



# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Ανάλυση αξιοπιστίας δικτύων διανομής ύδατος  
έναντι σεισμικής δραστηριότητας

Σταυρακαντωνάκης Ιωάννης

Αθήνα, Νοέμβριος 2017

Επιβλέπων:

Φραγκιαδάκης Μιχάλης, Επ. Καθηγητής ΕΜΠ



## Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας αποτελεί την αυλαία των φοιτητικών μου χρόνων. Λέγεται ότι σημαντικότερο στοιχείο από την επιστημονική γνώση που κατέχει ένα άτομο, αποτελεί η κοινωνική μόρφωση που αποκτά μέσα από τις ευχάριστες και δυσάρεστες καταστάσεις που συναντά και τα πρόσωπα τα οποία συναναστρέφεται. Στην έξοδο μου λοιπόν από το Πολυτεχνείο η χαρά για την επίτευξη του στόχου του πτυχίου μετριάζεται λόγω του κλείσιμου ενός κύκλου ζωής που περιείχε ανθρώπους και στιγμές που θέλω να πιστεύω με μετάλλαξαν προς το καλύτερο ως προς τον τρόπο σκέψης και αφήγησης της ζωής. Με τον κίνδυνο να μη ξεφύγω από τις τετριμμένο μοτίβο θα ήθελα να τους ευχαριστήσω μέσα σε λίγες συμπυκνωμένες γραμμές.

Η σελίδα αυτή είναι κομμάτι της εργασίας που χωρίς τη βοήθεια του κ. Φραγκιαδάκη Μιχάλη δε θα είχε περατωθεί επομένως θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την καθοδήγηση που μου παρείχε, τη βοήθεια του στα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας και τις πολύτιμες ώρες που μου αφιέρωσε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους κ.Κουτσογιάννη και κ.Ευστρατιάδη για την παροχή του μοντέλου του δικτύου ύδρευσης που μου παρείχαν για τις σημαντικές και κατοτοπιστικές συμβουλές που μου έδωσαν για ζητήματα υδραυλικής συμπεριφοράς και απόκρισης του δικτύου.

Παρότι δεν είχαν καμία γνώση επί του θέματος και δεν μπορούσαν αλλά ούτε ήθελαν όμως να βοηθήσουν για τη συγγραφή αυτού του τεύχους, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να ονοματίσω συγκεκριμένα «παιδιά» της σχολής που πορευτήκαμε μαζί στο σύνολο των φοιτητικών μου χρόνων και κάνουν δυσκολότερο το τέλος αυτών. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ λοιπόν στον Τόλη, την Μαρία και τον Μάριο και ένα πιο ιδιαίτερο ευχαριστώ στον Βαγγέλη για την υπομονή του για τα χρόνια που κάνουν το Φ62 να μην μοιάζει με διάμετρο χάλυβα.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστάω στην οικογένεια μου, τους γονείς μου Γεώργιο και Γεωργία και την αδερφή μου Ειρήνη για την ηθική και υλική υποστήριξη χωρίς καμία πίεση που

μου παρείχαν προκειμένου να κλείσω επιτυχημένα αυτό τον κύκλο σπουδών στη σχολή των Πολιτικών Μηχανικών.

Σταυρακαντωνάκης Ιωάννης,

Οκτώβριος 2017





## Περίληψη

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς δικτύου διανομής μετά από σεισμική δραστηριότητα. Η εδαφική ταχύτητα και η εδαφική παραμόρφωση που συντελούνται από την σεισμικό γεγονός έχουν ως αποτέλεσμα τη θραύση αγωγών σε όλη την έκταση του δικτύου. Η μελέτη της απόκρισης του δικτύου και η ανάλυση της αξιοπιστίας του ως προς την επαρκή παροχέτευση προς τους καταναλωτές προϋποθέτει την κατάλληλη μοντελοποίηση του δικτύου προς την δομή του αλλά και τις συνθήκες ροής αμέσως μετά την εκδήλωση του σεισμού. Η απουσία λογισμικών προγραμμάτων που έχουν την ικανότητα να περιγράψουν σύνθετες μορφές ροής που μεταβάλλονται κατά μήκος των αγωγών από ροή υπό πίεση σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια οδηγεί στην αναγκαιότητα ανάπτυξης μιας μεθοδολογίας που προσεγγίζει ικανοποιητικά τις συγκεκριμένες έκτακτες συνθήκες του δικτύου. Στην παρούσα εργασία αναλύεται η μεθοδολογία GIRAFFE που δύναται να παρέχει έγκυρες πληροφορίες για την αξιοπιστία παροχέτευσης και λειτουργικότητας του δικτύου μετά την εκδήλωση θραύσεων αγωγών κατά μήκος του δικτύου διανομής





# Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Περιγραφή Προβλήματος.....	2
1.2	Δομή Εργασίας.....	3
2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΥΔΑΤΟΣ.....	7
2.1	Θεωρία Ροής Κλειστών (υπό πίεση) Αγωγών και Αρχές Υδραυλικής.....	7
2.1.1	Βασικές έννοιες μηχανικής των ρευστών.....	7
2.1.2	Θεμελιώδεις νόμοι δυναμικής.....	9
2.1.3	Θεώρημα μεταφοράς Reynolds.....	10
2.1.4	Βασικές εξισώσεις.....	11
2.1.5	Κατηγορίες ροής υπό πίεση.....	13
2.1.6	Απώλεια ενέργειας λόγω τριβών – Εξίσωση Darcy Weisbach.....	15
2.1.7	Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή- Τοπικές απώλειες.....	16
2.1.8	Γραμμή Ενέργειας – Πιεζομετρική Γραμμή.....	17
2.2	Γενική Διάταξη Υδρευτικών Έργων.....	18
2.2.1	Λειτουργικές απαιτήσεις δικτύου.....	22
2.3	Μεγέθη Σχεδιασμού Δικτύου Διανομής.....	24
2.3.1	Εκτίμηση χρήσιμων χαρακτηριστικών μεγεθών.....	26
2.4	Διαδικασία Προσομοίωσης και Υδραυλικής ανάλυσης δικτύου.....	27
2.4.1	Τοπολογία δικτύων – Θεμελιώδεις σχέσεις.....	29
2.4.2	Εξισώσεις διατήρησης ενέργειας βρόχων.....	29
2.4.3	Εξισώσεις συνέχειας κόμβων.....	30

2.4.4	Συνιστώσες μοντέλου υδραυλικής ανάλυσης και δεδομένα εισόδου. ....	32
3	Δίκτυο Ύδρευσης του Δήμου Νέας Αρτάκης. ....	37
3.1	Μεγέθη σχεδιασμού δικτύου. ....	38
3.1.1	Μέγιστες πιέσεις.....	38
3.1.2	Ελάχιστες πιέσεις.....	38
3.1.3	Υλικό αγωγών.....	39
3.1.4	Εκτίμηση Πληθυσμού σχεδιασμού – Κατανάλωση σχεδιασμού. ....	39
3.2	Γενική διάταξη των έργων. ....	39
3.2.1	Πολοδομικές ζώνες.....	40
3.2.2	Πυροσβεστικοί Κρουνοί.....	42
4	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EPANET .....	45
4.1	Δυνατότητες υδραυλικού μοντέλου .....	45
4.2	Στοιχεία Του Δικτύου .....	46
4.2.1	Φυσικά Στοιχεία:.....	46
4.2.2	Διασταυρώσεις – Κόμβοι (Nodes) .....	47
4.2.3	Ταμιευτήρες (Reservoirs).....	47
4.2.4	Αγωγοί (Pipes).....	47
4.2.5	Συνοπτικός πίνακας αντικειμένων. ....	49
4.3	Προσομοίωση Υδραυλικού Μοντέλου .....	52
4.4	Περιβάλλον εργασίας (Windows) EPANET .....	53
4.4.1	MENU BAR .....	54
4.4.2	Toolbars .....	55

4.4.3	Status BAR.....	56
4.4.4	Network Map .....	56
4.4.5	Data/Map Browser.....	57
4.4.6	Property Editor.....	57
4.5	Βήματα για τη χρήση του EPANET .....	58
4.6	Παράδειγμα Σχεδίασης Τυπικού Δικτύου (Windows EPANET).....	59
4.7	Γραμμή εντολών EPANET (Command line EPANET) .....	62
4.8	Αρχείο εισόδου – Input file .....	63
4.9	Αρχείο εξόδου – Output file.....	69
4.10	Σφάλματα EPANET (ERROR MESSAGES) .....	70
5	Υδραυλική ανάλυση δικτύου υπό την αστοχία αγωγών.....	75
5.1	Τρωτότητα αγωγών δικτύου διανομής.....	76
5.2	Αναπαράσταση αστοχίας.....	80
5.3	Αρνητικές Πιέσεις στο EPANET. ....	82
5.4	Διαχείριση αρνητικών πιέσεων. ....	87
5.4.1	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΝΗΤΙΚΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΜΕΣΩ EPANET. ....	90
5.5	MONTE CARLO – Σύνδεση EPANET-MATLAB.....	91
5.6	Περιγραφή Μεθοδολογίας .....	92
5.7	Περιγραφή Κώδικα .....	95
	.....	101

6	Αποτελέσματα Υδραυλικών Αναλύσεων.....	105
6.1	Αποτελέσματα πίεσης κόμβων.....	106
6.1.1	Ύψη πιέσεων για Μέση Ημερήσια Ζήτηση.....	107
6.1.2	Ύψη πιέσεων για Μέγιστη Ημερήσια Ζήτηση.....	109
6.1.3	Ύψη πιέσεων για Μέγιστη Ωριαία ζήτηση.....	111
6.2	Πιθανότητα αστοχίας κόμβων.....	113
6.2.1	Πιθανότητα αστοχίας κόμβων για Μέγιστη Ωριαία ζήτηση.....	114
6.2.2	Πιθανότητα αστοχίας κόμβων για Μέγιστη Ημερήσια ζήτηση.....	115
6.2.3	Πιθανότητα αστοχίας κόμβων για Μέση Ημερήσια ζήτηση.....	117
6.2.4	Διασπορά των πιέσεων για τις αναλύσεις Monte Carlo.....	121
6.3	Ιστογράμματα κρίσιμων κόμβων.....	122
6.3.1	Ιστογράμματα κόμβου Φ21.....	123
6.3.2	Ιστογράμματα κόμβου Φ55.....	124
6.3.3	Ιστογράμματα κόμβου Φ106.....	125
6.3.4	Ιστόγραμμα κόμβου Φ147.....	126
6.4	Μέσες παροχές δικτύου.....	127
6.4.1	Μέση παροχή για μέση ημερήσια ζήτηση.....	128
6.4.2	Μέση παροχή για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.....	130
6.4.3	Παροχή για μέγιστη ωριαία ζήτηση.....	132
6.4.4	Μεταβολή συνολική παροχής.....	133
6.5	Λειτουργικότητα Δικτύου.....	135
6.5.1	Service Ability ανά όριο πίεσης.....	136
6.5.2	Service Ability ανά σενάριο ζήτησης.....	138

7	Συμπεράσματα.....	141
7.1	Αξιοπιστία δικτύου συναρτήσει πιέσεων.....	141
7.2	Παροχευτικότητα αγωγών.....	145
7.3	Αξιολόγηση μεθοδολογίας.....	147
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	150



# 1 Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί δημόσιο αγαθό και η παρουσία του είναι καταλυτικός παράγοντας για την εύρυθμη λειτουργία και την οικονομική ανάπτυξη κάθε κοινωνίας. Ήδη από την αρχαιότητα ο ρόλος του ήταν κομβικός για την τοποθεσία και το βαθμό ανάπτυξης των σημαντικότερων αρχαίων πολιτισμών. Η ανάγκη για επαρκή υδροδότηση έχει οδηγήσει τον άνθρωπο να αναπτύξει και να βελτιώνει συνεχώς του τρόπους συλλογής και τροφοδότησης νερού για κάθε χρήση. Η σημαντικότερη χρήση νερού θα μπορούσε να χαρακτηριστεί αυτή της ύδρευσης κάτι το οποίο αναβαθμίζει παράλληλα και τη σημαντικότητα των έργων διανομής προς τους πληθυσμούς.

Η άνοδος της τεχνολογίας και της ποιότητας ζωής έχουν φέρει ως αποτέλεσμα οι απαιτήσεις ζήτησης νερού από τους καταναλωτές να έχουν αυξηθεί ακραία ενώ παράλληλα και ο τρόπος δόμησης και λειτουργίας της οικονομίας διαχωρίζει συνεχώς τη ζήτηση σε διαφορετικές κατηγορίες με διαβαθμίσεις να επηρεάζουν και την ποσότητα ζήτησης. Ιδιαίτερα στα μεγάλα αστικά κέντρα υπάρχει αναγκαιότητα επίλυσης πολύ-παραγοντικών προβλημάτων που αφορούν τον τρόπο διανομής, την ποιότητα νερού, τις λειτουργικές απαιτήσεις των καταναλωτών, τη χάραξη στρατηγικής για την διαχείριση των αποθεμάτων νερού και τη συνεχή βελτίωση των υποδομών προκειμένου να μπορούν με την πάροδο του χρόνου να ανταπεξέρχονται στα παραπάνω.

Στην ελληνική επικράτεια όπου ο οικονομικός και παραγωγικός προσανατολισμός του κράτους έχουν οδηγήσει στην έντονη αστικοποίηση τα παραπάνω προβλήματα γιγαντώνονται. Αναλογιζόμενοι ότι στην έκταση του νομού Αττικής συγκεντρώνεται το 35% του συνολικού πληθυσμού της χώρας, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι είναι αναγκαία η χάραξη ορθής στρατηγικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων και εκτέλεσης έργων ώστε να καλυφθεί με επιτυχία η τεράστια υπαρκτή ζήτηση χωρίς την καταπόνηση των έργων ύδρευσης.

Η ορθή και ολοκληρωμένη χάραξη στρατηγικής απαιτεί και την σωστή εκτίμηση για την απόκριση του συστήματος ύδρευσης σε έκτακτες περιπτώσεις όπως έντονες πλημμύρες ή

παρατεταμένες ξηρασίες. Ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη λόγω της γεωγραφικής θέσης της χώρας και συνάμα της γεωλογικής κατάστασης που επικρατεί στην ευρύτερη περιοχή της ανατολικής μεσογείου είναι η επιρροή των σεισμικών δονήσεων στην υδραυλική λειτουργία των έργων ύδρευσης.

Η εδαφική ταχύτητα και η εδαφική παραμόρφωση του εδάφους αποτελούν παραμέτρους που δύναται να οδηγήσουν στην θραύση αγωγούς αλλοιώνοντας έτσι την συνολική υδραυλική λειτουργία του δικτύου. Η πιθανότητα θραύσης των αγωγών αυξάνεται και από το γεγονός ότι στην πλειοψηφία τους τα έργα ύδρευσης και ιδιαίτερα τα δίκτυα διανομής στην Ελλάδα μετράνε χρόνια ζωής και είναι περισσότερο ευάλωτα προς τις σεισμικές δονήσεις.

Η επιρροή του σεισμού αλλά και γενικότερα οι αστοχίες αγωγών από δευτερογενή αίτια στα έργα διανομής είναι ένα πρόβλημα που έχει απασχολήσει την κοινότητα των μηχανικών τις τελευταίες δεκαετίες. Η θέση λοιπόν της Ελλάδας στον παγκόσμιο χάρτη σε ότι αφορά τις γεωλογικές συνθήκες και η διαμορφωμένη κοινωνική και οικονομική κατάσταση οδηγούν στην αναγκαιότητα μελέτης του συγκεκριμένου προβλήματος προκειμένου να είναι προσιτή η βέλτιστη διαχείριση τέτοιων γεγονότων.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη και την ανάλυση της αξιοπιστία πίεσης και παροχέτευσης μετά από σεισμική καταπόνηση που εμφανίζεται σε δίκτυο διανομής της περιοχής της Νέας Αρτάκης, βόρεια της Χαλκίδας.

