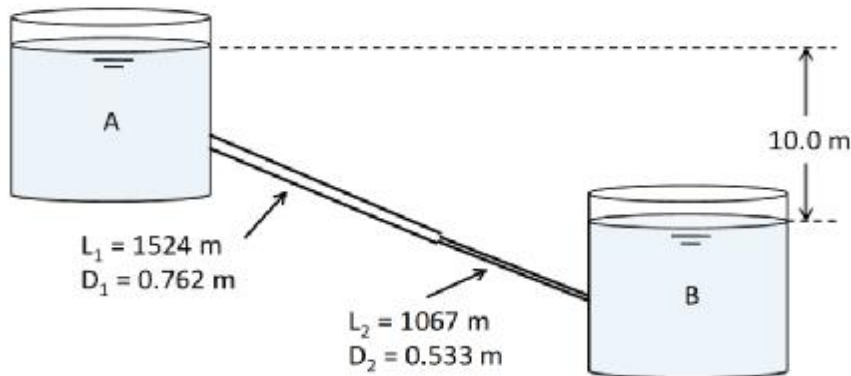
1. Κάνουμε κλικ στο κουμπί αντλίας στη γενική γραμμή εργαλείων.
2. Κάνουμε κλικ στους κόμβους αρχής και τερματισμού όπου βρίσκεται η αντλία.
3. Επιλέγουμε Curves από την καρτέλα δεδομένων στο πρόγραμμα περιήγησης.
4. Κάνουμε κλικ στο κουμπί Add για να προσθέσουμε μια νέα καμπύλη.
5. Στο παράθυρο επεξεργασίας καμπύλης, επιλέγουμε τύπο καμπύλης Pump .
6. Εισάγουμε ροή σχεδιασμού αντλίας 30 cfs και κεφαλή 20 ft. Αυτό θα υπολογίσει αυτόματα την εξίσωση της αντλίας.
7. Αποθηκεύουμε την καμπύλη. Κάνουμε κλικ στο κουμπί OK.
8. Κάνουμε διπλό κλικ στην αντλία για να εμφανίσουμε τις ιδιότητές της.
9. Γράφουμε CU1 in καμπύλη αντλίας. Εκτελούμε το πρόγραμμα.

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση δικτύων με το EPANET

Κατά την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας σκοπός ήταν εκτός από τον σχεδιασμό να γίνει και προσομοίωση δικτύων παροχής νερού με το λογισμικό EPANET. Επιλέχτηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα δικτύων ύδρευσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους ώστε να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του καθενός, να τα επιλύσουμε και να κάνουμε για το καθένα τις τελικές προτάσεις για την βελτιστοποίησή του.

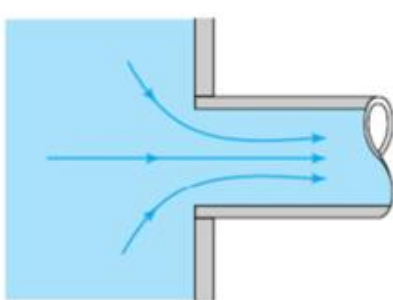
4.1 Περιγραφή του 1^{ου} δικτύου

Το πρώτο δίκτυο είναι ένα δίκτυο ύδρευσης το οποίο αποτελείται από δυο δεξαμενές και έναν κόμβο εκατέρωθεν των δύο δεξαμενών, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.

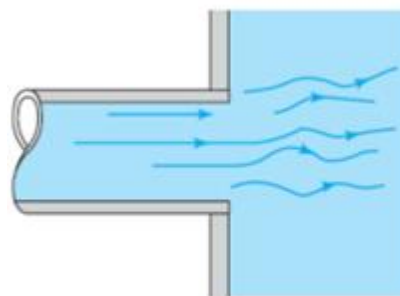


Εικόνα 35: Δίκτυο δυο δεξαμενών με δυο σωλήνες

Συγκεκριμένα αποτελείται από δυο δεξαμενές με έναν κόμβο με υψομετρική διαφορά 10m οι οποίες ενώνονται με δυο σωλήνες δυο διαφορετικών διαμέτρων. Ως δεδομένα μας δίνονται το μήκος των σωληνώσεων, η διάμετρος τους και η υψομετρική διαφορά. Η τραχύτητα είναι 0,26 mm καθώς οι σωλήνες είναι από χυτοσίδηρο (πίνακας 1), ο συντελεστής απωλειών εισόδου K_L είναι 0,5 διότι έχουμε αιχμηρή γωνία εισόδου και ο συντελεστής απωλειών εξόδου K_L είναι 1 διότι έχουμε αιχμηρή γωνία εξόδου. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Darcy-Weisbach το EPANET μπορεί να υπολογίσει την ταχύτητα του νερού στους σωλήνες, τις τοπικές απώλειες, τις απώλειες τριβής και την παροχή.



Αιχμηρή γωνία εισόδου $K_L=0,5$



Αιχμηρή γωνία εξόδου $K_L=1,0$

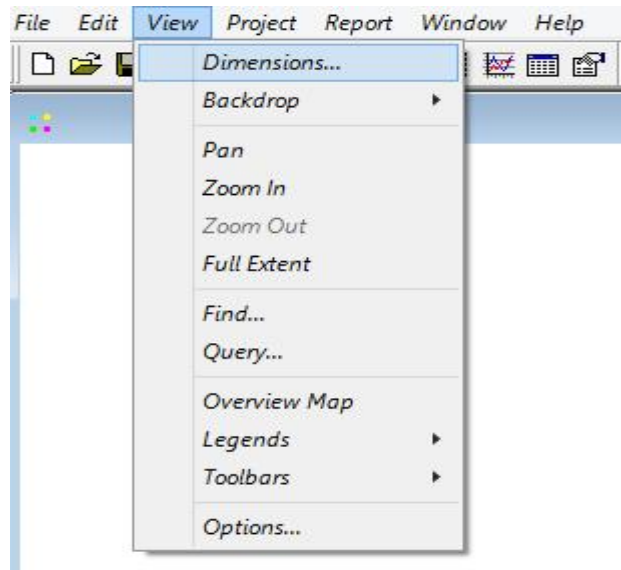
Εικόνα 36: Συνθήκες ροής εισόδου – εξόδου και συντελεστές απωλειών

Σωλήνας	Ισοδύναμη Τραχύτητα, ϵ	
	Feet	Millimeters
Χάλυβας με πριτσίνια	0.003–0.03	0.9–9.0
Μπετόν	0.001–0.01	0.3–3.0
Ξύλο	0.0006–0.003	0.18–0.9
Χυτοσίδηρος	0.00085	0.26
Γαλβανισμένος σίδηρος	0.0005	0.15
Χάλυβας εμπορίου	0.00015	0.045
Εξελασμένη σωλήνωση	0.000005	0.0015
Πλαστικό, γυαλί	0,0 (λείος)	0,0 (λείος)

Πίνακας 1: Ισοδύναμη τραχύτητα για σωλήνες

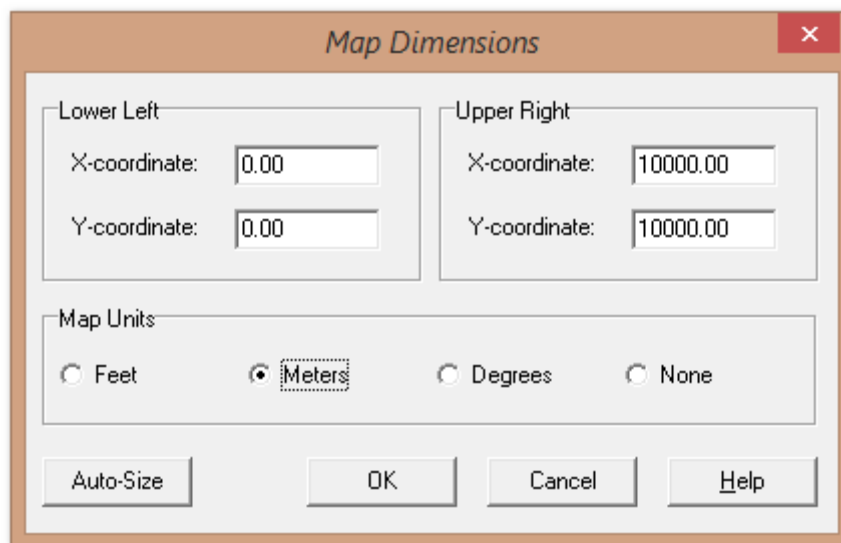
4.1.1 Σχεδιασμός του 1^{ου} δικτύου στο EPANET

Για σχεδιάσουμε ένα δίκτυο στο EPANET αρχικά ανοίγουμε το πρόγραμμα και επιλέγουμε VIEW-DIMENSIONS για να ορίσουμε τις μονάδες μέτρησης με τις οποίες θα εργαστούμε.



Εικόνα 37: Προβολή - διαστάσεις

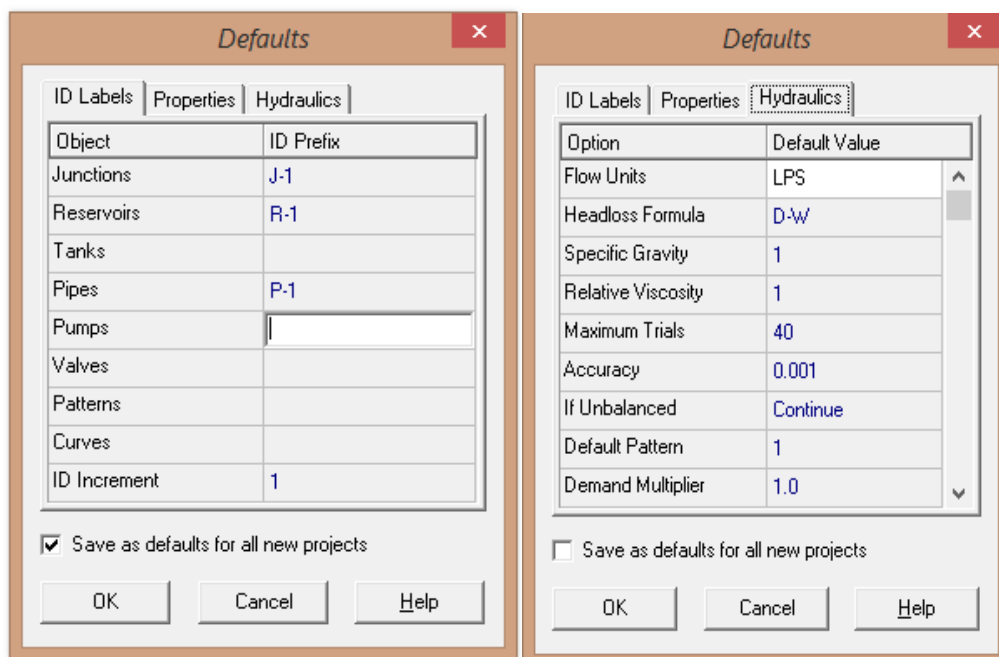
Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα επιλέγουμε meters(m).



Εικόνα 38: Επιλογή μονάδων

Στην συνέχεια επιλέγουμε Project. Σε αυτό το παράθυρο μπορούμε να αντιστοιχίσουμε χαρακτήρες για να εντοπίσουμε κάθε στοιχείο του δικτύου. Για παράδειγμα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε J για όλους τους κόμβους, R για δεξαμενές, P για σωλήνες. Τα σύμβολα αυτά αριθμούνται, π.χ. R-1 κλπ, και ο αριθμός που συνοδεύει το σύμβολο αυξάνεται αριθμητικά αν το πλήθος τους αυξάνεται. Όταν το δίκτυο είναι μεγάλο, αυτό το βήμα βοηθάει στο να εντοπίσουμε γρήγορα συγκεκριμένα στοιχεία με ανεπιθύμητες ροές ή πιέσεις.

Στην επιλογή Defaults ορίζουμε ονομασίες όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 39: Προεπιλογές, ετικέτες ταυτότητας, υδραυλικά

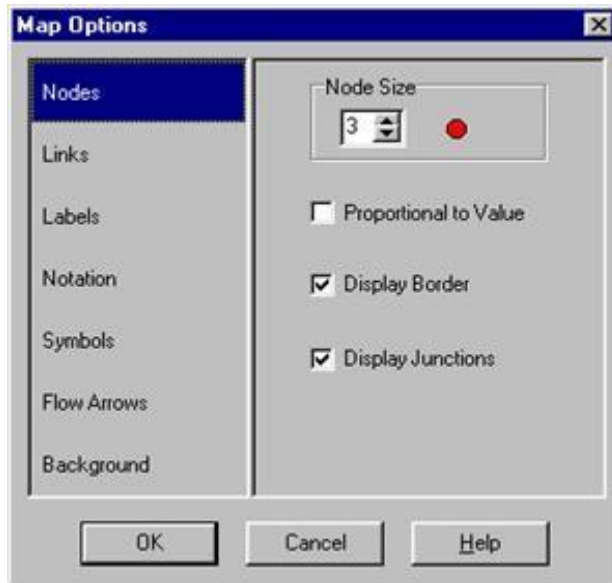
Defaults Hydraulics επιλέγουμε LPS επίσης επιλέγουμε την επιλογή Darcy –Weisbach ως προεπιλεγμένο τύπο HeadLoss.

Προσθήκη ετικέτας στο χάρτη

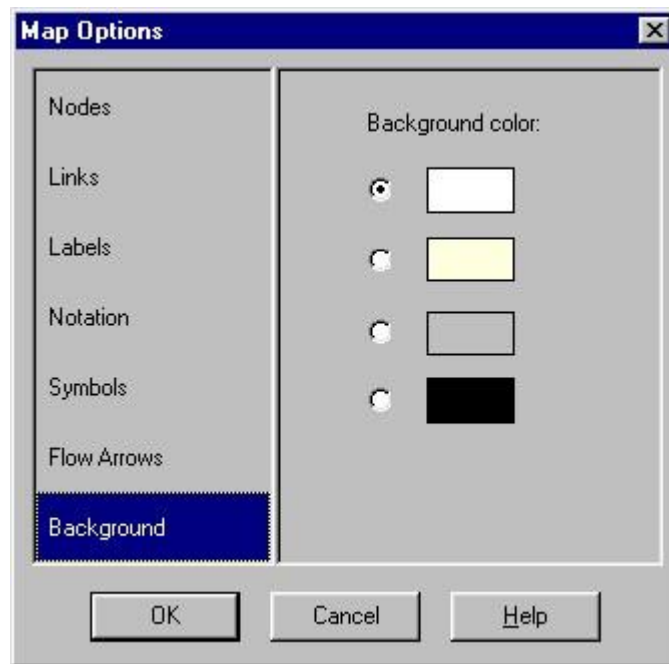
Οι ετικέτες μπορούν να βοηθήσουν να εντοπιστούν κοινοί σωλήνες, με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

5. Επιλέγουμε το **Label** στο κουμπί Maptoolbar.
6. Κάνουμε κλικ με το ποντίκι στο χάρτη όπου πρέπει να εμφανίζεται η ετικέτα.
7. Καταχωρούμε το κείμενο για την περιγραφή της ετικέτας.
8. Πατάμε **Enter**

Επίσης μπορούμε να αποκτήσουμε πρόσβαση στις δυνατότητες του χάρτη κάνοντας κλικ στο χάρτη και στη συνέχεια δεξί κλικ με το ποντίκι. Όταν εμφανιστεί το αναδυόμενο μενού, επιλέγουμε **Options**. Επεξεργαζόμαστε τα κατάλληλα χαρακτηριστικά όπως φαίνονται παρακάτω και έχουν περιγραφεί στην παράγραφο §3.2.7.











Εικόνα 40: Επιλογές χάρτη

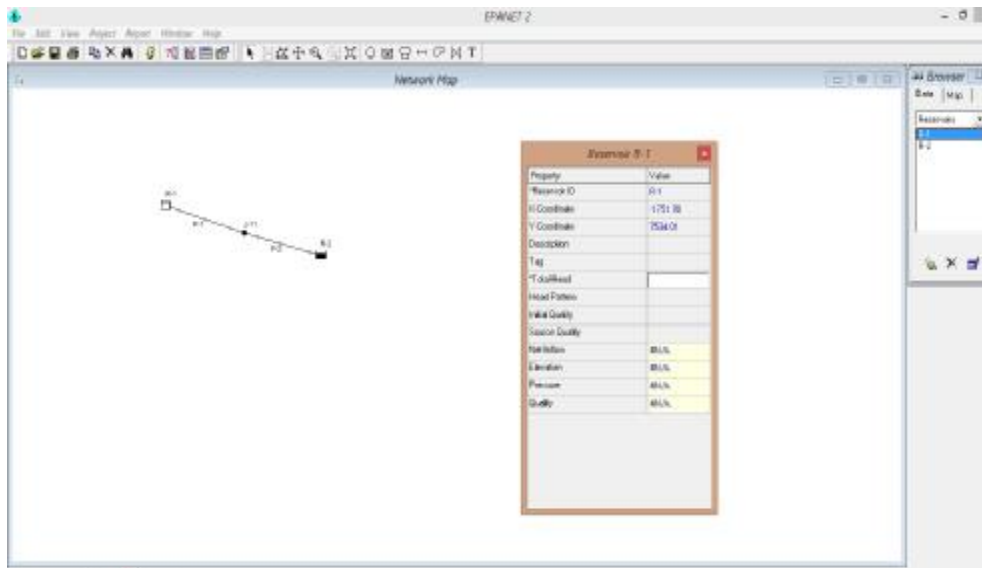
Είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε το δίκτυο ακολουθώντας τα εξής βήματα:

Πρώτα προσθέτουμε την δεξαμενή κάνοντας κλικ στο  στη γραμμή εργαλείων του χάρτη. Στη συνέχεια, κάνουμε κλικ με το ποντίκι στο χάρτη στη θέση όπου ανήκει η δεξαμενή.