## 1.1 Περιγραφή Προβλήματος.

Η σεισμικές δονήσεις μέσω της εδαφικής ταχύτητας και παραμόρφωσης που προκαλείται προκαλούν θραύση των αγωγών. Αμέσως μετά την θραύση, οι υδραυλικές συνθήκες που διαμορφώνονται στα τοπικά σημεία αστοχιών διαφοροποιούνται συγκριτικά με το υπόλοιπο δίκτυο. Ο αγωγός που καταπονείται και τελικά αστοχεί παύει να λειτουργεί με αεροστεγή τρόπο, η είσοδος αέρα στο εσωτερικό του και η διαρροές νερού προς το έδαφος μεταβάλλουν τις υδραυλικές συνθήκες από ροή υπό πίεση σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια.



Το συγκεκριμένο φαινόμενο πραγματοποιείται σε όλα τα σημεία αστοχίας. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση της αξιοπιστίας δικτύου σε ενδεχόμενο σεισμού και όχι η μελέτη μιας συγκεκριμένης σεισμικής δόνησης με δεδομένα σημεία θραύσεων, επομένως καλείται να εκφραστεί η πιθανότητα ενός μεμονωμένου αγωγού να αστοχήσει κάτω από την επίδραση εξωγενών παραγόντων (χαρακτηριστικά σεισμού) και να συμπεριληφθούν σε αυτή τη σχέση και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε αγωγού (διάμετρος, υλικό, μήκος, κτλ).

Η πολυπλοκότητα των δικτύων ύδρευσης απαιτεί την επίλυση σύνθετων μη γραμμικών συστημάτων για την υδραυλική τους ανάλυση. Την συγκεκριμένη διαδικασία καλούνται να την πραγματοποιήσουν λογισμικά προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών, συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η χρήση του λόγω της απλότητας στο χειρισμό και της ακρίβειας των υδραυλικών του αποτελεσμάτων. Η αδυναμία του συγκεκριμένου λογισμικού να πραγματοποιήσει ανάλυση σύνθετων ροών (μετατροπή ροής υπό πίεση σε ελεύθερη επιφάνεια) δημιουργεί την αναγκαιότητα αφού γίνει η μοντελοποίηση της αστοχίας ώστε να ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση, να διατυπωθεί ένας αλγόριθμος που είναι ικανός να παράγει αποτελέσματα τα οποία είναι συμβατά με τα ρεαλιστικά μεγέθη. Η παραπάνω διαδικασία είναι πολύπλοκη καθώς πρέπει να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη τις υδραυλικές παραδοχές που γίνονται στο EPANET οι οποίες όμως δεν ανταποκρίνονται στο γεγονός που μελετάται.

## 1.2 Δομή Εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 διατυπώνονται συνοπτικά οι βασικές αρχές της μηχανικής των ρευστών έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η περιγραφή τόσο της υδραυλικής λειτουργίας αλλά και του τρόπου σχεδιασμού του συνόλου των έργων ύδρευσης. Η ορθή και έγκυρη διαχείριση και ανάλυση των υδραυλικών μεγεθών ενός δικτύου προϋποθέτει την γνώση των νόμων που καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός δικτύου.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή του δικτύου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η εργασία. Πρόκειται για την μελέτη σχεδιασμού για το δίκτυο διανομής της περιοχής της Νέας Αρτάκης.

Παρουσιάζονται οι τοπολογικές συνθήκες τις περιοχής, τα χαρακτηριστικά του δικτύου και οι πολεοδομικοί κανονισμοί που διέπουν την περιοχή.

Το κεφάλαιο 4 αποτελεί ένα συμπυκνωμένο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού EPANET. Γίνεται περιγραφή των δυνατοτήτων και των παραδοχών του λογισμικού, περιγράφεται η δομή του και τα εργαλεία εργασίας ενώ προστίθεται και ένα παράδειγμα για τον τρόπο σχεδιασμού ενός απλού δικτύου.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται λεπτομερώς η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας. Γίνεται αναφορά σε όλες τις παραδοχές που ακολουθήθηκαν ενώ διατυπώνονται οι σχέσεις για την έκφραση της πιθανότητας αστοχίας του αγωγού, η διαδικασία μοντελοποίησης της θραύσης, ο τρόπος διαχείρισης των αρνητικών πιέσεων που εμφανίζονται στο EPANET ενώ προβάλλονται και διαγράμματα ροής για την καλύτερη κατανόηση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται η προβολή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Για την οπτική απεικόνιση και αποτύπωση των υδραυλικών μεγεθών έγινε χρήση του λογισμικού GIS ArcMap.

Τέλος στο κεφάλαιο 7 αποτυπώνονται τα συμπεράσματα για την υδραυλική απόκριση του δικτύου, ορίζεται η αξιοπιστία του και συνοψίζονται οι δυνατότητες για την περεταίρω ανάπτυξης της έρευνας και τα ενδεχόμενα οφέλη που μπορεί να προσδώσει.





## 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΥΔΑΤΟΣ

Η επαρκής παροχέτευση νερού σε κατάλληλη ποσότητα και ποιότητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην ανθρώπινη ιστορία. Η πλειοψηφία των αρχαίων πολιτισμών είχαν ως κοινό σημείο την εγκαθίδρυση τους σε περιοχές πλησίον υδάτινων πηγών. Η πάροδος του χρόνου και η ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού ενέτειναν την αναγκαιότητα κάλυψης των αυξημένων ζητήσεων σε νερό. Ο άνθρωπος οδηγήθηκε στην ανάγκη μεταφοράς νερού από διαφορετικές τοποθεσίες στις κοινότητες του. Για παράδειγμα οι Ρωμαίοι κατασκεύασαν υδραγωγεία για την μεταφορά νερού από μακρινές πηγές στις πόλεις τους.

Την σημερινή εποχή, οι σύγχρονες ανάγκες οδηγούν στην αναγκαιότητα κάλυψης τεράστιων ζητήσεων νερού για πολλαπλές χρήσεις. Η αναγκαιότητα αυτή επέφερε και την ανάπτυξη των επιστημών της εφαρμοσμένης υδραυλικής και της υδρολογίας.

### 2.1 Θεωρία Ροής Κλειστών (υπό πίεση) Αγωγών και Αρχές Υδραυλικής.

Υπόβαθρο για την κατανόηση της εφαρμοσμένης υδραυλικής και της συμπεριφοράς των δικτύων διανομής αποτελεί η επιστήμη της μηχανικής των ρευστών. Σε αυτή την ενότητα θα πραγματοποιηθεί αναφορά στις βασικές έννοιες της επιστήμης, θα παρουσιαστούν οι κλασσικοί νόμοι της μηχανικής και ο τρόπος που εξειδικεύονται στο πεδίο της μηχανικής των ρευστών μέσω της θεωρίας Reynolds. Απαραίτητο θεμέλιο για τη μελέτη ενός δικτύου διανομής είναι και η κατανόηση των διαφορετικών τύπων ροής που ενδέχεται να εμφανισθούν σε ένα κλειστό αγωγό καθώς και ο υπολογισμός των απωλειών ενέργειας που προκύπτουν για τα διαφορετικά είδη ροής.

#### 2.1.1 Βασικές έννοιες μηχανικής των ρευστών.

Τα παρακάτω μεγέθη αποτελούν το αλφάβητο για την κατανόηση της μηχανικής των ρευστών. Πρόκειται είτε για φυσικά χαρακτηριστικά των ρευστών όπως είναι το ειδικό βάρος ή το ιξώδες είτε για μεγέθη που χαρακτηρίζουν και περιγράφουν την μηχανική συμπεριφορά του ρευστού.

Για την κατανόηση του θεωρητικού σκέλους της παρούσας εργασίας επισυνάπτονται οι παρακάτω έννοιες.<sup>[9],[11]</sup>

- A. **Ειδικό βάρος:** είναι ο λόγος του βάρους προς τον όγκο του σώματος. Οι μονάδες μέτρησης είναι :  $t/m^3$  ,  $kg/m^3$  ,  $N/m^3$ . Υπολογίζεται από την εξίσωση  $\gamma=\rho g$  όπου  $\rho$ : πυκνότητα σώματος,  $g$  : επιτάχυνση βαρύτητας  $9,81 m/s^2$ .
- B. **Πίεση:** πρόκειται για το λόγο της κάθετης δύναμης προς την επιφάνεια. Είναι η κάθετη θλιπτική τάση, η οποία προέρχεται από την αντίστοιχη δύναμη, την οποία το ρευστό ασκεί στην επιφάνεια στοιχειώδους όγκου. Οι μονάδες της πίεσης είναι:  $t/m^2, kgf/m^2, N/m^2(=Pa)$  . Για λόγους ευκολίας ορίζεται ως ατμοσφαιρική πίεση η τιμή μηδέν.
- C. **Δυναμική συνεκτικότητα (ιξώδες)  $\mu$ :** είναι η ιδιότητα των ρευστών να παραμορφώνονται συνεχώς υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων.
- D. **Κινηματική συνεκτικότητα  $\nu$ :** είναι ο λόγος του ιξώδες προς τη πυκνότητα.
- E. **Ταχύτητα ροής  $V$ :** είναι ο λόγος της απόστασης που διανύει ένα σωματίδιο νερού προς το χρόνο. Μονάδες μέτρησης είναι :  $m/s$ . Συνήθως χρησιμοποιείται η μέση ταχύτητα διατομής.
- F. **Επιτάχυνση  $a$ :** είναι ο λόγος της μεταβολής της ταχύτητας προς το χρόνο. Μονάδες μέτρησης είναι:  $m/s^2$ .
- G. **Παροχή  $Q$ :** ορίζεται ο λόγος μεταβολής του όγκου προς το χρόνο. Μονάδες μέτρησης είναι:  $m^3/s$ . Για τους αγωγούς κυκλικής διατομής ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις :

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V \quad (1)$$

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (2)$$

- H. **Ενέργεια  $H$ :** είναι η ικανότητα του ρευστού να παράγει έργο. Συνήθως η ενέργειας της ροής λογίζεται ανά μονάδα βάρους του ρέοντος ρευστού και καλείται **ύψος ενέργειας**

**H.** Σε αυτή την περίπτωση οι μονάδες είναι μονάδες μήκους :m. Η ολική ενέργεια (ή ύψος ενέργειας) αποτελείται από:

- Δυναμική ενέργεια, λόγω θέσης, ύψους.
- Κινητική ενέργεια, λόγω ταχύτητας.
- Ενέργεια πίεσης, λόγω πίεσης.

- I. **Απώλειες Ενέργειας ή ύψους ενέργειας ΔH:** Προκαλούνται από δύο διαφορετικούς μηχανισμούς και μετρώνται σε μονάδες μήκους (m). Αποτελούνται από τις απώλειες λόγω τριβών στα στερεά όρια σε ομοιόμορφη ροή (γραμμικές) και από τις απώλειες λόγω μεταβολής σχήματος σε ανομοιόμορφη ροή (τοπικές).

### 2.1.2 Θεμελιώδεις νόμοι δυναμικής

Οι κλασσικοί νόμοι της δυναμικής για την διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας χρησιμοποιούνται και στο πεδίο της μηχανικής των ρευστών. Η χρήση τους προφανώς προϋποθέτει τη σωστή θεωρητική σύνδεση τους με τα φυσικά χαρακτηριστικά των ρευστών όπως θα επεξηγηθεί παρακάτω<sup>[8]</sup>.

- I. Η αρχή διατήρησης της μάζας προτάσσει ότι η συνολική μάζας ενός συστήματος σωμάτων διατηρείται σταθερή ανεξαρτήτως των εσωτερικών αλληλεπιδράσεων.

$$\int dm = \text{σταθερά} \rightarrow \frac{D}{Dt} \int dm = \frac{D}{Dt} \int \rho dU = 0 \quad (3)$$

- II. Η ορμή ενός σώματος είναι διανυσματικό μέγεθος που είναι ίσο με το γινόμενο της μάζας ενός σώματος επί την στιγμιαία ταχύτητα του. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, αν η συνισταμένη των εξωτερικών δυνάμεων είναι μηδέν, το διανυσματικό άθροισμα των ορμών ενός συστήματος σωμάτων παραμένει πάντα σταθερό.

$$dF = adm = \frac{DV}{Dt} dm \rightarrow F = \int adm = \int \frac{DV}{Dt} dm = \frac{D}{Dt} \int Vdm \quad (4)$$

III. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας είναι ότι το αλγεβρικό άθροισμα όλων των μορφών ενέργειας που εμφανίζονται σε ένα σύστημα διατηρείται σταθερό με την πάροδο του χρόνου. Το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα είναι μια έκφραση της διατήρησης της ενέργειας για θερμοδυναμικά συστήματα. Συγκεκριμένα η μεταβολή της ενέργειας εξαρτάται από την ενέργεια που προστίθεται στο σύστημα και το έργο που αποδίδει το σύστημα. Η παραπάνω πρόταση αποτυπώνεται στη σχέση :  $\delta Q - \delta W = dE$ . Όπου  $\delta Q$  είναι η ενέργεια που προστίθεται στο σύστημα,  $\delta W$  το έργο που αποδίδει το σύστημα και  $dE$  η μεταβολή ενέργειας του συστήματος  
Εάν η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του συστήματος είναι  $\varepsilon$ , τότε η συνολική ενέργεια  $E$  είναι:

$$E = \int \varepsilon dm, \quad \varepsilon = gh + V^2 / 2 + I$$

$gh$  = δυναμική ενέργεια (ανά μονάδα μάζας)

$V^2 / 2$  = κινητική ενέργειας (ανά μονάδα μάζας)

$I$  = εσωτερική ενέργεια (ανά μονάδα μάζας) που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ρευστού. Επομένως:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta W}{\delta t} = \frac{dE}{dt} = \frac{D}{Dt} \int \varepsilon dm = \frac{D}{Dt} \int (gh + \frac{V^2}{2} + I) dm \quad (5)$$

### 2.1.3 Θεώρημα μεταφοράς Reynolds.

Το θεώρημα μεταφοράς Reynolds είναι ένα θεμελιώδες θεώρημα το οποίο χρησιμοποιείται στην τυποποίηση των βασικών νόμων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας στην ρευστοδυναμική. [8]

Έστω  $\alpha$  η ανά μονάδα μάζας του ρευστού τιμή κάποιας ιδιότητας και  $A$  η ολική ποσότητα ιδιότητας που περιλαμβάνεται σε όγκο ρευστού  $U$  τότε:



$$A = \int adm = \int a\rho dU \quad (6)$$

Το θεώρημα μεταφοράς λέει ότι: Η ολική μεταβολή της ιδιότητας  $a$  που καταλαμβάνει σε χρονική στιγμή  $t$  όγκο  $U$  κινούμενου ρευστού, ισούται με την ανά μονάδα χρόνου μεταβολή της ιδιότητας στον όγκο αυτό, μείον την καθαρή εισροή της ιδιότητας μέσα απ' την επιφάνεια  $E$  που περιβάλλει τον όγκο αναφοράς  $U'$  και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{d}{dt} \int_U \rho a dU - \int_E (\rho a)(\underline{V} \circ d\underline{E}) \quad (7)$$

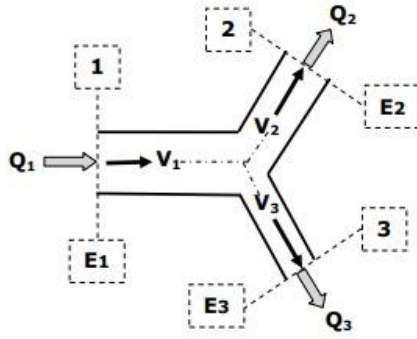
#### 2.1.4 Βασικές εξισώσεις.

Συνδυάζοντας τους θεμελιώδεις νόμους της δυναμικής με το θεώρημα μεταφοράς Reynolds, προκύπτουν οι χρηστικές εξισώσεις της μονοδιάστατης ανάλυσης του ρευστού. Οι τυποποιημένες εξισώσεις απλοποιούν αυθαίρετα τη θεωρία της κίνησης του ρευστού σε δυσδιάστατο πρόβλημα ενώ διευκολύνουν και στην κατανόηση της μακροσκοπικής υδραυλικής συμπεριφοράς ενός δικτύου διανομής. <sup>[12]</sup>

- **Εξίσωση Συνέχειας**

Η εξίσωση αυτή είναι άμεση συνέπεια της αρχής διατήρησης της μάζας. Αναφέρει ότι η παροχή παραμένει σταθερή κατά μήκος μιας φλέβας (ενός αγωγού) που διαρρέεται από υγρό. Στο παράδειγμα της εικόνας αποτυπώνεται πως η παροχή που διαρρέει τον αγωγό στην διατομή 1, ισούται με το άθροισμα των παροχών των διατομών 2 και 3.

$$\sum_1^n V_i E_i = \sum_1^n Q_i = 0 \quad (8)$$



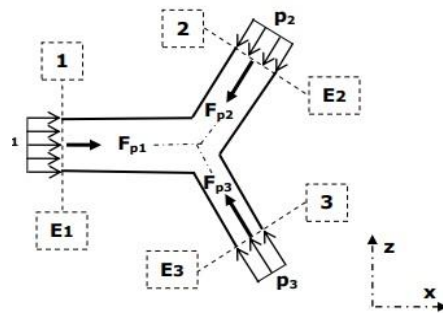
Εικόνα 1: Εξίσωση Συνέχειας

- **Εξίσωση Ποσότητας Κίνησης**

Η εξίσωση της ποσότητας κίνησης αποτελεί την έκφραση του 2<sup>ου</sup> νόμου του Νεύτωνα (εξίσωση ορμής) στο πεδίο της ρευστομηχανικής. Εκφράζει την ισότητα του συνόλου των εξωτερικών δυνάμεων που ενεργούν σε ένα σύστημα μάζας ρευστού με τις αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό.

$$-\rho \sum_1^n \beta_i V_i Q_i = \vec{F}_p + \vec{F}_\tau + \vec{F}_g \quad (9)$$

Στην εξίσωση {9} ο όρος  $\vec{F}_p$  εκφράζει τις δυνάμεις από κάθετες πιέσεις από το περιβάλλον, ο  $\vec{F}_\tau$  τις δυνάμεις από διατμητικές τάσεις από το περιβάλλον και ο  $\vec{F}_g$  τις καθολικές δυνάμεις



Εικόνα 2: Εξίσωση ποσότητας κίνησης

από το πεδίο βαρύτητας ενώ στο αριστερό σκέλος εμφανίζονται οι αδρανειακές δυνάμεις με θετικό πρόσημο για τις διατομές εισόδου και αρνητικό για τις διατομές εξόδου. Ο όρος  $\beta$  λέγεται συντελεστής συνόρθωσης ποσότητας κίνησης

- **Εξίσωση Ενέργειας**

Η εξίσωση της ενέργειας είναι έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Μετά από τυποποίηση της σχέσης (5) προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις. Η σχέση 11 εκφράζει την ενέργεια του ρευστού σε κάποιο σημείο του πεδίου ροής και ισούται με το άθροισμα τριών μηκών. Με  $H_i$  συμβολίζεται το μέσο ύψος της μηχανικής ενέργεια,  $h_i$  είναι το ύψος μηχανικής

ενέργειας λόγω θέσης,  $\frac{p_i}{\gamma}$  το ύψος πίεσης και  $\alpha_i \frac{V_i^2}{2g}$  το ύψος της κινητικής ενέργειας. Η

εξίσωση 10 αποτυπώνει τη σχέση της ενέργειας ανάμεσα σε δύο διατομές του αγωγού, όπου το ύψος της μηχανικής ενέργειας στη διατομή 1, είναι ίσο με τη μηχανική ενέργεια στη διατομή 2 αυξανόμενο κατά το μήκος των απωλειών λόγω τριβής και του μανομετρικού ύψους.

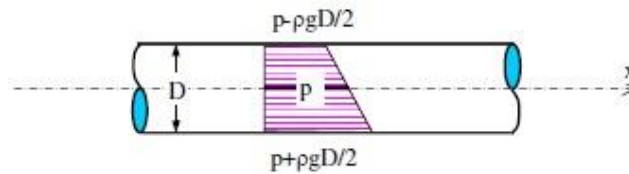
$$H_1 = H_2 \pm H_\mu + \Delta H_{\alpha(1-2)} \quad (10)$$

$$H_i = h_i + \frac{p_i}{\gamma} + \alpha_i \frac{V_i^2}{2g} \quad (11)$$

### 2.1.5 Κατηγορίες ροής υπό πίεση.

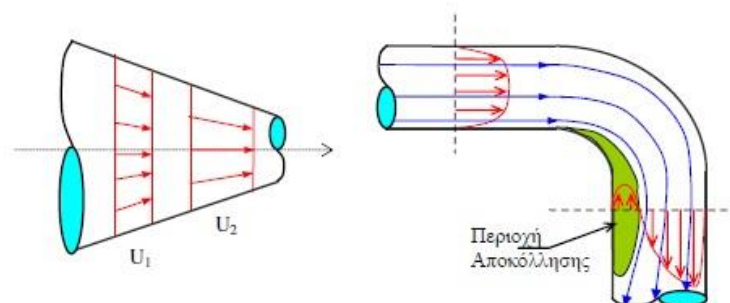
Η έννοια της **ροής υπό πίεση** σηματοδοτεί ότι το ρευστό καλύπτει ολόκληρη τη διατομή του αγωγού (τα όρια των γραμμών ροής συμπίπτουν με τα τοιχώματα του αγωγού), ενώ η πίεση είναι διαφορετική από την ατμοσφαιρική και κατανέμεται υδροστατικά, κάθετα στις γραμμές ροής. Υδροστατική κατανομή της πίεσης εμφανίζεται στην περιοχή μόνιμης και ομοιόμορφης ροής (Εικόνα 3) που είναι η περισσότερο συνηθισμένη περίπτωση ροής σε αγωγούς υπό πίεση. **Μόνιμη** (η ροή στην οποία η παροχή σε δεδομένη διατομή παραμένει αμετάβλητη στο χρόνο) και **ομοιόμορφη ροή** ορίζεται η ροή που πραγματοποιείται σε αγωγούς ικανού μήκους για την

οποία οι γραμμές ροής είναι παράλληλες μεταξύ τους, η ταχύτητα είναι σταθερή κατά μήκος μιας γραμμής ροής και η πίεση κατανέμεται υδροστατικά.



Εικόνα 3: Υδροστατική κατανομή των πιέσεων σε αγωγό με μόνιμη ροή [8].

Σε περιοχές αλλαγής διαμέτρου του αγωγού ή σε καμπύλες αγωγών (Εικόνα 4) (οριζοντιογραφικές ή σε μηκοτομή αλλαγής κατεύθυνσης του αγωγού) συναντιέται **μόνιμη ανομοιόμορφη ροή**, δηλαδή ροή στην οποία το διάνυσμα της ταχύτητας μεταβάλλεται κατά μήκος της γραμμής ροής. Η μόνιμη ανομοιόμορφη ροή διακρίνεται σε επιταχυνόμενη (συγκλίνουσα) ροή, επιβραδυνόμενη (αποκλίνουσα) ροή ή ροή σε καμπύλη.



Εικόνα 4: Ανομοιόμορφη ροή σε αγωγό με μεταβολή διατομής και αλλαγή κατεύθυνσης [8].

**Μη μόνιμη** ονομάζεται η ροή στην οποία η παροχή είναι συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή  $Q=Q(t)$ . Εφόσον οι μεταβολές της παροχής στο χρόνο είναι αργές, η ροή μελέτης μπορεί να θεωρηθεί σαν μόνιμη σε δεδομένες χρονικές στιγμές, μόνο όταν παρατηρηθεί απότομη αλλαγή παροχής (π.χ απότομο κλείσιμο δικλείδας) υπάρχουν μεγάλες επιδράσεις στα χαρακτηριστικά της ροής.

Μια ακόμα κατηγοριοποίηση της ροής υπό πίεση χαρακτηρίζεται από δυναμική άποψη και σχετίζεται με τον αριθμό Reynolds ( $Re$ ), ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (12)$$

όπου  $V$  είναι η μέση ταχύτητα ροής,  $D$  διάμετρος αγωγού και  $\nu = \mu/\rho$  είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Η διαφοροποίηση γίνεται εν συγκρίσει με την «κρίσιμη» τιμή του αριθμού Reynolds, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία της διατομής. Για κυκλικούς αγωγούς η κρίσιμη τιμή είναι περίπου 2000-2300. Εφόσον η τιμή Reynolds είναι μικρότερη από τη κρίσιμη τιμή, η ροή ονομάζεται **Στρωτή**, ενώ αν είναι μεγαλύτερη λέγεται **Τυρβώδης**. Οι αγωγοί ενός δικτύου διανομής έχουν εσωτερική διάμετρο τουλάχιστον 80mm, η παροχή που μεταφέρουν είναι της τάξης μερικών L/s και ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται από 100000 έως μερικά εκατομμύρια. Είναι φανερό πως στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η μελέτη γίνεται για τυρβώδης ροή.

#### 2.1.6 Απώλεια ενέργειας λόγω τριβών – Εξίσωση Darcy Weisbach.

Από την μελέτη της περίπτωσης ομοιόμορφης ροής, πλήρως ανεπτυγμένης, αξονοσυμμετρικής και τυρβώδης σε κεκλιμένο σωλήνα, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις συνέχειας, ποσότητας κίνησης και ενέργειας [βλ. ενότητα 2.1.4] προέκυψε η εξίσωση Darcy Weisbach που συσχετίζει τις γραμμικές απώλειες ή την πίεση με το συντελεστή απωλειών του αγωγού, συναρτήσει του μήκους του αγωγού, της ταχύτητας και της παροχής <sup>[8][9][11]</sup>.

Οι εκφράσεις της εξίσωσης Darcy Weisbach είναι:

$$h_f = f \frac{1}{2g} \frac{LV^2}{D} \quad (13)$$

$$h_f = f \frac{8}{g\pi^2} \frac{LQ^2}{D^5} \quad (14)$$

όπου  $h_f$  είναι οι γραμμικές απώλειες,  $f$  ο συντελεστής τριβών,  $V$  η μέση ταχύτητα αγωγού,  $L$  το μήκος του αγωγού και  $D$  η διάμετρος του αγωγού

Επίσης ορίζεται και η κλίση της γραμμής ενέργειας  $J_E$  ροής ως:

$$J_E = \frac{fV^2}{D2g} \quad (15)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβών  $f$ , χρειάζεται ο προσδιορισμός της κατανομής των ταχυτήτων στον αγωγό και ο συσχετισμός τάσης στο όριο με την κατανομή των ταχυτήτων τόσο στη στρωτή όσο και στην τυρβώδη ροή.

Η συνηθέστερη σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβών είναι η Colebrook-White, παρόλα αυτά υπάρχουν και άλλες εμπειρικές σχέσεις που η χρήση τους εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds (την κατάσταση της ροής).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,01 \log\left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{2.51}{R\sqrt{f}}\right) \quad (16)$$

Όπου  $k_s$  ο συντελεστής ισοδύναμης τραχύτητας και  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα που ισούται με  $1.14 \times 10^{-6}$ , σε θερμοκρασία  $15^\circ\text{C}$

Παλιότερα για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών σε σωλήνες, οι μηχανικοί χρησιμοποιούσαν την εμπειρική σχέση των Hazen – Williams.

$$hf = \frac{6.79L}{D^{1.16}} \left(\frac{V}{C}\right)^{1.85} \quad (17)$$

Στην παρούσα εργασία, η χρήση του λογισμικού EPANET δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του συντελεστή τριβών όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.2.4

### 2.1.7 Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή- Τοπικές απώλειες.

Προαναφέρθηκε [βλ. ενότητα 2.1.5] ότι ανομοιόμορφη ροή χαρακτηρίζεται αυτή στην οποία το διάνυσμα της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ροής μεταβάλλεται (κατά μέγεθος, κατά διεύθυνση ή και τα δύο). Μεταβολές των στερεών ορίων της ροής επιτυγχάνονται με μεταβολή

της διατομής, με μεταβολή της κατεύθυνσης, με τη παρεμβολή μετρητικών συσκευών (π.χ μετρητές Venturi) ή συσκευών ελέγχου της ροής (π.χ δικλείδες)<sup>[12][8]</sup>.

Αυτές οι γεωμετρικές μεταβολές προκαλούν απώλειες ενέργειας λόγω παραγωγής τύρβης. Η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα από την επενέργεια του ιξώδους στην περιοχή της τύρβης. Οι απώλειες αυτές ονομάζονται τοπικές. Εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους σε σχέση με τις γραμμικές απώλειες ονομάζονται και δευτερεύουσες. Επιτρέπεται η παράλειψη τους κατά τους υπολογισμούς εκτός και αν πρόκειται για απώλειες λόγω λειτουργίας δικλείδων. Οι απώλειες λόγω ανομοιόμορφης ροής – τοπικές απώλειες εκφράζονται γενικώς ως:

$$h_t = \frac{k_t V^2}{2g} \quad (18)$$

Όπου  $k_t$ : ο αδιάστατος συντελεστής τοπικών απωλειών,  $V$ : χαρακτηριστική ταχύτητα

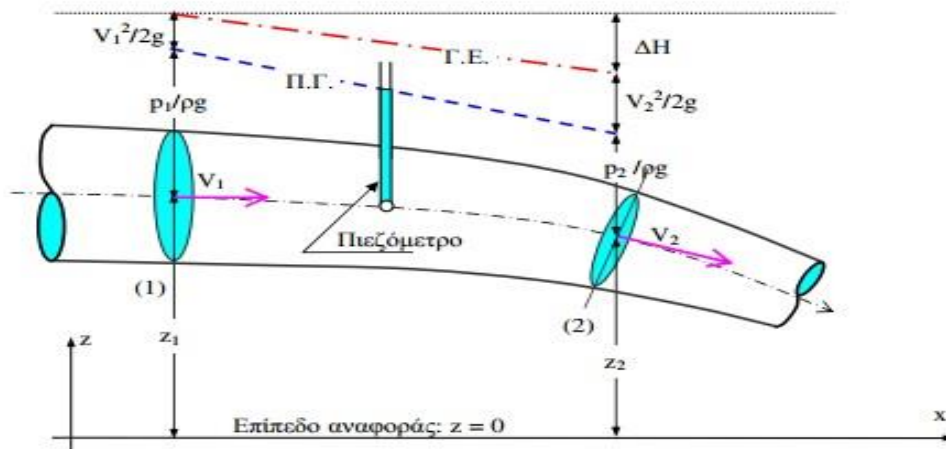
#### 2.1.8 Γραμμή Ενέργειας – Πιεζομετρική Γραμμή.

Η γραμμή ενέργειας και η πιεζομετρική γραμμή θα μπορούσαν να θεωρηθούν από τα πολυτιμότερα εργαλεία για την απόκτηση μιας πολύ παραστατικής εικόνας των σχετικών συνθηκών ροής και για την άντληση πληροφοριών. Πρόκειται για γραφική απεικόνιση της εξίσωση ενέργειας, δηλαδή του ενεργειακού ύψους (ενέργεια ανά μονάδα βάρους του ρευστού που ρέει, με διαστάσεις μήκους) σε κάποια διατομή ενός αγωγού που ορίστηκε από τη σχέση (11):

$$H_i = h_i + \frac{p_i}{\gamma} + \alpha_i \frac{V_i^2}{2g}$$

όπου  $h_i$  το υψόμετρο του άξονα από το επίπεδο αναφοράς,  $p_i/\gamma$  το πιεζομετρικό ύψος στον άξονα,  $V^2/2g$  το ύψος της κινητικής ενέργειας και  $\Delta H$  το ύψος απωλειών ενέργειας μεταξύ των διατομών (1) και (2).

Η απόσταση  $H$  από το επίπεδο αναφοράς για κάθε σημείο του αγωγού, ορίζει μια γραμμή που ονομάζεται **Γραμμή Ενέργειας (ΓΕ)**. Η απόσταση  $H - V^2/2g = z + p/\gamma$ , ορίζει μια γραμμή που ονομάζεται **Πιεζομετρική Γραμμή (ΠΓ)** του αγωγού. Η ΓΕ και η ΠΓ σε ομοιόμορφο αγωγό είναι ευθείες παράλληλες μεταξύ τους με αρνητική κλίση (κατά τη διεύθυνση ροής) ως προς την οριζόντια. <sup>[12][8]</sup>



Εικόνα 5 Παράδειγμα Γραμμής ενέργειας- Πιεζομετρικής γραμμής <sup>[9]</sup>

## 2.2 Γενική Διάταξη Υδρευτικών Έργων.

Τα δίκτυα διανομής ύδατος σε συνδυασμό με τα έργα εξωτερικού υδραγωγείου αποτελούν το σύνολο των έργων ύδρευσης, με σκοπό την εξασφάλιση του απαιτούμενου νερού, σε επαρκή ποσότητα και κατάλληλη ποιότητα καθώς και η μεταφορά και διανομή του με υψηλή αξιοπιστία σε οικιστικές περιοχές για την εξυπηρέτηση των ανθρώπινων αναγκών σε νερό. Η διαφοροποίηση των δικτύων διανομής και των έργων εξωτερικού υδραγωγείου έγκειται στη τοποθεσία που αναπτύσσονται και κυρίως στο τρόπο μεταφοράς του ύδατος. Το όριο ανάμεσα στα δύο υποσυστήματα αποτελεί η δεξαμενή <sup>[6]</sup>.