Στη συνέχεια θα προσθέσουμε τους κόμβους διασταύρωσης. Κάνουμε κλικ στο  χάρτη και μετά πάλι . Στη συνέχεια θα προσθέσουμε τους σωλήνες. Ας ξεκινήσουμε με το Pipe1 που συνδέει τον κόμβο1.

Κάνουμε κλικ στο χάρτη Γραμμή εργαλείων. Στη συνέχεια κάνουμε κλικ στο  με το ποντίκι στην δεξαμενή R-1 στο χάρτη και, στη συνέχεια στο κόμβο 1.

Σχεδιάζεται ένα περίγραμμα του σωλήνα καθώς μετακινείται το ποντίκι από την δεξαμενή R-1. Στην κόμβο J-1 το ίδιο κάνουμε από τον κόμβο J-1 στη δεξαμενή R-2.



Εικόνα 41: Το δίκτυο ολοκληρωμένο στο EPANET

Στην συνέχεια επιλέγουμε τον κάθε σωλήνα για να εισάγουμε τα στοιχεία του όπως μήκος, διάμετρος, τραχύτητα.

Επεξεργασία αντικειμένου (Προσθήκη πληροφοριών σε συνδέσμους και συνδέσεις)

Για να επεξεργαστούμε ένα αντικείμενο που εμφανίζεται στο χάρτη επιλέγουμε το αντικείμενο στο χάρτη και κάνουμε κλικ στο κουμπί επεξεργασία στο Database Browser (ή απλά κάνουμε διπλό - κλικ στο αντικείμενο στο χάρτη). Θα εμφανιστεί ο κατάλληλος πίνακας (που φαίνεται παρακάτω). Για τους κόμβους, οι ελάχιστες απαιτούμενες πληροφορίες είναι η ζήτηση και η ανύψωση.

Για τους σωλήνες, οι ελάχιστες απαιτούμενες πληροφορίες είναι οι εξής: αρχικοί και τελικοί κόμβοι, μήκη, διαμέτροι και τραχύτητα. Η δεξαμενή πρέπει να έχει ανύψωση, διάμετρο, ελάχιστο, μέγιστο και αρχική στάθμη νερού. Τα στοιχεία με κίτρινο δεν έχουν εισαχθεί καθώς υπολογίζονται από το EPANET κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης.

Reservoir 1		Reservoir 2	
Property	Value	Property	Value
*Reservoir ID	1	*Reservoir ID	2
X-Coordinate	-1794.22	X-Coordinate	1879.25
Y-Coordinate	7789.12	Y-Coordinate	6649.66
Description		Description	
Tag		Tag	
*Total Head	20	*Total Head	10
Head Pattern		Head Pattern	
Initial Quality		Initial Quality	
Source Quality		Source Quality	
Net Inflow	-475.17	Net Inflow	475.17
Elevation	20.00	Elevation	10.00
Pressure	0.00	Pressure	0.00
Quality	0.00	Quality	0.00

Εικόνα 42: Ορισμός υψομετρικής διαφοράς δεξαμενών

Ορίσαμε υψομετρική διαφορά 2 δεξαμενών 10m.

Pipe P-1		Pipe P-2	
Property	Value	Property	Value
*Pipe ID	P-1	*Pipe ID	P-2
*Start Node	1	*Start Node	J-1
*End Node	J-1	*End Node	2
Description		Description	
Tag		Tag	
*Length	1524	*Length	1067
*Diameter	762	*Diameter	533
*Roughness	0.26	*Roughness	0.26
Loss Coeff.	0.5	Loss Coeff.	1
Initial Status	Open	Initial Status	Open
Bulk Coeff.	0	Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	0	Wall Coeff.	
Flow	475.17	Flow	475.17
Velocity	1.04	Velocity	2.13
Unit Headloss	1.20	Unit Headloss	7.66
Friction Factor	0.017	Friction Factor	0.018
Reaction Rate	0.00	Reaction Rate	0.00
Quality	0.00	Quality	0.00
Status	Open	Status	Open


Εικόνα 43: Επιλογή ιδιοτήτων σωληνών για την εισαγωγή στοιχείων

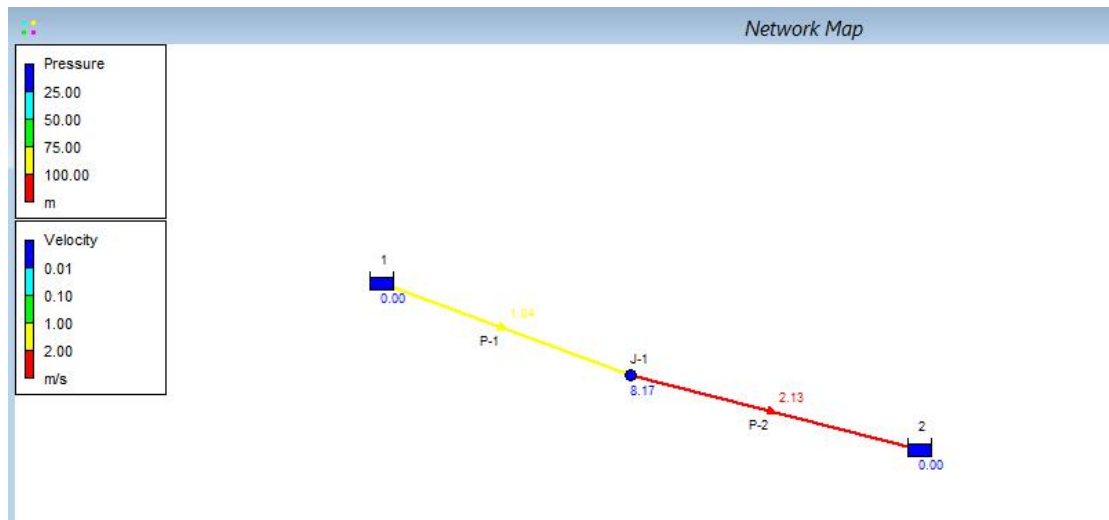
Ο συντελεστής τραχύτητας είναι διαφορετικός για κάθε υλικό, και αυξάνει με τη πάροδο των χρόνων λόγω εναποθέσεως υλικού. (Κανακούδης, 2010).

4.1.2 Εκτέλεση εφαρμογής EPANET

Εφόσον πλέον έχουμε δημιουργήσει το αρχείο εισόδου, μπορούμε να τρέξουμε το EPANET. Η διάταξη που απαιτείται για να τρέξει έχει περιγραφεί προηγουμένως. Αφού τρέξει η εφαρμογή, παράγει ένα αρχείο με τα αποτελέσματα που έχουν επιλεγεί από τον κώδικα. Το αρχείο αποτελεσμάτων έχει το όνομα results.txt και περιέχει τα αποτελέσματα όλων των κόμβων και όλων των σωληνώσεων στην μορφή που φαίνεται παρακάτω.

Επιλέγουμε στο browser Map nodes pressure και velocity για να μας δείξει υπόμνημα με τις πιέσεις και ταχύτητες.

Και μετά τρέχουμε το πρόγραμμα από το κουμπί  ή Run analysis.



Εικόνα 44: Το δίκτυο ολοκληρωμένο με υπόμνημα

Στην συνέχεια με την επιλογή Report table – network nodes μας εμφανίζει τον παρακάτω πίνακα.

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor
Pipe P-1	1524	762	0.26	475.17	1.04	1.20	0.017
Pipe P-2	1067	533	0.26	475.17	2.13	7.66	0.018

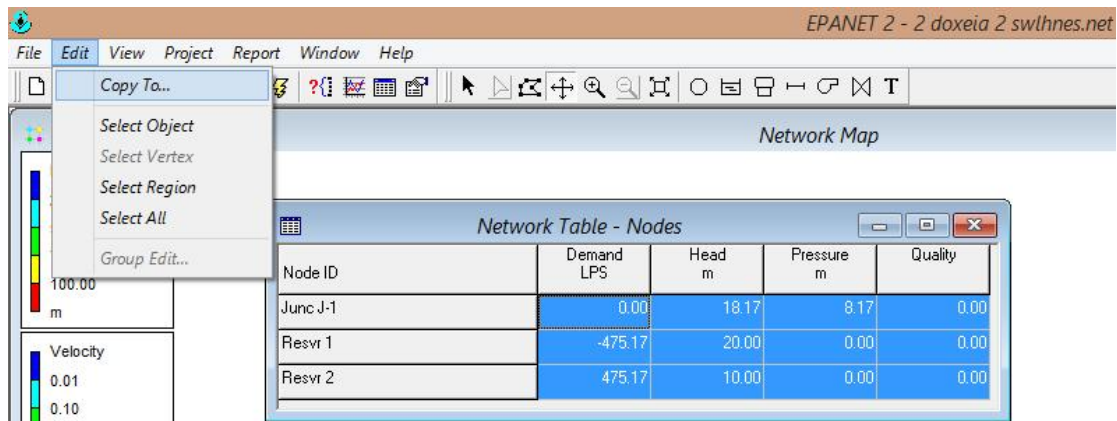
Εικόνα 45: Πίνακας αποτελεσμάτων σωληνώσεων

Report table και network links εμφανίζει τον παρακάτω πίνακα.