- **Έργα εξωτερικού υδραγωγείου ή υδροδοτικά έργα:** Παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ως προς τα τεχνολογικά τους χαρακτηριστικά (γενική διάταξη, εξοπλισμό, υλικά) και την υδραυλική τους (ροή με ελεύθερη επιφάνεια ή υπό πίεση). Η ανάπτυξη τους

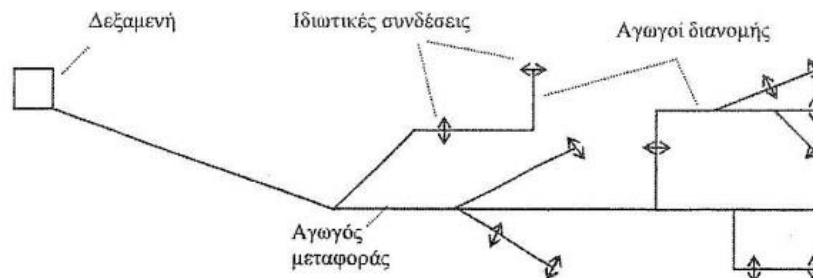


πραγματοποιείται κυρίως εκτός των αστικών περιοχών και περιλαμβάνει έργα συλλογής του νερού στις πηγές (υδατικοί πόροι) και μεταφοράς του στις παρυφές της αστικής περιοχής.

- **Δίκτυα διανομής:** Αποτελούν πάντα πλέγματα αγωγών που λειτουργούν υπό πίεση, η κατασκευή τους λαμβάνει χώρα στο σύνολο της αστικής περιοχής προκειμένου να εξασφαλιστεί η διανομή επεξεργασμένου νερού από τις δεξαμενές σε πολλαπλά σημεία προορισμού (καταναλωτές) της αστικής περιοχής. Σε ένα δίκτυο διανομής γίνεται κατηγοριοποίηση των αγωγών ανάλογα με τις παροχές που καλούνται να παροχετεύουν. Οι αγωγοί που έχουν αφετηρία τη δεξαμενή και καταλήγουν στο πέρας του οικισμού, μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες νερού, συνήθως έχουν μεγάλα μήκη και διαμέτρους, ονομάζονται **αγωγοί τροφοδοσίας ή μεταφοράς**. Οι σωλήνες που αναλαμβάνουν την μεταφορά νερού προς τους καταναλωτές στην περιοχή του οικισμού λέγονται **διανομής**. Τέλος υπάρχουν και οι **αγωγοί ιδιωτικών συνδέσεων** που αποσκοπούν στην μεταφορά του νερού από τον αγωγό διανομής προς το εσωτερικό των κτηρίων.

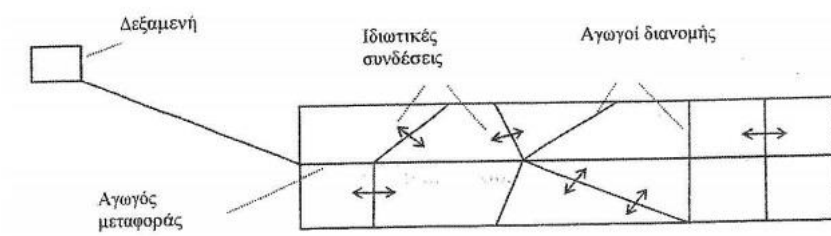
Ανάλογα με τη διάταξη των αγωγών διακρίνονται δύο τύποι δικτύων<sup>[7]</sup>.

1. **Ακτινωτό δίκτυο:** Έχει δενδρώδη μορφή σαν υδραγραφικό δίκτυο []. Το βασικό του χαρακτηριστικό του αποτελεί το γεγονός ότι σε κάθε σημείο του οικισμού το νερό έρχεται από μια κατεύθυνση και μόνο. Αυτό αποτελεί και το βασικό του μειονέκτημα, καθώς σε περίπτωση βλάβης σε κάποιο σημείο, η ύδρευση διακόπτεται αναγκαστικά σε ολόκληρο το κατάντη τμήμα του οικισμού.



Εικόνα 6: Ακτινωτό δίκτυο

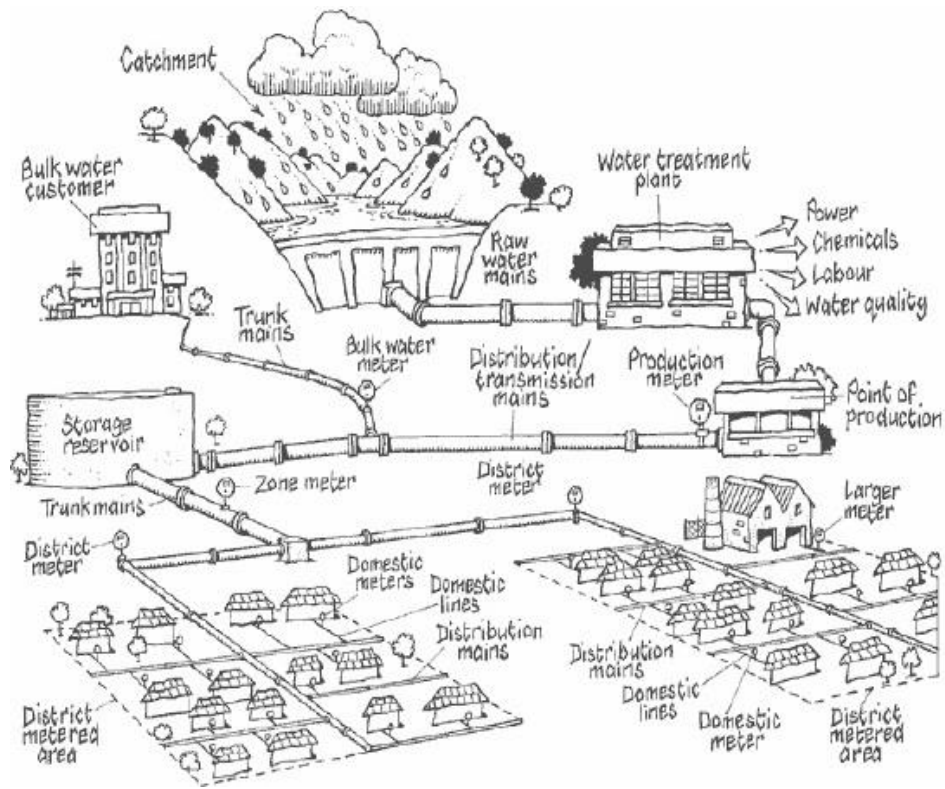
2. Βροχωτό ή κυκλοφορικό δίκτυο: Αποτελεί σύγχρονη μέθοδο σχεδιασμού των δικτύων διανομής. Η μορφή του είναι κλειστού συστήματος σαν βρόχος [Εικόνα 7] προκειμένου σε κάθε σημείο του οικισμού το νερό να παροχετεύεται τουλάχιστον από δύο κατευθύνσεις. Το υψηλό κόστος θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μειονέκτημα αλλά δεν υπάρχει εναλλακτική για μεγάλα αστικά κέντρα.



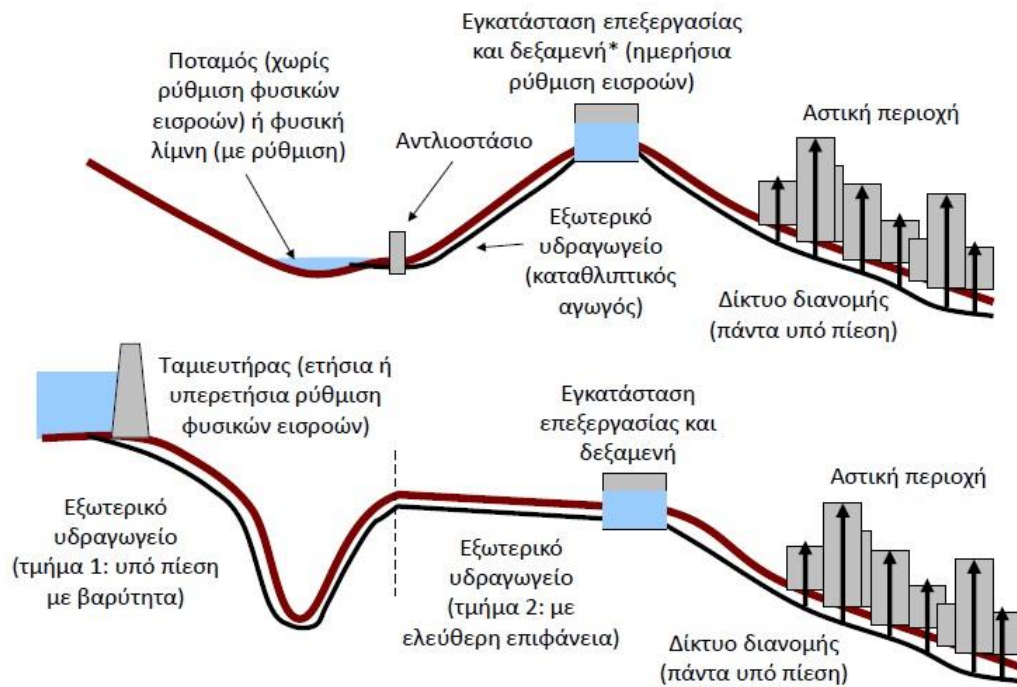
Εικόνα 7: Βροχωτό δίκτυο

- **Δεξαμενή:** Όπως προαναφέρθηκε αποτελεί το όριο ανάμεσα στα έργα εξωτερικού υδραγωγείου και τα δίκτυα διανομής. Για λόγους οικονομίας και ασφάλειας τοποθετείται σε μεγάλο υψόμετρο όσο γίνεται πιο κοντά στην αστική περιοχή. Εκτελεί τρεις βασικές λειτουργίες που αφορούν:
  - i. Ρύθμιση της παροχής σε 24ωρη βάση. Ανάντη της δεξαμενής η παροχή είναι σταθερή, ενώ κατάντη ρυθμίζεται ανάλογα των διακυμάνσεων της ζήτησης.
  - ii. Ρύθμιση της πίεσης στα κατάντη.
  - iii. Αποθήκευση νερού για έκτακτες ανάγκες (βλάβη υδραγωγείου, πυρκαγιά)

Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται σκίτσο με τυπική διάταξη ενός έργου ύδρευσης, το οποίο περιέχει ταμιευτήρα για τη συλλογή του νερού, μονάδα επεξεργασίας νερού, υδροηλεκτρικό έργο παραγωγής ενέργειας, βιομηχανική περιοχή (καταναλωτή μεγάλου όγκου νερού), αποθηκευτική δεξαμενή, δίκτυο διανομής.



Εικόνα 8: Τυπική διάταξη έργων ύδρευσης (1/2)



Εικόνα 9: Τυπική διάταξη έργων ύδρευσης (2/2)]. <sup>(4)</sup>

### 2.2.1 Λειτουργικές απαιτήσεις δικτύου.

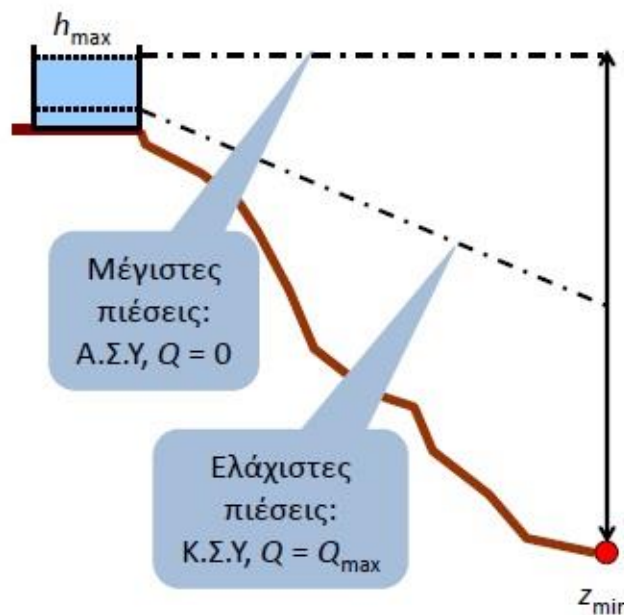
Προκειμένου να εξασφαλισθεί τόσο η παροχέτευση νερού προς όλους τους καταναλωτές αλλά και η προστασία των υδραυλικών εγκαταστάσεων, τίθεται κατώτατο και ανώτατο όριο πίεσης.<sup>[6]</sup>

Η **ελάχιστη πίεση εκροής** των λήψεων σε εσωτερικές υδραυλικές εγκαταστάσεις κυμαίνεται από 0.4 έως 1.2atm <sup>[10]</sup>, συνεπώς στο υψηλότερο σημείο των κτηρίων πρέπει να εξασφαλίζεται ύψος πίεσης τουλάχιστον 4m. Εμπειρικός κανόνας προσδιορίζει την ελάχιστη πίεση ανά όροφο (θεωρώντας τυπικό ύψος ορόφου 3m και υδραυλικές απώλειες ανά όροφο 1m) ίση με  $4(n+1)$ . Συχνά, αντί της παραπάνω εμπειρικής σχέσης, το ελάχιστο όριο πίεσης ορίζεται από τον κανονισμό του δικτύου ύδρευσης. Για παράδειγμα στον κανονισμό της ΕΥΔΑΠ προβλέπεται η εξασφάλιση πίεσης τουλάχιστον 2 atm, με ενδεχόμενη πτώση της πίεσης για ορισμένο χρονικό

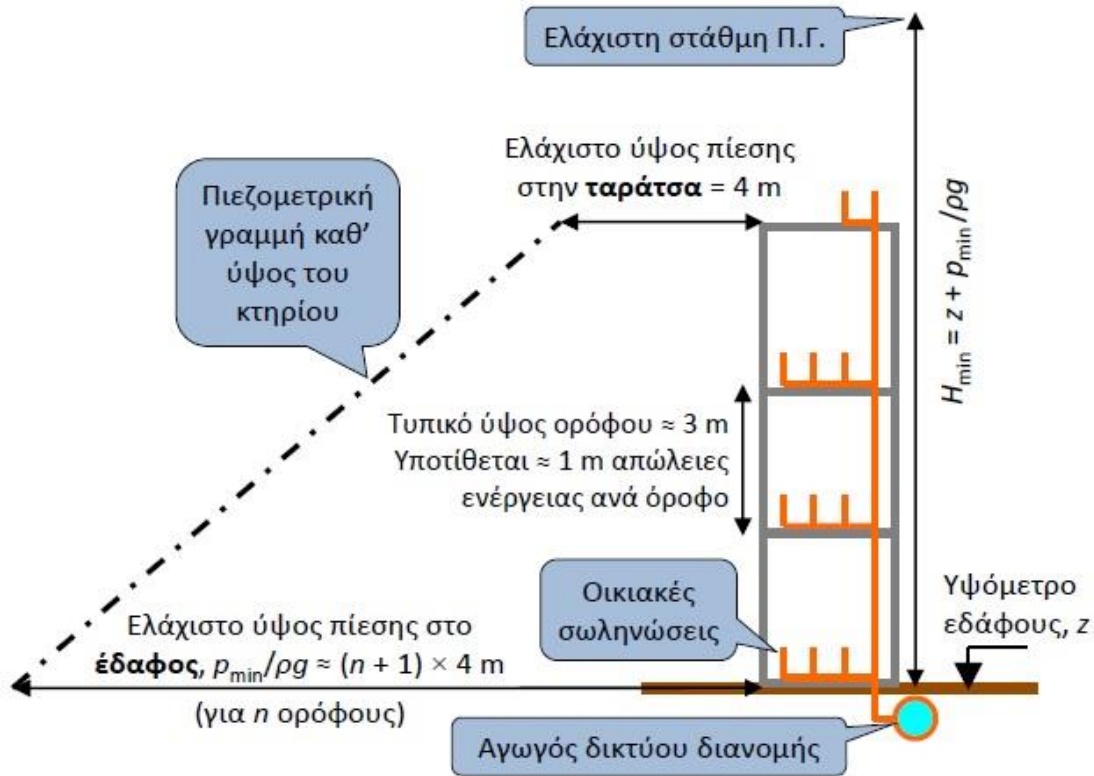
διάστημα σε περιπτώσεις βλάβης ή επισκευής των εγκαταστάσεων της ΕΥΔΑΠ. Η συγκεκριμένη πίεση προκύπτει για μέγιστη παροχή στο δίκτυο και κατώτατη στάθμη ύδατος της δεξαμενής.