Node ID	Elevation m	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc J-1	10	0.00	18.17	8.17
Resvr 1	20	-475.17	20.00	0.00
Resvr 2	10	475.17	10.00	0.00

Εικόνα 46: Πίνακας αποτελεσμάτων δεξαμενών

Αν επιλέξουμε τα αρχεία μπορούμε να τα εξάγουμε επιλέγοντας edit-copy το και τα εξάγουμε ως .txt αρχείο.



Εικόνα 47: Εξαγωγή αποτελεσμάτων ως αρχείο txt

4.1.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε ότι λόγω απότομης αλλαγής διαμέτρου στον δεύτερο σωλήνα έχουμε σημαντικές τοπικές απώλειες (ελάσσονες), επίσης οι απώλειες τριβής είναι σχεδόν ίδιες καθώς έχουμε το ίδιο υλικό, χυτοσίδηρο. Οι ταχύτητες νερού στους σωλήνες είναι στον πρώτο 1,04 m/s και στον δεύτερο 2,13 m/s δηλαδή μέσα στα επιτρεπτά όρια χωρίς τον κίνδυνο να δημιουργηθεί θόρυβος. Η παροχή είναι περίπου $Q=0,475 \text{ m}^3/\text{s}$.

Η αναλυτική λύση στο πρόβλημα αυτό έχει ως εξής:

α) Εφαρμογή της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας και συνέχειας:

$$z_1 + P_1/\gamma + U_1^2/2g = z_2 + P_2/\gamma + U_2^2/2g + U_1^2/2g(K_{L1} + f_1 l_1/d_1) + U_2^2/2g(K_{L2} + f_2 l_2/d_2 + K_{L3}) \quad (1)$$

$$\text{και } U_1 \pi d_1^2/4 = U_2 \pi d_2^2/4 \Rightarrow U_2 = U_1 (D_1/D_2)^2 \quad (2)$$

με $P_1 = P_2 = 0$, $z_1 - z_2 = 10\text{m}$, $K_{L1} = 0.5$ (απώλειες εξόδου από την πρώτη δεξαμενή), K_{L2} απώλειες σύνδεσης πρώτου σωλήνα (l_1) με τον δεύτερο (l_2) τις οποίες βρίσκει το πρόγραμμα, $K_{L3} = 1$ (απώλειες εισόδου στη δεύτερη δεξαμενή), f_1, f_2 συντελεστές τριβής πρώτου και δεύτερου σωλήνα αντίστοιχα που βρίσκονται από την εξίσωση Darcy-Weisbach ή το διάγραμμα Moody.

β) Επειδή οι άγνωστοι είναι περισσότεροι από τις εξισώσεις θα πρέπει να γίνει μια αρχική εκτίμηση της U_1 και από την (2) προκύπτει αντίστοιχη εκτίμηση της U_2 .

γ) Με βάση τις ταχύτητες U_1 και U_2 που έχουν υποτεθεί, υπολογίζονται οι αριθμοί Reynolds για τον πρώτο και τον δεύτερο σωλήνα.

$$Re_1 = U_1 D_1 / \nu \text{ και } Re_2 = U_2 D_2 / \nu$$

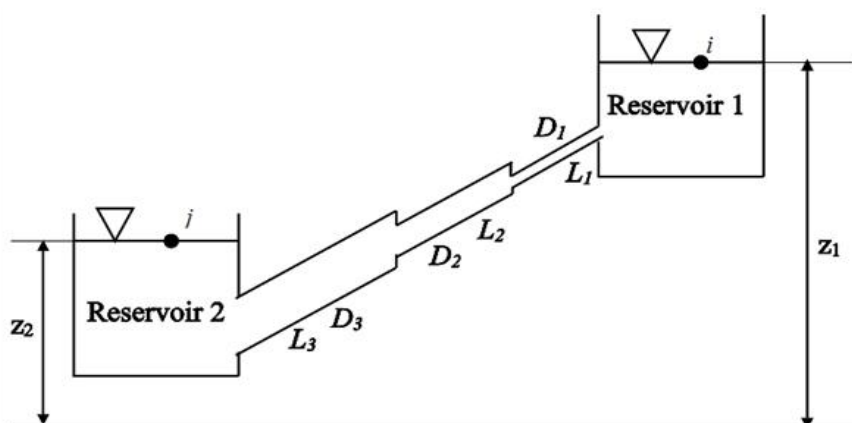
δ) Από αυτούς τους αριθμούς Reynolds βρίσκονται από το διάγραμμα Moody οι συντελεστές τριβής f_1 και f_2 με γνωστές τις ταχύτητες U_1 / D_1 και U_2 / D_2 , όπου $\epsilon = 0.26 \text{ mm}$ για σωλήνες από χυτοσίδηρο.

ε) Με τις παραπάνω τιμές U_1 , U_2 , f_1 και f_2 κοιτάμε αν επαληθεύεται η (1). Αν όχι, γίνεται νέα υπόθεση U_1 και τα βήματα β) – ε) εκτελούνται ξανά μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

Η επίλυση με το EPANET δεν απαιτεί φυσικά να γίνει η παραπάνω κοπιαστική εργασία υπολογισμών με το χέρι. Παρατηρούμε πάντως ότι η λύση που προέκυψε από το πρόγραμμα, επαληθεύει την (1).

4.2 Περιγραφή του 2^{ου} δικτύου

Το δεύτερο δίκτυο ύδρευσης αποτελείται από δυο δεξαμενές συνδεδεμένες με τρεις σωλήνες από χυτοσίδηρο σε σειρά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.



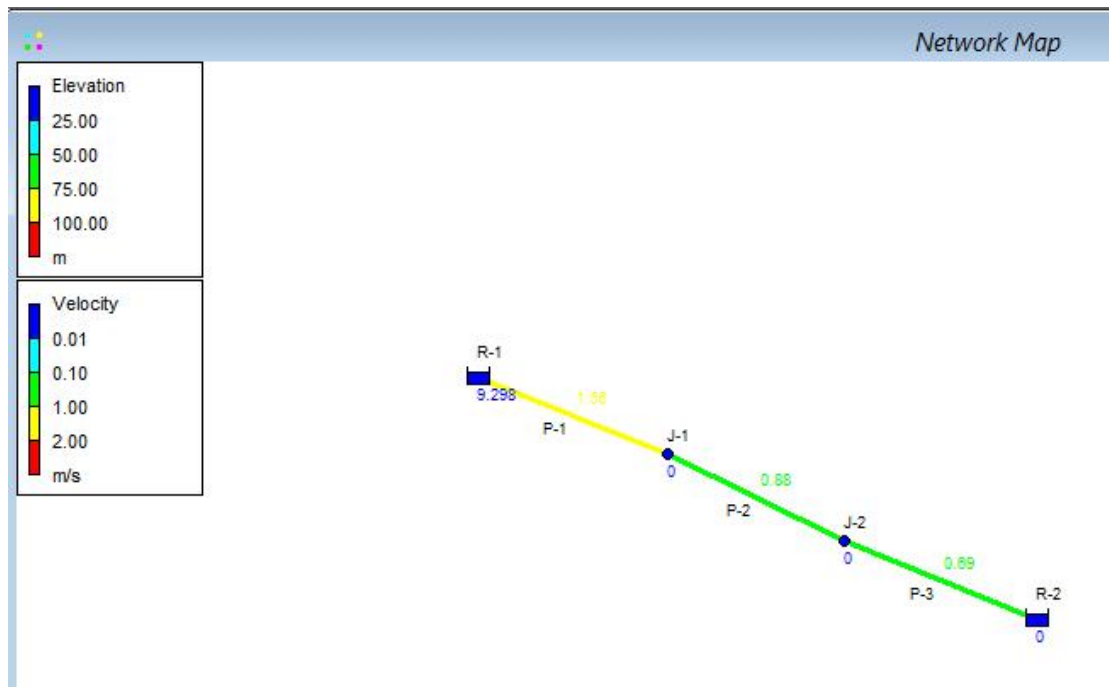
Εικόνα 48: Δίκτυο δυο δεξαμενών με τρεις σωλήνες

Δεδομένα: $L_1=600\text{m}$ $D_1=0.3\text{m}$, $L_2=1500\text{m}$ $D_2=0.4\text{m}$, $L_3=1500\text{m}$ $D_3=0.45\text{m}$. Η τραχύτητα είναι $0,26\text{ mm}$ καθώς οι σωλήνες είναι από χυτοσίδηρο.