Η **μέγιστη πίεση** στο δίκτυο που αντιστοιχεί σε μηδενική φόρτιση (οριζόντια πιεζομετρική γραμμή) και σε ανώτατη στάθμη ύδατος αναφέρεται στα χαμηλότερα σημεία  $z_{min}$  του δικτύου, δεν πρέπει να υπερβαίνει θεωρητικά τα 60-70m ( $p_{max} / \gamma = AΣΥ - z_{min}$ ). Εξαιτίας των νυκτερινών παροχών που είναι σημαντικές (ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα) κρίνεται υπερβολικά συντηρητική η υπόθεση της οριζόντιας πιεζομετρικής γραμμής, επομένως γίνονται δεκτά μεγαλύτερα όρια (π.χ όριο ΕΥΔΑΠ 120m).

Είναι πιθανόν λόγω της μορφολογίας του εδάφους, τα δύο κριτήρια να μη καλύπτονται σε ορισμένες περιπτώσεις οικισμών, τότε γίνεται χωρισμός του δικτύου σε υδραυλικά ανεξάρτητες πιεζομετρικές ζώνες.



Εικόνα 10: Σχηματοποίηση Μέγιστης-Ελάχιστης πίεσης [6]



Εικόνα 11: Ελάχιστη πίεση συναρτήσει του αριθμού των ορόφων <sup>[6]</sup>

### 2.3 Μεγέθη Σχεδιασμού Δικτύου Διανομής.

Η διαστασιολόγηση των αγωγών του δικτύου διανομής γίνεται με βάση τις συνθήκες κατανάλωσης της δυσμενέστερης ημέρας και ώρας **-μέγιστη ωριαία κατανάλωση-** του έτους σχεδιασμού (μεγιστοποίηση ζήτησης για τις συνήθεις χρήσεις με ταυτόχρονη εκδήλωση πυρκαγιάς)<sup>[6]</sup>. Για τον υπολογισμό της παροχής αιχμής πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν την αστική χρήση νερού ανά περιοχή και ανά περίοδο. Συνιστώσες της συνολικής ζήτησης είναι η οικιακή χρήση του μόνιμου πληθυσμού, η εποχιακή οικιακή ή τουριστική χρήση για τις παραθεριστικές περιοχές, η βιομηχανική χρήση, η δημόσια χρήση νερού για χώρους πρασίνου ή δημόσιες υπηρεσίες, η μη οικιακή γεωργική χρήση για μικρής κλίμακας καλλιέργειες, η χρήση για πυρόσβεση και οι απώλειες κατά τη μεταφορά και τη διανομή του νερού.

Υπάρχουν βέβαια και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη χρήση του νερού που είναι είτε αντικειμενικοί όπως οι κλιματικές συνθήκες και η διαθεσιμότητα και ποιότητα του νερού είτε υποκειμενικοί όπως το βιοτικό και μορφωτικό επίπεδο, η τεχνολογία των οικιακών συσκευών, η τιμολογιακή πολιτική και άλλα θεσμικά μέτρα της διαχείρισης των υδάτων.

Η εκτίμηση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης για οικιακή και τουριστική χρήση υπολογίζεται συναρτήσει της ειδικής (μέση κατά κεφαλή) κατανάλωση  $q$  και του πληθυσμού  $\Pi$ , που αναφέρεται στο πέρας της ωφέλιμης ζωής των έργων ύδρευσης (περίπου 40 έτη).

$$Q_t = q\Pi \quad (19)$$

Παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση του πληθυσμού αντλούνται από στατιστικά στοιχεία (απογραφές μαθητών, καταναλώσεις ρεύματος, εγγραφές-διαγραφές από δημοτολόγια, κτλ). Επίσης ποιοτικά στοιχεία που αφορούν μεταβολές σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο συσχετίζονται με τις εκτιμήσεις.

Τα μοντέλα τα οποία δύναται να εκτιμήσουν το μέγεθος του πληθυσμού μετά από  $t$  έτη είναι:

Της γραμμικής αύξησης:

$$\Pi_t = \Pi_o + at \quad (20)$$

Της γεωμετρικής αύξησης

$$\Pi_t = \Pi_o(1+b)^t \quad (21)$$

Της λογιστικής καμπύλης

$$\Pi_t = \Pi_k / (1 + me^{-nt}) \quad (22)$$

Όπου  $\Pi_o$  ο πληθυσμός αφετηρίας,  $\Pi_t$  ο πληθυσμός μετά από  $t$  έτη,  $\Pi_k$  ο πληθυσμός κορεσμού και  $a, b, m, n$  παράμετροι που εκτιμώνται με βάση ιστορικά δεδομένα δύο ή τριών πρόσφατων απογραφών.

### 2.3.1 Εκτίμηση χρήσιμων χαρακτηριστικών μεγεθών

Με τη χρήση συντελεστών ομοιομορφίας και την εκτίμηση παραμέτρων κατανάλωσης υπολογίζονται ορισμένα μεγέθη τα οποία είναι απαραίτητα είτε για τη διαστασιολόγηση των έργων διανομής είτε για την εποπτεία του συστήματος υδροδότησης και τη χάραξη πολιτικής για το νερό.

1. Ο ετήσιος όγκος νερού  $V_a$  εκτιμάται από τη σχέση:

$$V_a = Q_E T_a \quad (23)$$

Με  $T_a$  η διάρκεια μέσα στο έτος στην οποία πραγματοποιείται η υπόψη χρήση

2. Η μέγιστη ημερήσια παροχή  $Q_H$  εκτιμάται από τη σχέση:

$$Q_H = \lambda_H Q_E \quad (24)$$

Όπου  $\lambda_H$  συντελεστής ανομοιομορφίας, διαφορετικός για κάθε χρήση ( $\lambda_H \geq 1$ )

3. Ο μέγιστος ημερήσιος όγκος  $V_H$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_H = Q_H T_H \quad (25)$$

Όπου  $T_H$  η διάρκεια της ημέρας.

4. Η μέγιστη ωριαία παροχή  $Q_\Omega$  εκτιμάται από τη σχέση

$$Q_\Omega = \lambda_\Omega Q_H \quad (26)$$



Όπου συντελεστής ανομοιομορφίας  $\lambda_{\Omega}$ , διαφορετικός για κάθε χρήση ( $\lambda_{\Omega} \geq 1$ ).

Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών για κάθε χρήση, τα παραπάνω μεγέθη προστίθενται (εφόσον οι χρήσεις εκδηλώνονται την ίδια χρονική περίοδο) και προκύπτουν οι αντίστοιχοι όγκοι και παροχές σχεδιασμού.

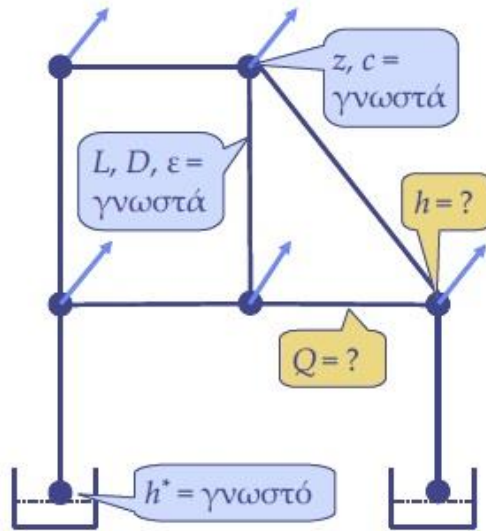
Ο συντελεστής ημερήσιας αιχμής  $\lambda_H$  για αστικά κέντρα ισούται με 1,5, για οικισμούς με εποχιακό πληθυσμό υπερβαίνει τη τιμή 2, ενώ για περιοχές με σημαντική ανάπτυξη κήπων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2 και 3. Για τουριστική-παραθεριστική χρήση ισχύει ότι  $\lambda_H < 1,5$  ενώ για βιομηχανίες ο συντελεστής λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα.

Αντίστοιχα ο συντελεστής ωριαίας αιχμής  $\lambda_{\Omega}$  για οικιακή χρήση ισούται με  $1.5 \div 2.5$ , για μικρούς οικισμούς που έχουν ελάχιστες νυκτερινές καταναλώσεις  $\lambda_{\Omega} = 3$  ενώ για τουριστική  $\lambda_{\Omega} = 1,5$ . Τέλος για τη βιομηχανική χρήση ο συντελεστής ωριαίας αιχμής υπολογίζεται συναρτήσει των ωρών λειτουργίας ανά ημέρα  $\lambda_{\Omega} = 24/T_B$ .

Στον σχεδιασμό, τα αθροιστικά μεγέθη των παροχών  $Q_{\Omega}$  και  $Q_H$  προσαυξάνονται με βάση το αναμενόμενο ποσοστό απωλειών κατά τη μεταφορά και διανομή νερού. Στα δίκτυα διανομής ένα ποσοστό νερού της τάξης του 20-30% «χάνεται» λόγω φυσικών (π.χ διαρροές) ή πλασματικών απωλειών (π.χ παράνομες συνδέσεις).

## 2.4 Διαδικασία Προσομοίωσης και Υδραυλικής ανάλυσης δικτύου.

Η ακριβής αναπαράσταση του δικτύου τόσο της φυσικής του απεικόνισης όσο και της μαθηματικής περιγραφής της υδραυλικής του λειτουργίας προϋποθέτει στάδια. Αρχικό στάδιο αποτελεί η διαδικασία της σχηματοποίησης του δικτύου, με τον ορισμό των συνιστωσών ενός γραφήματος (κόμβοι, κλάδοι) να αντιστοιχούν στις φυσικές συνιστώσες του δικτύου (σημεία εισόδου-εξόδου νερού, αγωγοί, ταμιευτήρες, κτλ). Αυτό αποτελεί θεμελιώδη παραδοχή της αναπαράστασης δικτύου δηλαδή ότι οι κόμβοι αναπαριστούν σημειακές καταναλώσεις νερού.

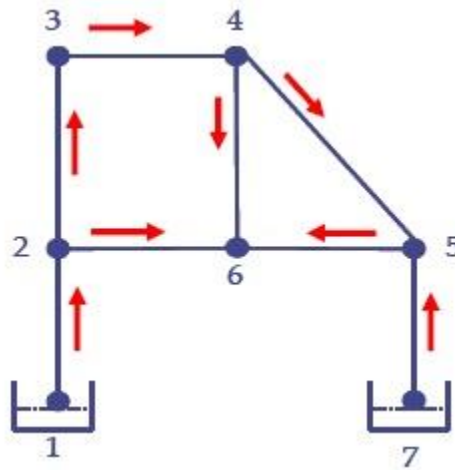


Εικόνα 12: Εννοιολογική αναπαράσταση δικτύων διανομής <sup>[6]</sup>

Η υδραυλική λειτουργία του δικτύου αναλύεται με ένα σύνολο εξισώσεων που αποτελούν τη μαθηματική περιγραφή. Παράμετροι αποτελούν τα τοπολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου (τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής, υψόμετρο κόμβων, χαρακτηριστικά αγωγών και οι ειδικές συνθήκες). Όριο για την μαθηματική επίλυση (υδραυλική ανάλυση) είναι οι : 1) αρχικές συνθήκες του δικτύου, δηλαδή η αρχική στάθμη των δεξαμενών/ταμιευτήρων που εισάγονται ως βασικά δεδομένα εισόδου και 2) οι σημειακές καταναλώσεις στους κόμβους που δύναται είτε να είναι σταθερές είτε να μεταβάλλονται χρονικά. Η διατύπωση της μαθηματικής περιγραφής επομένως, περιλαμβάνει ως στοιχεία εισαγωγής: τα γνωστά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών (μήκος, εσωτερική διάμετρος, τραχύτητα), τα γνωστά τοπογραφικά υψόμετρα και τις παροχές εξόδου ανά κόμβο, τα γνωστά ενεργειακά υψόμετρα των σημείων ελέγχου της πιεζομετρικής γραμμής (δεξαμενές, φρεάτια) ενώ εξάγει δεδομένα για τα ενεργειακά υψόμετρα σε όλους τους κόμβους και τις διερχόμενες παροχές σε όλους τους κλάδους. Η επίλυση των εξισώσεων δηλαδή η υδραυλική ανάλυση γίνεται σε συνθήκες σταθερής-στιγμιαίας κατανάλωσης, ενώ οι διαδοχικές επιλύσεις δικτύου σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ζήτησης αποτελούν τη προσομοίωση του δικτύου <sup>[6]</sup>.

### 2.4.1 Τοπολογία δικτύων – Θεμελιώδεις σχέσεις.

Σε ένα δίκτυο  $n$  κόμβων,  $m$  κλάδων και  $r$  βρόχων ισχύει η θεμελιώδης σχέση:  $m = n + r - 1$  ενώ αν το δίκτυο είναι ακτινωτό [βλ.ενότητα 2.2] η σχέση απλοποιείται σε  $m = n - 1$ . Αν στο δίκτυο υπάρχουν  $n_0$  κόμβοι γνωστού ενεργειακού υψομέτρου, θεωρούνται  $n_0 - 1$  επιπλέον ιδεατοί βρόχοι, τοποθετώντας εικονικούς κλάδους μηδενικής παροχής που συνδέουν τα σημεία αυτά ανά δύο, οπότε ισχύει (δεν καταμετρώνται οι εικονικοί κλάδοι) :  $m = n + r - n_0$ .



Εικόνα 13: Δίκτυο 7 κόμβων, 8 κλάδων, 2 βρόχων [6]

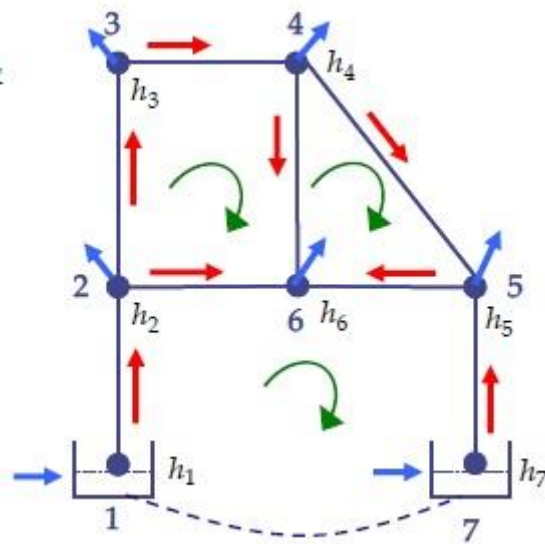
### 2.4.2 Εξισώσεις διατήρησης ενέργειας βρόχων.

Εφαρμόζοντας τη θεμελιώδη αρχή διατήρησης την ενέργειας [βλ.ενότητα 2.1.2] κατά μήκος των βρόχων του δικτύου, διατυπώνεται η γενικευμένη σχέση:

$$\sum k_{ij} Q_{ij} |Q_{ij}|^{\lambda} = \sum \Delta h_{ij} \quad (27)$$

Όπου  $\kappa, \lambda$  συντελεστές που διαφοροποιούνται ανάλογα με τη σχέση ενεργειακών απωλειών που εφαρμόζεται.

Συμβατικά θεωρείται ότι το πρόσημο της παροχής  $Q$  είναι θετικό αν η φορά της συμπίπτει με τη φορά διαγραφής του βρόχου, αλλιώς είναι αρνητικό. Κατά μήκος των ιδεατών βρόχων, οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με τη γνωστή διαφορά στάθμης μεταξύ των δεξαμενών, ενώ καταμήκος των υπόλοιπων βρόχων, αν δεν παρεμβάλεται διάταξη προσφοράς ή καταστροφής της ενέργειας (αντλία, μειωτής πίεσης, δικλείδα, στρόβιλος), το αλγεβρικό άθροισμα των απωλειών ενέργειας είναι μηδενικό δηλαδή η πιεζομετρική γραμμή έχει ίδια στάθμη αφετηρίας και πέρατος.