Ζητούμενα: Να βρεθεί η υψομετρική διαφορά των δυο δεξαμενών ώστε να έχουμε παροχή $Q=0,11\text{m}^3/\text{s}$.

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με το 1ο δίκτυο όσον αφορά τον σχεδιασμό στο EPANET και λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

Σχέδιο από epanet με δυο δεξαμενές και τρεις σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων.



Εικόνα 49: Ολοκληρωμένο δίκτυο με υπόμνημα

Στοιχεία δεξαμενής ύψος δεξαμενής και εισροή δεξαμενής αλλά αφού είναι -110.00 τότε έχουμε εκροή.

Reservoir R-1		Reservoir R-2	
Property	Value	Property	Value
*Reservoir ID	R-1	*Reservoir ID	R-2
X-Coordinate	-2687.54	X-Coordinate	-1274.27
Y-Coordinate	8476.82	Y-Coordinate	7867.65
Description		Description	
Tag		Tag	
*Total Head	9.298	*Total Head	0
Head Pattern		Head Pattern	
Initial Quality		Initial Quality	
Source Quality		Source Quality	
Net Inflow	-110.00	Net Inflow	#N/A
Elevation	9.30	Elevation	#N/A
Pressure	0.00	Pressure	#N/A
Quality	0.00	Quality	#N/A

Εικόνα 50: Εισαγωγή δεδομένων δεξαμενών

Pipe P-1		Pipe P-2		Pipe P-3	
Property	Value	Property	Value	Property	Value
*Pipe ID	P-1	*Pipe ID	P-2	*Pipe ID	P-3
*Start Node	R-1	*Start Node	J-1	*Start Node	J-2
*End Node	J-1	*End Node	J-2	*End Node	R-2
Description		Description		Description	
Tag		Tag		Tag	
*Length	600	*Length	1500	*Length	1500
*Diameter	300	*Diameter	400	*Diameter	450
*Roughness	0.26	*Roughness	0.26	*Roughness	0.26
Loss Coeff.	0.5	Loss Coeff.	0.5	Loss Coeff.	1
Initial Status	Open	Initial Status	Open	Initial Status	Open
Bulk Coeff.		Bulk Coeff.		Bulk Coeff.	
Wall Coeff.		Wall Coeff.		Wall Coeff.	
Flow	110.00	Flow	110.00	Flow	110.00
Velocity	1.56	Velocity	0.88	Velocity	0.69
Unit Headloss	8.25	Unit Headloss	1.87	Unit Headloss	1.03
Friction Factor	0.020	Friction Factor	0.019	Friction Factor	0.019
Reaction Rate	0.00	Reaction Rate	0.00	Reaction Rate	0.00
Quality	0.00	Quality	0.00	Quality	0.00

Εικόνα 51: Εισαγωγή δεδομένων σωλήνων

Αποτελέσματα από το τρέξιμο του προγράμματος.

Node ID	Elevation m	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc J-1	0	0.00	4.35	4.35
Junc J-2	0	0.00	1.55	1.55
Resvr R-1	9.298	-110.00	9.30	0.00
Resvr R-2	0	110.00	0.00	0.00

Εικόνα 52: Πίνακας αποτελεσμάτων δεξαμενών

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor
Pipe P-1	600	300	0.26	110.00	1.56	8.25	0.020
Pipe P-2	1500	400	0.26	110.00	0.88	1.87	0.019
Pipe P-3	1500	450	0.26	110.00	0.69	1.03	0.019

Εικόνα 53: Πίνακας αποτελεσμάτων σωλήνων

4.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Το EPANET δέχεται ύψος και υπολογίζει παροχή. Για να υπολογίσουμε το αντίθετο το κάναμε πειραματικά δίνοντας διαφορετικές τιμές στο πρόγραμμα. Με τον τρόπο αυτό βρέθηκε ότι για να έχουμε την επιθυμητή παροχή $Q=0,11m^3/s$ πρέπει οι δυο δεξαμενές μας να έχουν υψομετρική διαφορά 9,298m όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Ύψος (m)	Παροχή (m^3)
5	0.080
6	0.088
7	0.095
8	0.102
9	0.108
9.298	0.110
10	0.114

Εικόνα 54: Πίνακας πειραματικών τιμών

Η αναλυτική λύση εδώ θα προϋπέθετε την ίδια διαδικασία με αυτήν που περιγράφηκε στην §4.1.3. Η εξίσωση της ενέργειας θα περιλάμβανε εδώ τρεις διαφορετικούς σωλήνες και περισσότερους συντελεστές απωλειών εξαρτημάτων K_L . Η εξίσωση ενέργειας για τις τρεις ταχύτητες U_1 , U_2 και U_3 θα απαιτούνταν πάλι επαναληπτικές διαδικασίες υπολογισμού.

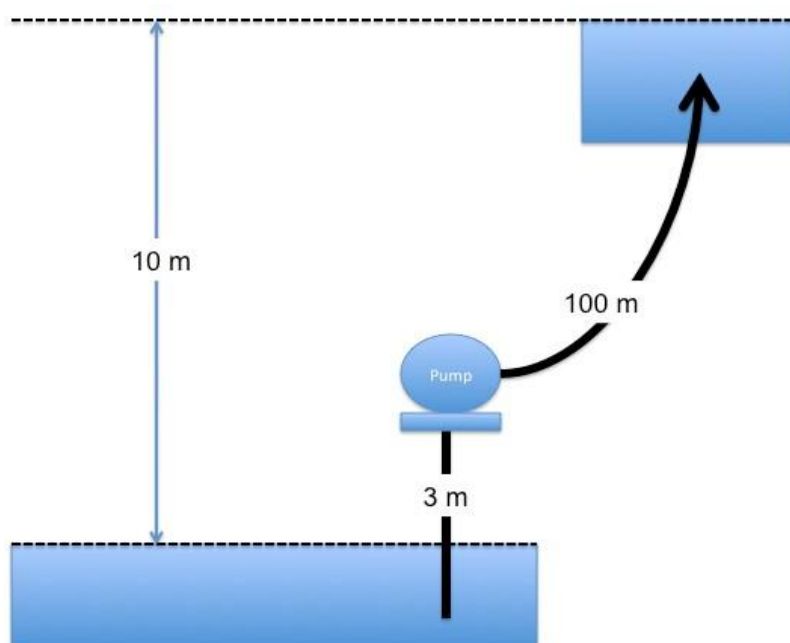
4.3 Περιγραφή του 3^{ου} δικτύου

Μας δίνετε ένα δίκτυο ανύψωσης νερού με αντλία μέσω ενός σωλήνα διαμέτρου 100 mm, μήκους 100 m, όλκιμο σίδηρο σωλήνων από ένα κατώτερο σε ένα ανώτερο ταμιευτήρα. Η πλευρά αναρρόφησης της αντλίας είναι 3m και διαμέτρου 100 mm, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα διαφορά δεξαμενής ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας είναι 10m. Στο EPANET δίνονται τρία σημεία λειτουργίας της αντλίας και με αυτόν τον τρόπο δίνεται από το πρόγραμμα η εξίσωση της απόδοσής της ως εξής:

$$h_p = 15 - 0.1 Q^2$$

όπου η υψομετρική διαφορά είναι σε μέτρα και η παροχή είναι σε λίτρα ανά δευτερόλεπτο (LPS). Ο στόχος της ανάλυσης είναι να εκτιμηθεί η παροχή Q στο σύστημα.

Με την ολοκλήρωση αυτού του βήματος αυτού, το πρόγραμμα εκτελείται για να εκτιμηθεί η παροχή στο σύστημα δίνοντας μας ταχύτητες στους αγωγούς, τοπικές απώλειες και απώλειες τριβής όπως επίσης μας δίνει και την πίεση σε κάθε κόμβο και την πτώση πίεσης της αντλίας και στους σωλήνες.