Εικόνα 14: Διατήρηση ενέργειας βρόχων

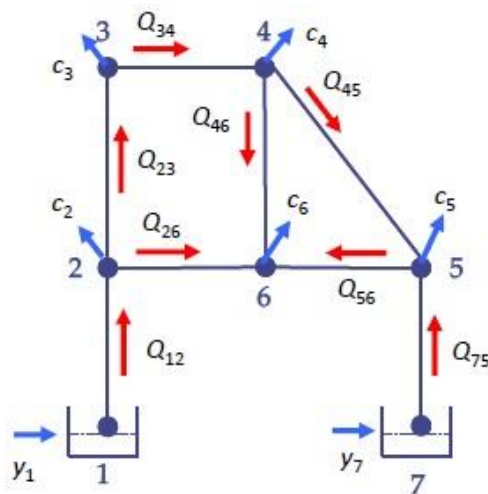
#### 2.4.3 Εξισώσεις συνέχειας κόμβων.

Με τη παραδοχή ότι κατά μήκος των κλάδων δεν υπάρχουν εισροές ή εκροές νερού, σε κάθε κόμβο  $i$  εφαρμόζεται η εξίσωση συνέχειας [βλ.ενότητα 2.1.2] :

$$\sum a_{ij} Q_{ij} = y_i - c_i \quad (28)$$

Όπου  $a_{ij}$  το στοιχείο πρόσπτωσης,  $y^i$  η παροχή εισροής (άγνωστη),  $c_i$  η παροχή εξόδου (ζήτηση) και  $Q_{ij}$  η παροχή (άγνωστη) από ή προς τον κόμβο  $i$ . Αφού στο δίκτυο η συνολική προσφορά ισούται με τη συνολική ζήτηση, το άθροισμα των παροχών εισόδου ισούται με το άθροισμα των παροχών εξόδου στους κόμβους (καθολική εξίσωση συνέχειας):  $\sum y_i = \sum c_i$ .

Σε ένα δίκτυο  $n$  κόμβων και  $n_0$  σημείων γνωστού ενεργειακού υψομέτρου (δεξαμενές), μπορούν να διατυπωθούν  $n - n_0$  γραμμικά ανεξάρτητες εξισώσεις συνέχειας ως προς τις  $m$  άγνωστες παροχές, επομένως για τον προσδιορισμό των παροχών απαιτούνται  $m - (n - n_0)$  επιπλέον εξισώσεις.

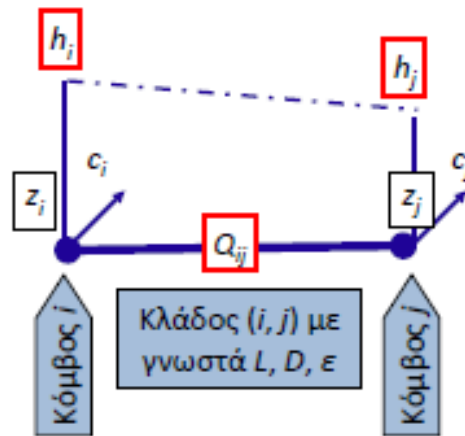


Εικόνα 15: Εξισώσεις συνέχειας βρόχων

Εξαιτίας του μεγάλου πλήθους των μεταβλητών η επίλυση του συστήματος και οι επαναληπτικές τεχνικές επίλυσης θα πραγματοποιηθούν από το λογισμικό πρόγραμμα EPANET [βλ.ενότητα 1].

#### 2.4.4 Συνιστώσες μοντέλου υδραυλικής ανάλυσης και δεδομένα εισόδου.

- Κόμβος: Σημείο εισροής ή εκροής νερού, αλλαγής της γεωμετρίας του δικτύου ή μεταβολής των χαρακτηριστικών του αγωγού. Έχουν γνωστό απόλυτο υψόμετρο  $z$  και γνωστή παροχή εξόδου (ζήτηση)  $c$  ενώ άγνωστο είναι το ενεργειακό υψόμετρο  $H$ . Οι κόμβοι τοποθετούνται στα σημεία τροφοδοσίας, διακλαδώσεων, αλλαγής του υλικού/τραχύτητας/διαμέτρου, αλλαγής της χρήσης νερού, αλλαγής της πυκνότητας του



Εικόνα 16: Σύνδεση κόμβων-αγωγών. [6]

πληθυσμού και της δόμησης, στις θέσεις ειδικών καταναλωτών και στις θέσεις πυροσβεστικών κρουστών.

- Κλάδος/Σύνδεσμος : Στοιχείο μεταφοράς νερού, μήκους  $L$ , που αποτελείται από σύστημα σωλήνων σε σειρά, με κοινή διάμετρο  $D$  και τραχύτητα  $\epsilon$  ( $=1\text{mm}$  για τον συνυπολογισμό της γήρανσης) κατά μήκος του οποία θεωρείται ενιαία αλλά άγνωστη παροχή  $Q$ .
- Δεξαμενή: Διάταξη αποθήκευσης νερού, ωφέλιμου όγκου  $V$ , με γνωστή αρχική στάθμη  $z_0$  και άγνωστη εκροή νερού  $\gamma$ .
- Βαλβίδα/Δικλείδα: Διάταξη ρύθμισης της πίεσης ή της παροχής, η λειτουργία της οποίας περιγράφεται από μια γνωστή σχέση παροχής-ενεργειακών απωλειών.
- Αντλία: Διάταξη ανύψωσης της πιεζομετρικής γραμμής, με άγνωστη χαρακτηριστική καμπύλη.

#### 2.4.4.1 Σημειακή και μη-σημειακή ζήτηση.

Η εκτίμηση της κατανάλωσης του δικτύου γίνεται ξεχωριστά για κάθε χρήση νερού, για την οποία εκτιμάται η αντίστοιχη μέγιστη ωριαία παροχή. Ως σημειακοί χρήστες νοούνται οι ειδικοί καταναλωτές όπως οι βιομηχανίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, πάρκα, πυροσβεστικοί κρουνοί και γενικά κάθε μεγάλος καταναλωτής που υδροδοτείται από συγκεκριμένη θέση του δικτύου. Ως μη σημειακοί χρήστες δηλώνονται οι οικιακοί καταναλωτές, οι κάτοικοι παραθεριστικών περιοχών και οι τουρίστες που καταλύουν σε εκτεταμένες περιοχές όπου αναπτύσσονται μικρής κλίμακας τουριστικές μονάδες. Οι μέγιστες ωριαίες παροχές των ειδικών καταναλωτών μεταφέρονται απευθείας ως σημειακές φορτίσεις στον εγγύτερο κόμβο. Η αθροιστική μέγιστη ωριαία παροχή  $q_k$  ανά χρήση νερού  $k$  επιμερίζεται στους κόμβους του δικτύου, με χρήση κατάλληλων συντελεστών κατανομής:  $c_{jk} = w_{jk} q_k$ . Ο συντελεστής  $w_{jk}$  εκφράζει το ποσοστό της συνολικής ζήτησης κάθε μη σημειακής χρήση  $k$  που εξυπηρετεί τον κόμβο  $j$ . Η παροχή εξόδου κάθε κόμβου προκύπτει ως άθροισμα όλων των καταναλώσεων  $c_{jk}$  από τις σημειακές και μη σημειακές χρήσεις νερού.

Ο υπολογισμός του συντελεστή  $w_{jk}$  γίνεται με τις μεθόδους:

- Επιφανειών επιρροής: Κάθε κόμβος  $i$  εξυπηρετεί συγκεκριμένη επιφάνεια  $a$ , οπότε το ποσοστό συμμετοχής του κόμβου στη συνολική κατανάλωση εκτιμάται από τη σχέση:

$$w_i = a_i / \sum a_i$$

- Ισοδύναμων μηκών επιρροής: Θεωρείται ότι η διανεμόμενη παροχή κατά μήκος κάθε αγωγού ισομοιράζεται στον ανάντη και κατάντη κόμβο, οπότε κάθε αγωγός που συμβάλλει σε ένα κόμβο συμμετέχει στην κατανομή της κατανάλωσης με το ήμισυ του μήκους του.









### 3 Δίκτυο Ύδρευσης του Δήμου Νέας Αρτάκης.

Η Νέα Αρτάκη είναι μια παραλιακή πόλη, που ανήκει στο Νομό Εύβοιας και απέχει 8 περίπου km βόρεια της Χαλκίδας. Είναι η δεύτερη μεγαλύτερη σε πληθυσμό πόλη της Εύβοιας, με το σημερινό πληθυσμό να εκτιμάται στις 12000 (μόνιμος και εποχιακός). Ο οικισμός πήρε το σημερινό του όνομα όταν εγκαταστάθηκαν σε αυτόν πρόσφυγες από την Αρτάκη της Κυζίκου της Μικράς Ασίας, μέχρι τότε λεγόταν Βατώντα.

Σήμερα, η πόλη έχει αναπτυχθεί εκατέρωθεν της επαρχιακής οδού Χαλκίδας-Αιδηψού. Η παράλληλη ανάπτυξη της Ν. Αρτάκης και της Χαλκίδας, τείνει να δώσει την εικόνα προαστίου της Χαλκίδας στην πρώτη. Ο οικιστικός ιστός του δήμου καταλαμβάνει έκταση 2450 στρεμμάτων περίπου, η περιοχή των έργων ύδρευσης αφορά όμως το κυρίως τμήμα της πόλης, έκτασης 860 στρεμμάτων. Η γενική άποψη της περιοχής απεικονίζεται στον πολεοδομικό χάρτη της Εικόνα 17



Εικόνα 17: Γενική άποψη της περιοχής μελέτης των έργων, χωρισμός σε πολεοδομικές ζώνες και αποτύπωση υφιστάμενου δικτύου ύδρευσης. <sup>[5]</sup>

### 3.1 Μεγέθη σχεδιασμού δικτύου.

Το εν λόγω δίκτυο που λήφθηκε υπόψιν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αποτέλεσε προϊόν μελέτης και πρότασης προς υλοποίηση προς τον Δήμο της Νέας Αρτάκης προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα τεχνικά και λειτουργικά προβλήματα του υφιστάμενου δικτύου. Το δίκτυο σχεδιάστηκε για την κάλυψη των αναγκών νερού σε 5 πολεοδομικές ζώνες στο κυρίως τμήμα της πόλης, ενώ η βροχική δομή του είναι κατάλληλη για την μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου δικτύου παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο σχεδιασμός του δικτύου στη Νέα Αρτάκη είχε πραγματοποιηθεί με χρονικό ορίζοντα το έτος 2048. Παρότι οι αγωγοί προέρχονται από PVC και πολυαιθυλένιο τρίτης γενιάς, των οποίων η τραχύτητα είναι της τάξης των  $10^{-4}\text{mm}$ , προκειμένου να συνυπολογιστούν η γήρανση και οι τοπικές απώλειες, θα εφαρμοσθεί επαυξημένος συντελεστής ισοδύναμης τραχύτητας 1.00mm. Επιπλέον, θα χρησιμοποιηθούν πέντε τύποι διαμέτρων ( $\varnothing 90, \varnothing 110, \varnothing 125, \varnothing 140, \varnothing 160$ ) με αντίστοιχες εσωτερικές διαμέτρους (79.2, 96.8, 110.2, 123.4, 141.0mm)

#### 3.1.1 Μέγιστες πιέσεις.

Για την προστασία των υδραυλικών εγκαταστάσεων των σπιτιών και των οικιακών συσκευών, το ύψος πίεσης σε κάθε σημείο του δικτύου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 60-70m. Βλέπε ενότητα 2.2.1.

#### 3.1.2 Ελάχιστες πιέσεις.

Σύμφωνα με την ενότητα 2.2.1, στο υψηλότερο στόμιο εξόδου δηλαδή στη ταράτσα ενός κτηρίου απαιτείται ελάχιστο ύψος πίεσης 5-10m. Εφαρμόζοντας τη σχέση  $P_i > 4(n+1)$ , όπου n: αριθμός ορόφων και  $P_i$ : ύψος πίεσης ως προς το έδαφος, στην περιοχή μελέτης όπου σύμφωνα με το πολεοδομικό κανονισμό <sup>[5]</sup> επιτρέπεται η κατασκευή κτηρίων με ύψη από 7.5 έως 12m, λαμβάνεται ως ελάχιστο αποδεκτό ύψος πίεσης στο έδαφος από 15 έως 25m.

### 3.1.3 Υλικό αγωγών.

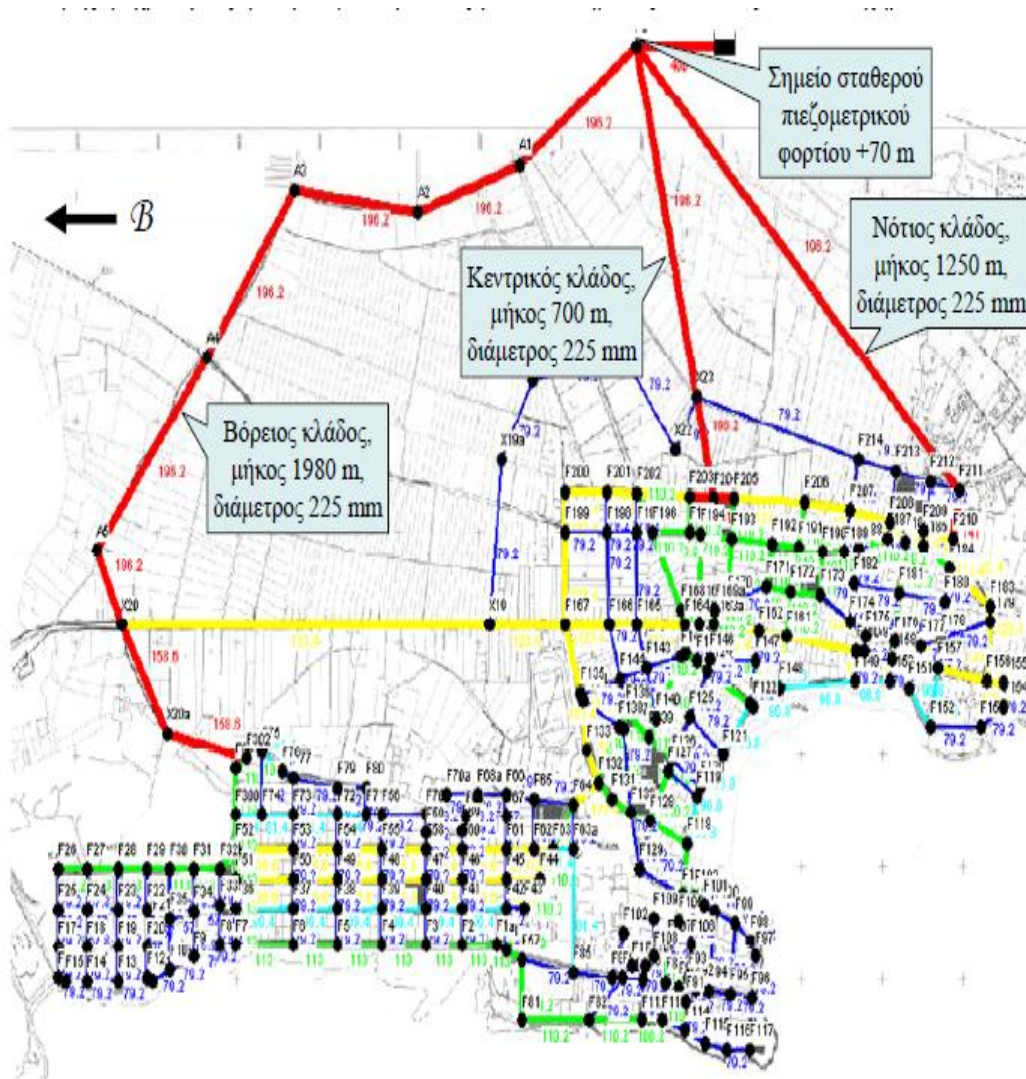
Σε όλο το μήκος του δικτύου η μελέτη έχει προβλέψει την παρουσία σωλήνων από πολυαιθυλένιο τρίτης γενιάς υψηλής ποιότητας (HDPE), κλάσης (ονομαστικής πίεσης) 10 atm. Το εν λόγω υλικό θεωρείται το πλέον πρόσφορο για εγκαταστάσεις υπόγειων δικτύων πόσιμου νερού και, γενικά, δικτύων μεταφοράς νερού υπό πίεση. Το HDPE παρουσιάζει σημαντικά τεχνικά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή αντοχή σε διάβρωση, σχεδόν πλήρη στεγανότητα στις συνδέσεις των επιμέρους τεμαχίων, μηδενικές διαρροές, υψηλή αντοχή σε μετακινήσεις του εδάφους και κρούσεις.