Εικόνα 55: Δίκτυο δυο δεξαμενών με αντλία

4.3.1 Σχεδιασμός του 3^{ου} δικτύου στο EPANET

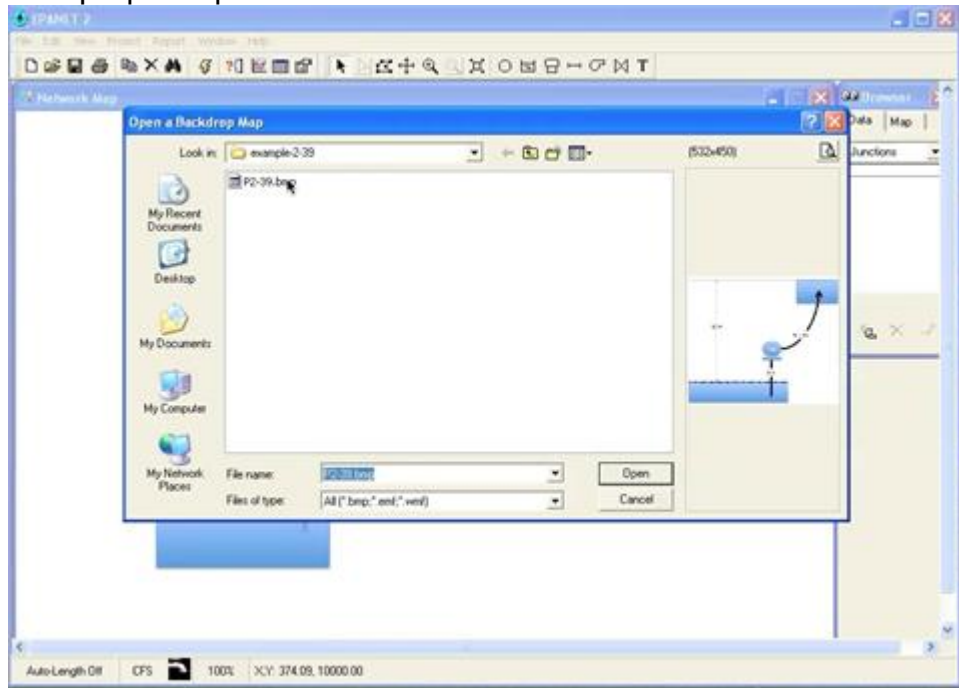
Για να σχεδιάσουμε (προσομοιώσουμε) αυτή την κατάσταση, ακολουθούμε τα βήματα του σχεδιασμού που έχουν ήδη αναφερθεί, προσθέτοντας μόνο τον ειδικό σύνδεσμο.

Μετατρέπουμε την εικόνα σε ένα bitmap, τοποθετούμε το bitmap σε ένα κατάλογο στον οποίο θα αποθηκευτεί το μοντέλο εισόδου file.

Ξεκινάμε το πρόγραμμα Epanet.

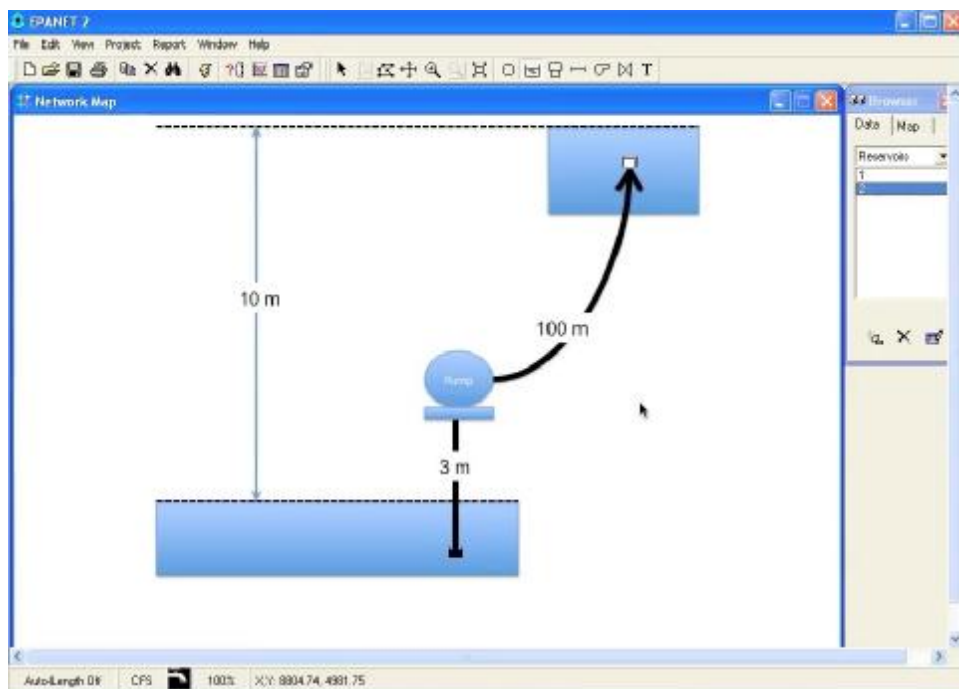
Ρυθμίζουμε τις προεπιλογές (Hydraulics = D-W, μονάδες = LPS).

Εισάγουμε το φόντο.





Εικόνα 56: Εισαγωγή φόντο στο background

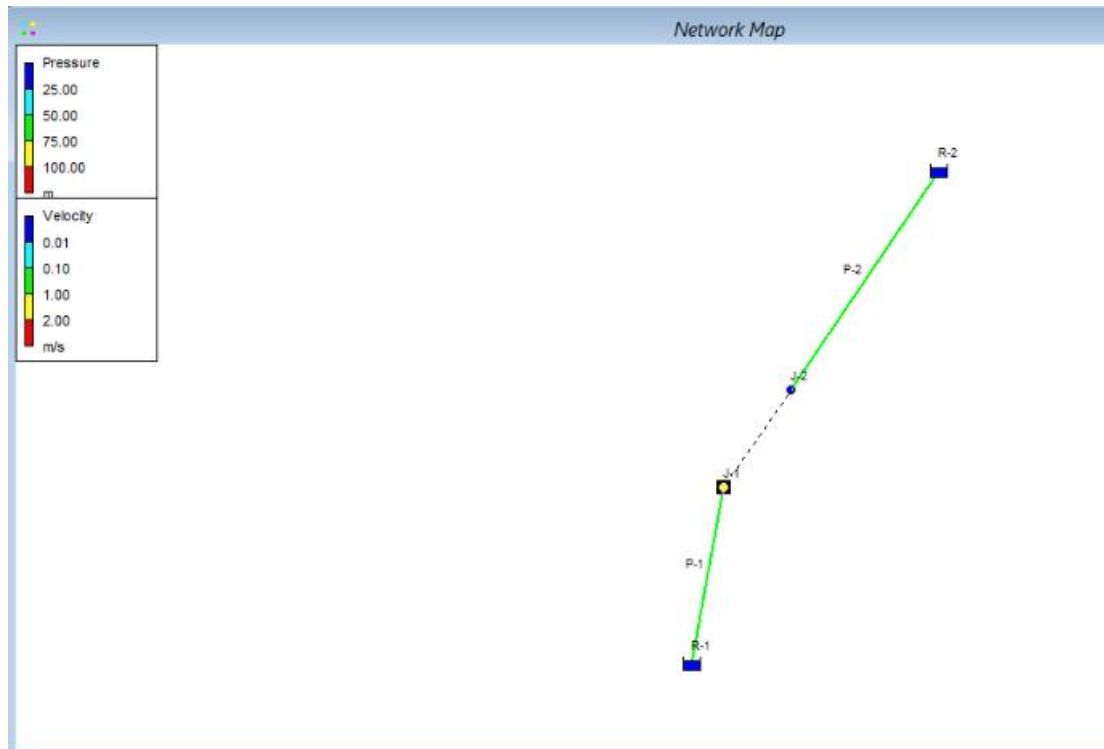
Επιλέγουμε το εργαλείο δεξαμενή , Βάζουμε δύο δεξαμενές στο χάρτη.




Εικόνα 57: Εισαγωγή δεξαμενών στο φόντο

Επιλέγουμε το εργαλείο κόμβου , βάζουμε δυο κόμβους στο χάρτη που αντιπροσωπεύουν την αναρρόφηση και κατάθλιψη της αντλίας.

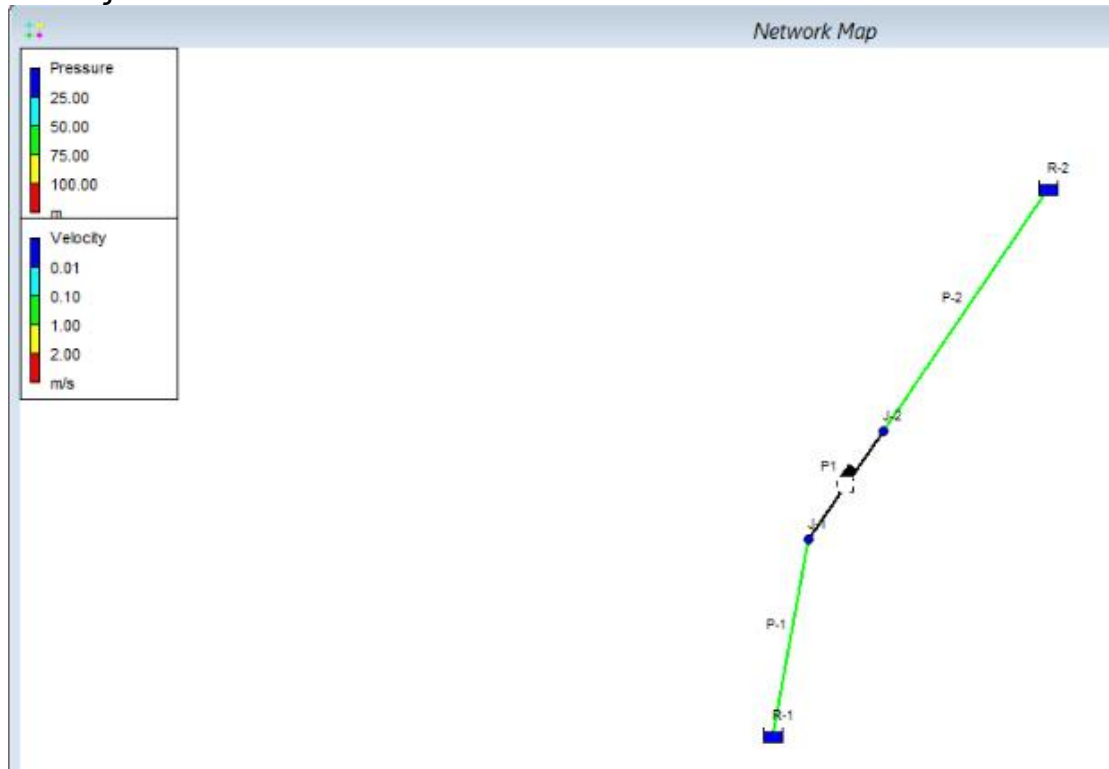
Επιλέγουμε το εργαλείο σύνδεσης (σωλήνα) , που συνδέουν τις δεξαμενές στο πλησιέστερο κόμβο τους.



Εικόνα 58: Σύνδεση των δυο δεξαμενών

Επιλέγουμε το εργαλείο της αντλίας . Συνδέουμε τους κόμβους μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας το σύνδεσμο της

αντλίας.



Εικόνα 59: Σύνδεση της αντλίας στο δίκτυο

Ρυθμίζουμε το ύψος της κάθε δεξαμενής .

Reservoir R-1		Reservoir R-2	
Property	Value	Property	Value
*Reservoir ID	R-1	*Reservoir ID	R-2
X-Coordinate	5059.52	X-Coordinate	8562.93
Y-Coordinate	2227.89	Y-Coordinate	9217.69
Description		Description	
Tag		Tag	
*Total Head	0	*Total Head	10
Head Pattern		Head Pattern	
Initial Quality		Initial Quality	
Source Quality		Source Quality	
Net Inflow	-6.35	Net Inflow	6.35
Elevation	0.00	Elevation	10.00
Pressure	0.00	Pressure	0.00
Quality	0.00	Quality	0.00

Εικόνα 60: Εισαγωγή δεδομένων δεξαμενών

Ρυθμίζουμε το μήκος του σωλήνα, τραχύτητα, ύψος, και διάμετρο σε κάθε σωλήνα.

Pipe P-1		Pipe P-2	
Property	Value	Property	Value
*Pipe ID	P-1	*Pipe ID	P-2
*Start Node	R-1	*Start Node	J-2
*End Node	J-1	*End Node	R-2
Description		Description	
Tag		Tag	
*Length	3	*Length	100
*Diameter	100	*Diameter	100
*Roughness	0.26	*Roughness	0.26
Loss Coeff.	0.2	Loss Coeff.	1
Initial Status	Open	Initial Status	Open
Bulk Coeff.		Bulk Coeff.	
Wall Coeff.		Wall Coeff.	
Flow	6.35	Flow	6.35
Velocity	0.81	Velocity	0.81
Unit Headloss	11.26	Unit Headloss	9.38
Friction Factor	0.034	Friction Factor	0.028
Reaction Rate	0.00	Reaction Rate	0.00
Quality	0.00	Quality	0.00
Status	Open	Status	Open

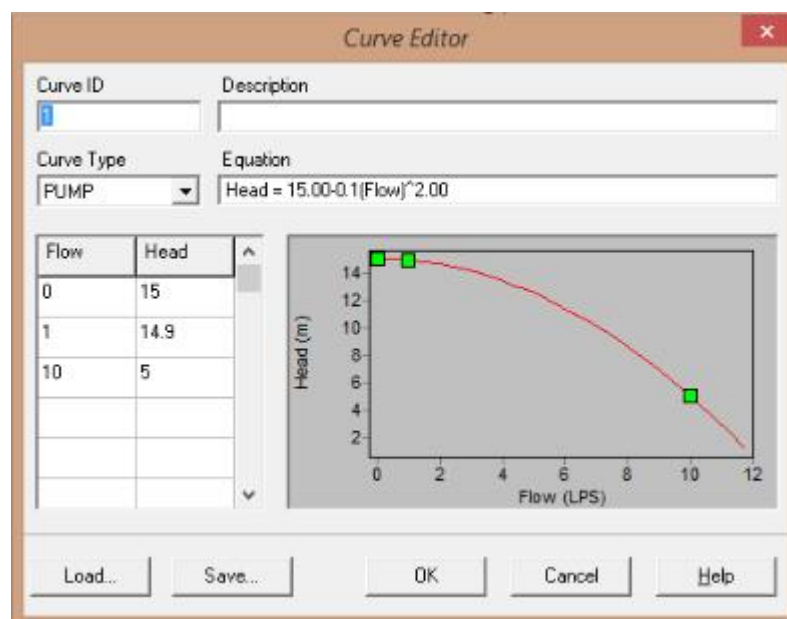
Εικόνα 61: Εισαγωγή δεδομένων σωλήνων

Στο Browser Data , επιλέγουμε Curves. Εδώ είναι όπου δημιουργούμε την καμπύλη της αντλίας. Αυτή δίνει την καμπύλη ως μια εξίσωση. Θα χρειαστούν τρία σημεία για να δημιουργηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας.

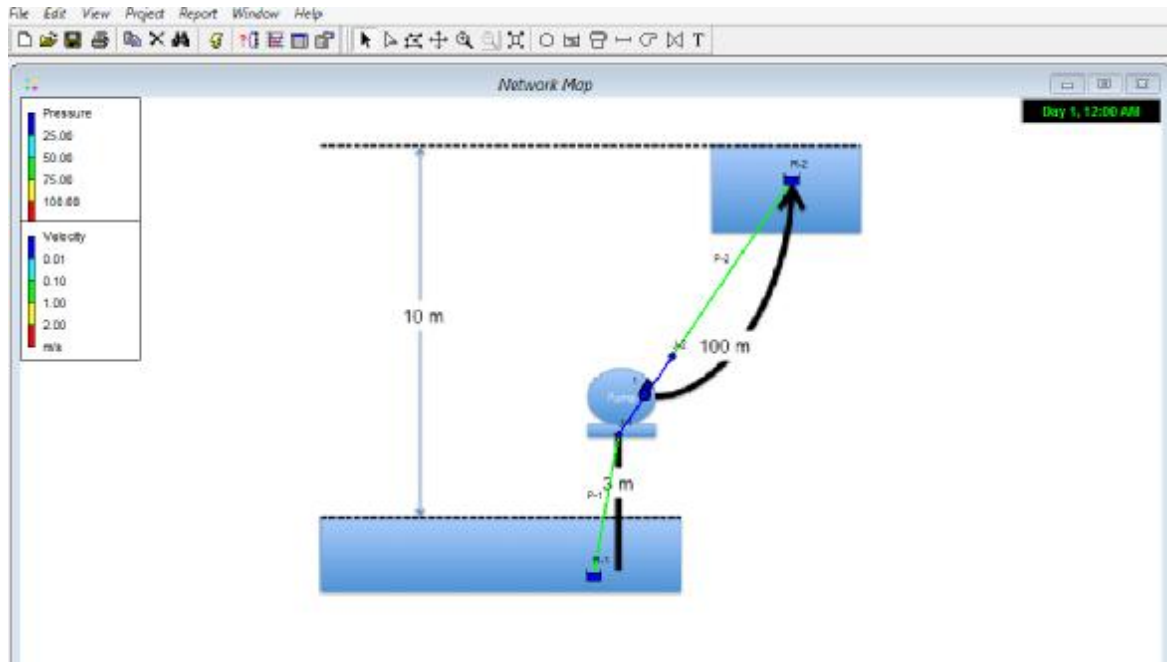
Pump P1 ✖

Property	Value
*Pump ID	P1
*Start Node	J-1
*End Node	J-2
Description	
Tag	
Pump Curve	1
Power	
Speed	
Pattern	
Initial Status	Open
Effic. Curve	
Energy Price	
Price Pattern	
Flow	#N/A
Headloss	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