### 3.1.4 Εκτίμηση Πληθυσμού σχεδιασμού – Κατανάλωση σχεδιασμού.

Με τη χρήση των μοντέλων που αναφέρονται στην ενότητα 2.3 και την ανάλυση στατιστικών στοιχείων ο πληθυσμός σχεδιασμού εκτιμάται στις 18 000 κατοίκους που θα αντιστοιχεί σε μέγιστη ωριαία κατανάλωση (παροχή σχεδιασμού) 84.4 L/s.

## 3.2 Γενική διάταξη των έργων.

Η περιοχή των έργων περιλαμβάνει το κυρίως τμήμα της πόλης, ήτοι τις πολεοδομικές ζώνες Α, Β, Γ, Δ και Ε. Το δίκτυο έχει τη μορφή βρόχου [βλ. ενότητα 2] προκειμένου να εξασφαλίζει δύο τουλάχιστον εναλλακτικές διαδρομές τροφοδοσίας. Η τροφοδοσία του δικτύου διανομής γίνεται μέσω τριών κύριων αγωγών, που συνδέουν το δίκτυο με τη δεξαμενή. Συγκεκριμένα από τη δεξαμενή ξεκινά ένας κύριος κλάδος μήκους 1800m, που διακλαδίζεται προς τις τρεις κατευθύνσεις, μήκους 1980, 700 και 1250m, αντίστοιχα, καταλήγοντας σε τρεις «εισόδους» του δικτύου του οικισμού (βόρεια, κεντρική, νότια). Η δεξαμενή είναι τοποθετημένη σε υψόμετρο +120, τη στιγμή που ο οικισμός εκτείνεται μέχρι τη θάλασσα (πρακτικά μηδενικό υψόμετρο), για να ικανοποιηθεί το όριο μέγιστης πίεσης, απαιτήθηκε η διαμόρφωση πιεζοθραυστικού φρεατίου. Θεωρούμε έτσι ότι η στάθμη της πιεζομετρικής γραμμής στη θέση διακλάδωσης των αγωγών τροφοδοσίας είναι στα +70m. Η γενική διάταξη απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 18: Αγωγοί τροφοδοσίας οικισμού και σημείο σταθερού πιεζομετρικού φορτίου.

Οι κόμβοι-φρεάτια που απεικονίζονται στην Εικόνα 18 εκφράζουν σημεία διακλαδώσεων ή αλλαγής τοπολογίας του δικτύου.

### 3.2.1 Πολεοδομικές ζώνες.

- Η ζώνη Α, έκτασης 73 στρεμμάτων, έχει συντελεστή δόμησης 1.0. Η περιοχή εκτείνεται από το υψόμετρο σχεδόν της θάλασσας (ελάχιστο +3.5m , κόμβος-φρεάτιο Φ15), μέχρι τα +40.0m (φρεάτιο Φ27). Τροφοδοτείται μέσω της παρακείμενης ζώνης Β, από τον

βόρειο τροφοδοτικό αγωγό. Η κύρια διαδρομή νερού διαμορφώνεται στο ανατολικό όριο της ζώνης ενώ παρατηρείται ότι η δομή του δικτύου είναι πλήρως βρογχωτή.

- Η ζώνη Β, έκτασης 200 στρεμμάτων, έχει συντελεστή δόμησης 1.6 στο εσωτερικό τμήμα και 2.1 επί της παραλιακής οδού. Η περιοχή εκτείνεται σχεδόν από το υψόμετρο της θάλασσας (ελάχιστο +4.5m , φρεάτιο Φ2) μέχρι τα +36,5m (φρεάτιο Φ300). Το δίκτυο διανομής υδροδοτείται από τον βόρειο τροφοδοτικό αγωγό, μέσω του φρεατίου Φ302, ενώ συνδέεται περιμετρικά με τις ζώνες Α, Γ, Θ και Δ.
- Η ζώνη Γ, έκτασης 90 στρεμμάτων, έχει συντελεστή δόμησης 1.8 στο εσωτερικό τμήμα και 2.1 επί της παραλιακής διαδρομής. Η περιοχή εκτείνεται σε ένα μικρό εύρος υψομέτρων, από +1,7m (φρεάτιο Φ96) ως +9.7m (φρεάτιο Φ90) και είναι η πλέον ευνοϊκή από πλευράς ελαχίστων πιέσεων. Το δίκτυο τροφοδοτείται από δύο εισόδους, καθώς συνδέεται με τις ζώνες Β και Δ στα φρεάτια Φ57 και Φ104, αντίστοιχα.
- Οι ζώνες Δ-Ε, έκτασης 420 στρεμμάτων, έχουν συντελεστή δόμησης 1.8 στο εσωτερικό τμήμα και 2.1 επί της παραλιακής οδού Αγίου Νικολάου και της επαρχιακής οδού Χαλκίδας-Αιδηψού. Η περιοχή εκτείνεται σε ένα εύρος υψομέτρων από +1.8m (φρεάτιο Φ104) έως +21.7m (φρεάτιο Φ211). Το δίκτυο υδροδοτείται από τον κεντρικό και νότιο τροφοδοτικό αγωγό, με τους οποίους συνδέεται στα φρεάτια Φ204 και Φ211, επιπλέον συνδέεται δυτικά με τη ζώνη Γ, βόρεια με τις ζώνες Β, Ζ και Θ, ανατολικά με τη ζώνη Η και νότια με τη ζώνη Ι (Νέα Κύζικος). Στο σχεδιασμό του δικτύου διαμορφώνονται πρωτεύουσες, δευτερεύουσες και τριτεύουσες διαδρομές.

Επισημαίνεται ότι στο νότιο όριο των ζωνών Δ-Ε (φρεάτιο Φ155) μέχρι το φρεάτιο Χ20, τοποθετείται αγωγός . Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει εναλλακτικές διαδρομές υδροδότησης της περιοχής μελέτης σε περίπτωση αυξημένων αναγκών λόγω πυρκαγιάς ή βλάβης ενός εκ των τριών κεντρικών τροφοδοτικών αγωγών.

### 3.2.2 Πυροσβεστικοί Κρουνοί.

Το δίκτυο διανομής έχει εξοπλισθεί με ικανό αριθμό πυροσβεστικών κρουνών, παροχής λειτουργίας 5 L/s. Συνολικά έχουν τοποθετηθεί 14 κρουνοί. Στον παρακάτω πίνακα συμπεριλαμβάνονται οι κωδικοί των κρουνών, η εξυπηρετούμενη ζώνη και η περιοχή ενδιαφέροντος.

*Πίνακας 1 Πυροσβεστικοί κρουνοί και περιοχή εξυπηρέτησης.*

α/α	Φρεάτιο	Εξυπηρετούμενες ζώνες	Σημείο ή περιοχή ενδιαφέροντος
1	Φ26	A	Παρακείμενη δασική έκταση
2	Φ302	B, Z	Παρακείμενη δασική έκταση
3	Φ7	B, A	
4	Φ48	B	
5	Φ1	B, Θ	Εκκλησιαστικός χώρος, εργοστάσιο
6	Φ64	B, Z, Θ	Δημοτικό σχολείο, εκκλησιαστικός χώρος
7	Φ113	Γ	
8	Φ104	Γ, Δ, Θ	Λιμάνι
9	Φ139	Δ	ΚΕΓΕ
10	Φ167	Δ, Ε, Η	Εθνικό στάδιο, Ε.Ο. Χαλκίδας Αιδηψού
11	Φ161	Δ, Ε	Ε.Ο Χαλκίδας Αιδηψού
12	Φ204	Ε, Η	Δημαρχείο
13	Φ209	Ε	Νεκροταφείο
14	Φ156	Δ, Ε, Ι	Ε.Ο Χαλκίδας Αιδηψού





Εικόνα 19: Αρίθμηση και τοποθεσία πυροσβεστικών κρουών στο χάρτη.



## 4 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EPANET

Το EPANET είναι υπολογιστικό πρόγραμμα (software) που έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει σε εκτεταμένη χρονική περίοδο τόσο την υδραυλική συμπεριφορά του νερού όσο και τη χημική του σύσταση για την εποπτεία της ποιότητας του, σε ένα δίκτυο διανομής. Η περιγραφή της λειτουργίας του προγράμματος στην παρούσα εργασία θα αρκестεί στις λειτουργίες για την υδραυλική ανάλυση. Η προσομοίωση του δικτύου μέσα από το EPANET γίνεται από κόμβους (junctions), αγωγούς (pipes), αντλίες (pumps), δικλείδες (valves), δεξαμενές (tanks) και ταμιευτήρες (reservoirs). Οι υπολογισμοί αφορούν την παροχή για κάθε αγωγό του δικτύου, την υδραυλική πίεση για κάθε κόμβο, το υδραυλικό ύψος για τις δεξαμενές και τους ταμιευτήρες καθώς και τη χημική σύσταση, το χρόνο παραμονής και την πηγή προέλευσης του νερού σε όλο το δίκτυο για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

Γίνεται αντιληπτό ότι αποτελεί ένα εργαλείο έρευνας για την κατανόηση της συμπεριφοράς του νερού μέσα στο δίκτυο διανομής καθώς δύναται να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά είδη εφαρμογών για τα δίκτυα διανομής. Προσφέρει εναλλακτικές στρατηγικές για τη διαχείριση ενός δικτύου που μπορεί να αφορούν για παράδειγμα τη διαφοροποίηση της πηγής τροφοδότησης σε συστήματα πολλαπλών πηγών ή τη διαφοροποίηση άντλησης και τη διαχείριση των δεξαμενών. Στις επόμενες ενότητες θα γίνει μια περιγραφή των λειτουργιών του EPANET που χρειάστηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

### 4.1 Δυνατότητες υδραυλικού μοντέλου

Οι ικανότητες της υδραυλικής μοντελοποίησης που παρέχονται από το EPANET αφορούν:

- το απεριόριστο μέγεθος του δικτύου που μπορεί να αναλυθεί.
- υπολογισμό των γραμμικών απωλειών του δικτύου από τις εξισώσεις των Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ή Chezy-Manning.
- τις τοπικές απώλειες από στροφές, δικλείδες, κτλ.
- μέτρηση του ενεργειακού κόστους της άντλησης.

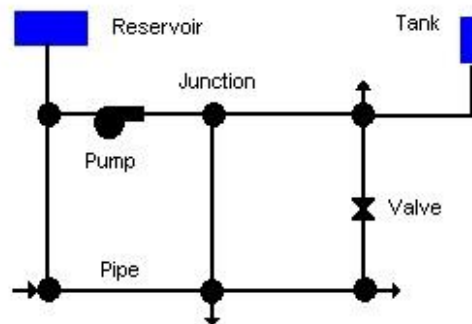
- διαφορετικά μοντέλα δικλίδων .
- δυνατότητα για διαφοροποίηση του γεωμετρικού σχήματος των δεξαμενών.
- την προοπτική για διαφορετικές κατηγορίες ζήτησης για τους κόμβους, με διαφορετική χρονική διακύμανση της ζήτησης για την κάθε κατηγορία.
- προσομοίωση της πίεσης εξαρτώμενη από την παροχή των φυσητήρων.
- τη λειτουργία του δικτύου είτε με απλά επίπεδα δεξαμενής είτε με χρονοδιακόπτες και σύνθετες εντολές ελέγχου.

## 4.2 Στοιχεία Του Δικτύου

Με τη χρήση του EPANET και με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα 2.4 πραγματοποιήθηκε η αναπαράσταση του δικτύου της Ν.Αρτάκη. Είναι προφανές ότι τα φυσικά στοιχεία που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2, εμπεριέχονται στο λογισμικό και στις επόμενες ενότητες θα αναλυθούν λεπτομερώς.

### 4.2.1 Φυσικά Στοιχεία:

Το EPANET παρουσιάζει ένα δίκτυο διανομής ως ένα σύνολο συνδέσεων που ενώνουν τους κόμβους μεταξύ τους. Οι συνδέσεις μπορεί να αντιπροσωπεύουν έναν αγωγό, μια αντλία ή μια δικλείδα ελέγχου, ενώ ως κόμβος νοείται μια διασταύρωση συνδέσμων με σημειακή



Εικόνα 20: Τρόπος σύνδεσης αντικειμένων δικτύου

κατανάλωση νερού, μια δεξαμενή ή ένας ταμιευτήρας. Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται ένας τυπικός τρόπος σύνδεσης αυτών των αντικειμένων.

#### 4.2.2 Διασταυρώσεις – Κόμβοι (Nodes)

Οι κομβοί (Nodes) είναι σημεία του δικτύου που αναπαριστούν σημειακές καταναλώσεις ή εισροές νερού στο δίκτυο. Τα βασικά δεδομένα εισόδου για τις διασταυρώσεις είναι:

- υψόμετρο ως προς ένα σημείο αναφοράς (συνήθως το επίπεδο της θάλασσας).
- Ζήτηση νερού

Τα μεγέθη υπολογισμού είναι :

- Το υδραυλικό ύψος
- Πίεση

Δύναται επίσης η επιλογή στο χρήστη να διαφοροποιήσει τη ζήτηση στον κόμβο ανά χρονικό βήμα, να κατηγοριοποιήσει τις ζητήσεις νερού ανά καταναλωτή και να προσομοιώσει την εισροή νερού στο δίκτυο με την προσθήκη αρνητικής ζήτησης στο κόμβο

#### 4.2.3 Ταμιευτήρες (Reservoirs)

Αποτελούν είδος κόμβου (Junctions) για το EPANET με τη στάθμη τους να θεωρείται αμετάβλητη. Τα αρχικά δεδομένα εισόδου είναι το υδραυλικό ύψος (ισούται με τη στάθμη του ταμιευτήρα επειδή δε λειτουργούν υπό πίεση). Το γεγονός ότι αποτελούν όρια για το δίκτυο, δεν μεταβάλλει το υδραυλικό ύψος καθόλη τη διάρκεια της ανάλυσης του υπόλοιπου δικτύου, επομένως δεν περιλαμβάνει δεδομένα εξόδου. Παρόλα αυτά αν απαιτηθεί για τις ανάγκες της προσομοίωσης μπορεί να ρυθμιστεί μεταβολή της στάθμης του ανά χρονική περίοδο.

#### 4.2.4 Αγωγοί (Pipes)

Οι αγωγοί είναι σύνδεσμοι μεταφοράς του νερού από ένα σημείο του δικτύου σε ένα άλλο. Η υπολογιστική διαδικασία στο EPANET θεωρεί πως η ροή γίνεται πάντα υπό πίεση,

μεταφέροντας το νερό από τα σημεία με υψηλά υδραυλικά ύψη στα χαμηλότερα. Οι αρχικοί παράμετροι εισόδου για τους αγωγούς είναι:

- Κόμβοι αρχής και του πέρατος του αγωγού.
- Διάμετρος.
- Μήκος.
- Συντελεστής τραχύτητας
- Κατάσταση αγωγού: open (ανοικτός αγωγός), closed (κλειστός αγωγός), check valve (εξασφαλίζει ροή προς μια ορισμένη κατεύθυνση)

Τα μεγέθη υπολογισμού αφορούν :

- Παροχή
- Ταχύτητα
- Απώλειες ενέργειας
- Συντελεστή τριβής σύμφωνα με τη φόρμουλα Darcy-Weisbach

Οι απώλειες ενέργειας μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με μία από τις παρακάτω φόρμουλες (*Hazen-Williams*, *Darcy-Weisbach*, *Chezy-Manning*). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η φόρμουλα D-W εξαιτίας της θεωρητικής ορθότητας.