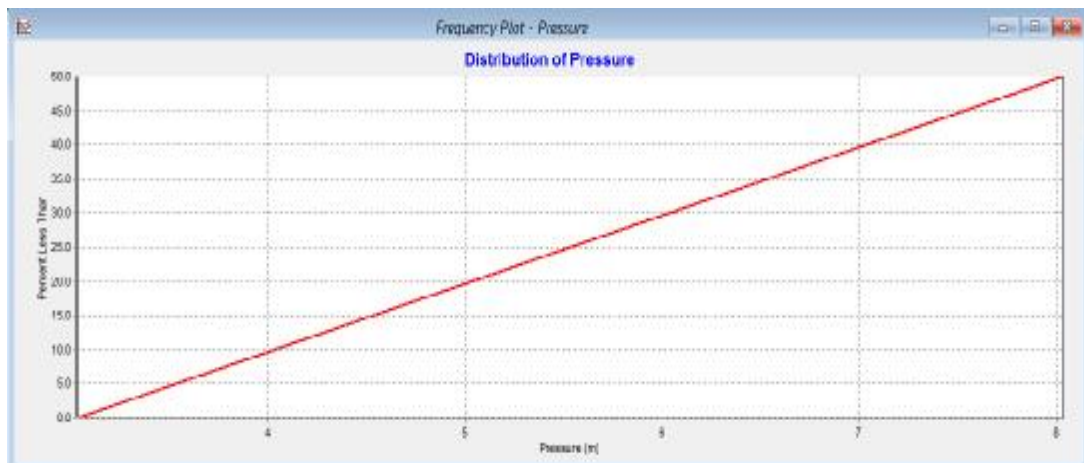
Εικόνα 62: Εισαγωγή δεδομένων αντλίας



Εικόνα 63: Καμπύλη λειτουργίας αντλίας



Εικόνα 64: Τελικό σχήμα σχεδιασμού



Εικόνα 65: Διάγραμμα λειτουργίας συχνότητας κατανομής πίεσης

Node ID	Elevation m	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc J-1	3	0.00	-0.03	-3.03
Junc J-2	3	0.00	10.94	7.94
Resvr R-1	0	-6.35	0.00	0.00
Resvr R-2	10	6.35	10.00	0.00

Εικόνα 66: Πίνακας αποτελεσμάτων δεξαμενών

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Reaction Rate mg/L/d
Pipe P-1	3	100	0.26	6.35	0.81	11.26	0.034	0.00
Pipe P-2	100	100	0.26	6.35	0.81	9.38	0.028	0.00
Pump P1	N/A	N/A	N/A	6.35	0.00	-10.97	0.000	0.00

Εικόνα 67: Πίνακας αποτελεσμάτων σωληνώσεων

Pump	Percent Utilization	Average Efficiency	Kw-hr /m3	Average Kwatts	Peak Kwatts	Cost /day
P1	100.00	75.00	0.04	0.91	0.91	0.00
Total Cost						0.00
Demand Charge						0.00

Εικόνα 68: Πίνακας αναφοράς κατανάλωσης ενέργειας αντλίας

4.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Το υλικό κατασκευής των σωληνώσεων είναι όλκιμος σίδηρος άρα έχουμε τραχύτητα 0,26 mm. Η παροχή είναι $0,635 \text{ m}^3/\text{s}$ και η ταχύτητα στους σωλήνες βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια. Οι τοπικές απώλειες είναι μεγαλύτερες στον πρώτο σωλήνα λόγω του ότι σωλήνας προχωρά μέσα στη δεξαμενή όπως φαίνεται στην Εικόνα 64 και οι απώλειες είναι ακόμα μεγαλύτερες. Επίσης στον κόμβο J_2 (Κατάθλιψη) βλέπουμε μεγαλύτερη πίεση από ότι στον κόμβο J_1 (Αναρρόφηση).

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Με την χρήση του EPANET για την προσομοίωση δικτύων μέσα από τα αποτελέσματα μπορέσαμε να κατανοήσουμε το πώς λειτουργεί το καθένα από αυτά.

Επιλέχθηκαν τρία ροϊκά παραδείγματα τα οποία ήταν σχετικά απλά να επιλυθούν αναλυτικά, οπότε και επιχειρήσαμε τις ακριβείς λύσεις μέσω του προγράμματος. Οι λύσεις που προέκυψαν από το EPANET ήταν ακριβείς και στις τρεις περιπτώσεις. Έτσι ελέγχθηκε η αξιοπιστία του προγράμματος για χρήση σε πιο πολύπλοκες ροϊκές περιπτώσεις.

Η επιλογή του λογισμικού EPANET στην επίλυση κλειστών δικτύων ύδρευσης είναι άκρως σημαντική καθώς ο χρήστης απαλλάσσεται από πρόσθετους και χρονοβόρους υπολογισμούς. Αποτελεί ένα χρήσιμο ερευνητικό εργαλείο το οποίο συμβάλει στην κατανόηση της κίνησης και της 'συμπεριφοράς' του νερού μέσα στα δίκτυα διανομής από τον χρήστη, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Ειδικότερα το EPANET με τις πολλές εξελιγμένες δυνατότητες προσομοίωσης του, μπορεί να επιλύσει υδραυλικά αλλά και ποιοτικά το δίκτυο, δίνοντας τα αποτελέσματα σε διάφορες μορφές, όπως για παράδειγμα χάρτες, γραφήματα, πίνακες. Είναι ένα λογισμικό πρόγραμμα με πάρα πολλές δυνατότητες που βοηθά στην οργάνωση και την ευκολότερη εργασία του μηχανικού. Διατίθεται ελεύθερα, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανά πάσα στιγμή και από τον οποιοδήποτε.

Μια πρόταση για επιπλέον έρευνα θα ήταν η βελτιστοποίηση δικτύου ύδρευσης μιας συνοικίας με το λογισμικό EPANET.

Βιβλιογραφία

1. US Environmental Protection Agency. epa.gov. EPANET: Water Research. [Ηλεκτρονικό] <https://www.epa.gov/waterresearch/> epanet.
2. Αφτιάς Μ. 1992, Υδρεύσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
3. Γιακουμάκης Σ. 2008, Μέθοδοι Ελέγχου και Διαρροών στα Δίκτυα Ύδρευσης, Αθήνα, Τομέας Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ Ευστρατιάδης Α. & Κουτσογιάννης Δ. 2005, Τυπικά Υδραυλικά Έργα (Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος), ΕΜΠ ΣΠΜ, Αθήνα.
4. Δημητρακόπουλος, Α.Κ., & Χατζηθεοδώρου, Χρ. (2012). Στοιχεία Υδραυλικής. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πάτρα.
5. ΕΛΛΕΝΙΤ. (n.d.). Σωλήνες πίεσεως. Τεχνικό Φυλλάδιο. ΕΛΛΕΝΙΤ Α.Ε. Ελληνική Βιομηχανία Δομικών Υλικών.
6. Κανακούδης, Β., & Τσιτσιφλή, Στ. (2010). Ολοκληρωμένη διαχείριση αστικών δικτύων ύδρευσης. Ηλεκτρονικό Βιβλίο. Έκδοση: 2.2. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Εργαστήρια Υδρομηχανικής & Περιβαλλοντικής Τεχνικής. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα. www.kallipos.gr. ISBN: 978-960-603-201-1.
7. Καρκατσούλη, Ε. (2008, Ιούλιος). Χρήση μοντέλων επίλυσης κυκλοφοριακών δικτύων ύδρευσης οικισμών. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών. Τομέας Υδατικών Πόρων. Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών έργων & Διαχείρισης Υδατικών Πόρων. Αθήνα.
8. Κουζέλη – Κατσίρη, Α. (1988). Υδρεύσεις πόλεων. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Υδατικών Πόρων – Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων. Αθήνα.
9. Λαγγούσης, Α. (2015). Υδρεύσεις – Αποχετεύσεις. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πάτρα.
10. Μαντόγλου Α. 2004, Μηχανική Ρευστών και Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Αθήνα, ΕΜΠ.
11. ΠΕΤΖΕΤΑΚΙΣ.(n.d.). Σωλήνες πίεσεως και εξαρτήματα: Τεχνικά χαρακτηριστικά. Τεχνικό Φυλλάδιο. Α.Γ. ΠΕΤΖΕΤΑΚΙΣ Ελληνική Βιομηχανία Πλαστικών & Ελαστικού.
12. Τσακίρης Γ. 2006, Υδραυλικά Έργα Σχεδιασμός & Διαχείριση, Τόμος II, Συμμετρία, Αθήνα.