Κάθε φόρμουλα χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό των απωλειών κατα μήκος ενός αγωγού:

$$h_L = Aq^B$$

Όπου  $h_L$ =απώλειες(σε μονάδες μήκους),  $q$ =παροχή (όγκος/χρόνο),  $A$ =συντελεστής αντίστασης και  $B$ =δείκτης ροής. Οι τιμές για τον συντελεστή αντίστασης και για το δείκτη ροής, για τη φόρμουλα Darcy-Williams είναι:

$$A = 0.0252 f(\varepsilon, d, q) d^{-5} L$$

$$B = 2$$

όπου  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής τραχύτητας Darcy-Weisbach,  $f$  ο συντελεστής τριβής (εξαρτώμενος από  $\varepsilon$ ,  $d$  και  $q$ ),  $d$  η διάμετρος αγωγού,  $L$  το μήκος αγωγού και  $q$  η παροχή. Για τη φόρμουλα Darcy-Weisbach το EPANET χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθόδους για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, ο οποίος εξαρτάται από το καθεστώς ροής:

- Ο τύπος Hagen-Poiseuille χρησιμοποιείται για τη στρωτή ροή ( $Re < 2000$ ).
- Η προσέγγιση Swamee-Jain για την εξίσωση Colebrook-White χρησιμοποιείται για πλήρως τυρβώδη ροή ( $Re > 4000$ ).
- Χρησιμοποιείται κυβική παρεμβολή από το διάγραμμα Moody για μεταβατική ροή ( $2000 < Re < 4000$ ).

Οι τοπικές απώλειες προκαλούνται από αναταραχές της ροής λόγω στροφών του δικτύου ή την παρουσία δικλείδων. Η σημασία υπολογισμού αυτών εξαρτάται από τη διάταξη του δικτύου και τον απαιτούμενο βαθμό ακρίβειας. Λαμβάνονται υπόψιν προσθέτοντας έναν συντελεστή τοπικών απωλειών.

$$h_L = K \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

όπου  $K$  είναι ο συντελεστής τοπικών απωλειών,  $v$  η ταχύτητα και  $g$  η επιτάχυνση βαρύτητας.

#### 4.2.5 Συνοπτικός πίνακας αντικειμένων.

Στον πίνακα της επόμενης σελίδας περιλαμβάνεται μια συνοπτική περιγραφή όλων των αντικειμένων του EPANET. Η πρώτη στήλη περιέχει όλες τις εκδοχές και τις υποκατηγορίες των αντικειμένων που δύναται να τοποθετηθούν στο δίκτυο, η δεύτερη στήλη περιλαμβάνει μια σύντομη περιγραφή της αναπαράστασης των αντικειμένων. Στη τρίτη στήλη περιέχονται τα

δεδομένα εισόδου που εισέρχονται για να πραγματοποιηθεί η υδραυλική ανάλυση ενώ στη τέταρτη στήλη αποτυπώνονται ποια μεγέθη θα προκύψουν ως προϊόντα της ανάλυσης για κάθε αντικείμενο. Η επισύναψη όλων των αντικειμένων γίνεται για λόγους πληρότητας, το δίκτυο της παρούσας εργασίας δεν περιλάμβανε το σύνολο των αντικειμένων.

Πίνακας 2: Πίνακας περιγραφής αντικειμένων

Αντικείμενα δικτύου			Περιγραφή	Δεδομένα εισόδου	Δεδ/να Εξόδου
<b>Κόμβοι</b>			Σημεία τομής, υψόμετρο, ζήτηση	Υψόμετρο, ζήτηση	Υδρ/κο ύψος, πίεση
<b>Αποθηκευτικός Κόμβος</b>	<b>Ταμιευτήρας</b>	<b>Σταθερό επίπεδο</b>	Απεριόριστη ποσότητα νερού με σταθερή στάθμη κατά την προσομοίωση	Υδραυλικό ύψος (σταθερή τιμή)	
		<b>Μεταβαλλόμενο επίπεδο</b>	Απεριόριστη ποσότητα με μεταβαλλόμενη στάθμη νερού	Πρότυπο μεταβολής στάθμης συναρτήσει του χρόνου	
	<b>Δεξαμενή</b>	<b>Κυλινδρική</b>	Περιορισμένη ποσότητα νερού σε κυλινδρική δεξαμενή	Υψόμετρο πυθμένα, διάμετρος, αρχική στάθμη, ΑΣΥ, ΚΣΥ	Στάθμη δεξαμενής
		<b>Μεταβλητή Διατομή</b>	Περιορισμένη ποσότητα νερού σε μεταβλητή διατομή.	Σχέση όγκου – υδραυλικής καμπύλης	Στάθμη δεξαμενής
<b>Αγωγοί</b>			Σύνδεσμοι-κλάδοι μεταφοράς νερού από κόμβο σε κόμβο	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, μήκος,	Παροχή, γραμμικές απώλειες



			συντελεστή απωλειών, τραχύτητα, κατάσταση	
<b>Αντλίες</b>	<b>Σταθερή ισχύς</b>	Αντλία παροχής σταθερής ποσότητα ενέργειας.	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, ενέργεια, κατάσταση	Παροχή,Μ ανομετρικ ό ύψος
	<b>Ενός σημείου (One-Point)</b>	Αντλία με χαρακτηριστική καμπύλη ορισμένη από ένα σημείου.	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, ροή λειτουργίας και μανομετρικό, κατάσταση	
	<b>Τριών σημείων (Three-Points)</b>	Αντλία με χαρακτηριστική καμπύλη ορισμένη από τρία σημεία.	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, χαρακτηριστική καμπύλη, κατάσταση	
	<b>Πολλαπλών σημείων(Multiple Point)</b>	Αντλία με χαρακτηριστική καμπύλη ορισμένη από πολλαπλά σημεία.	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, χαρακτηριστική καμπύλη, κατάσταση	
<b>Βαλβίδες – Δικλείδες</b>	<b>Ελέγχου (CVs)</b>	Επιτρέπει ροή προς μια διεύθυνση μόνο		Παροχή, Απώλεια ς ενέργεια ς
	<b>Ελάττωσης πίεσης (PRVs)</b>	PRVs περιορίζει την πίεση κατάντη, εφόσον η ανάντη πίεση υπερβεί προκαθορισμένη τιμή	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, συν/τη τοπικών απωλειών, ρύθμιση κατάντης πίεσης, κατάσταση	
	<b>Υποστηρικτικές πίεσης (PSVs)</b>	PSVs διατηρεί ελάχιστη τη πίεση ανάντη, όταν η κατάντη πίεση είναι μικρότερη από τη προκαθορισμένη τιμή.	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, συν/τη τοπικών απωλειών, ρύθμιση κατάντης πίεσης, κατάσταση	
	<b>Πιεζοθραυστικές (PBVs)</b>	Μειώνει τη πίεση σε όλη τη βαλβίδα	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, συν/τη τοπικών απωλειών, ρύθμιση κατάντης πίεσης, κατάσταση	
	<b>Ελέγχου παροχής (FCVs)</b>	Περιορίζει την παροχή σε μια προκαθορισμένη τιμή.	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, συν/τη τοπικών	

			απωλειών, ρύθμιση παροχής, κατάσταση
	<b>Ελέγχου βαλβίδας (TCVs)</b>	Προσομοιώνει μια μερικώς κλειστή βαλβίδα ρυθμίζοντας τον συντελεστή τοπικών απωλειών	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, συν/τη τοπικών απωλειών, κατάσταση
	<b>Γενικού σκοπού (GPVs)</b>	Αντιπροσωπεύει αγωγό με συγκεκριμένη σχέση απωλειών-παροχής	Κόμβοι αφετηρίας-πέρατος, διάμετρος, σχέση απωλειών-παροχής, κατάσταση

### 4.3 Προσομοίωση Υδραυλικού Μοντέλου

Η έννοια της προσομοίωσης σηματοδοτεί την υδραυλική ανάλυση του δικτύου για πολλαπλά χρονικά βήματα. Η χρήση των χρονικών βημάτων πραγματοποιείται λόγω της μεταβολής που σημειώνει η ζήτηση στους κόμβους του δικτύου ανά χρονική περίοδο, δηλαδή λόγω του προτύπου μεταβολής της ζήτησης που εισάγεται στα δεδομένα εισόδου των κόμβων όπως σημειώνεται και στον προηγούμενο πίνακα.

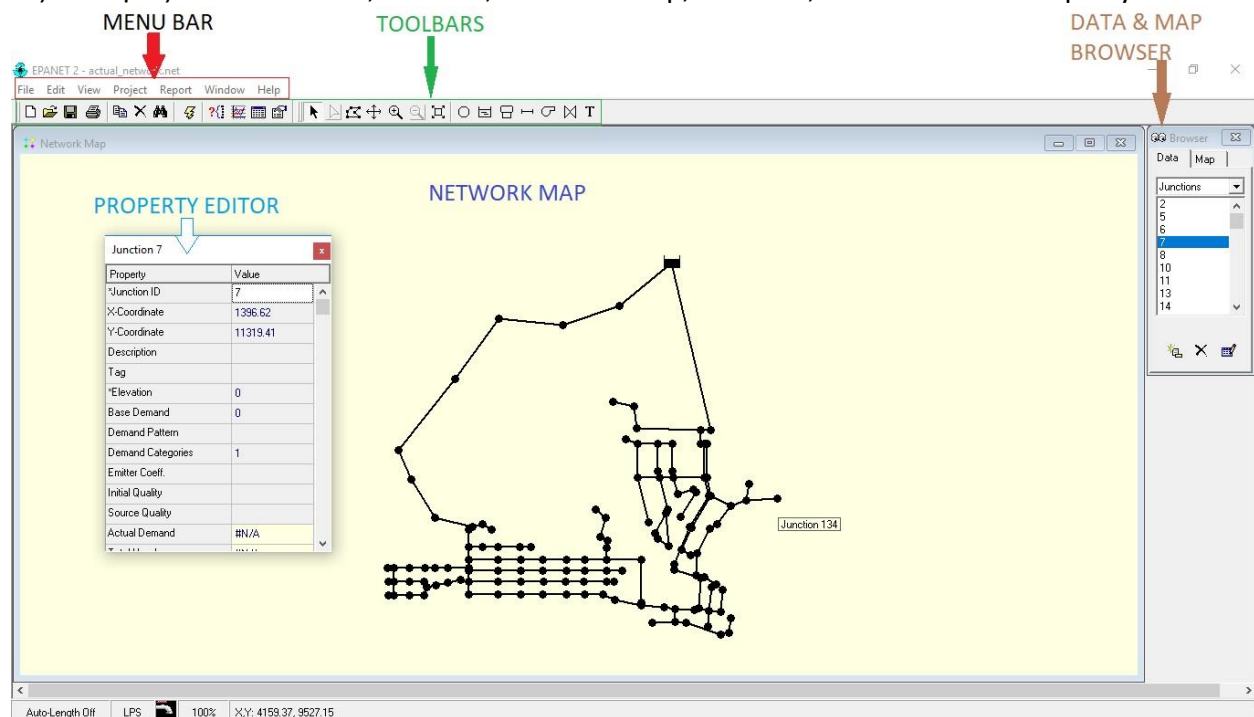
Σε ένα κανονικό δίκτυο χωρίς βλάβες αγωγών, η ζήτηση των κόμβων και τα αρχικά υψόμετρα των ταμιευτήρων ή των δεξαμενών είναι οι βασικοί παράγοντες επιρροής της υδραυλικής επίλυσης του συστήματος. Η διαδικασία επίλυσης επαναλαμβάνεται για κάθε χρονικό βήμα, δηλαδή για κάθε ανανεωμένη τιμή της ζήτησης ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα της υδραυλικής κατάστασης του δικτύου. Οι συμβατικοί κανόνες που ακολουθεί το EPANET κατά την εκτέλεση είναι της διατήρησης της ροής σε κάθε κόμβο, έτσι ώστε να καλύπτονται πάντα οι ανάγκες των κόμβων και η διατήρηση του ισοζυγίου της ενέργειας που συμπεριλαμβάνει και τις γραμμικές απώλειες κατά μήκος ενός αγωγού. Η επαλήθευση των κανόνων αυτών προϋποθέτει την επίλυση ενός συστήματος πολλών μη γραμμικών εξισώσεων που ενδεχομένως να χρειαστούν αρκετές επαναληπτικές διαδικασίες εκτέλεσης της ανάλυσης του δικτύου. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται υδραυλική εξισορρόπηση του δικτύου. Ο χρήστης μπορεί να

ορίσει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που επιθυμεί να πραγματοποιήσει το λογισμικό για την επίλυση ενός δικτύου. Στην περίπτωση που το EPANET υπερβεί το καθορισμένο πλήθος επαναλήψεων θα εμφανίσει το μήνυμα της αδυναμίας επίλυσης του δικτύου.

Είναι προφανές ότι η χρήση πρότυπου μεταβολής της ζήτησης των κόμβων είναι προαιρετική και κρίνεται ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Για παράδειγμα σε περίπτωση μελέτης δικτύου για τη διαστασιολόγηση του χρησιμοποιείται μονάχα η μέγιστη ετήσια ωριαία ζήτηση, οπότε ο όρος προσομοίωση χρησιμοποιείται αυθαίρετα καθώς δεν χρειάζεται ανάλυση για διαφορετικά χρονικά βήματα. Τα πρότυπα μεταβολής ζήτησης χρησιμοποιούνται συνήθως για την εποπτική διαχείριση του συστήματος διανομής.

#### 4.4 Περιβάλλον εργασίας (Windows) EPANET

Σε αυτή την ενότητα θα πραγματοποιηθεί μια παρουσίαση του γραφικού περιβάλλοντος του λογισμικού. Το περιβάλλον εργασίας του EPANET απεικονίζεται παρακάτω και αποτελείται από τις ενότητες των Menu bar, Toolbar, Network map, Browser, Status bar και Property editor. Η



Εικόνα 21: Γραφικό Περιβάλλον EPANET

χωροταξία των ενοτήτων αυτών φαίνεται στην Εικόνα 21. Στο κεντρικό σημείο της οθόνης τοποθετείται η ενότητα του network map, εκεί δηλαδή που πραγματοποιείται η σχεδίαση του δικτύου. Περιμετρικά του network map τοποθετούνται οι υπόλοιπες ενότητες του λογισμικού. Πάνω αριστερά βρίσκονται οι ενότητες του Menu bar και toolbars, στα δεξιά εντοπίζεται το data/map browser ενώ κάτω αριστερά εμφανίζεται το status bar. Η εμφάνιση της διάταξης του property editor ενέχει την παρουσία αντικειμένων στο network map. Η περιγραφή των στοιχείων αυτών θα γίνει στις επόμενες ενότητες.

#### 4.4.1 MENU BAR



























Περιέχει μια συλλογή από menu που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την εποπτείας του προγράμματος. Κάθε υποενότητα του menu bar αναφέρεται σε διαφορετική λειτουργία του προγράμματος. Παρακάτω αναφέρεται συνοπτικά το περιεχόμενο της κάθε εντολής.

- I. File Menu: περιέχει εντολές για το άνοιγμα, την αποθήκευση και την εκτύπωση αρχείων. Ουσιαστικά εξασφαλίζει τη λειτουργία της εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων από το λογισμικό προς τον υπολογιστή και αντίστροφα
- II. Edit Menu: περιέχει εντολές για την επεξεργασία και την αντιγραφή στοιχείων του δικτύου. Η λειτουργίες του εστιάζονται επάνω στον έλεγχο των αντικειμένων που έχουν τοποθετηθεί στο network map.
- III. View Menu: η λειτουργία του view map επικεντρώνεται στον καθορισμό των στοιχείων που απεικονίζονται αλλά και τον τρόπο προβολής των αντικειμένων στο network map.
- IV. Project Menu: περιέχει εντολές που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της υδραυλικής ανάλυσης του δικτύου αλλά και την εντολή εκτέλεσης της ανάλυσης.
- V. Report Menu: οι λειτουργίες του έπονται της υδραυλικής ανάλυσης. Περιλαμβάνει εντολές για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των χαρακτηριστικών του δικτύου διανομής.
- VI. Windows Menu: στο συγκεκριμένο menu γίνεται στοίχιση των ελαχιστοποιημένων παραθύρων που παρουσιάζουν τα δεδομένα εξόδου.

VII. Help Menu: περιέχει πληροφορίες για την καλύτερη κατανόηση της δομής και των λειτουργιών που προσφέρει το λογισμικό. Περιέχει παραπομπές στο αυθεντικό εγχειρίδιο λειτουργίας της εταιρίας του λογισμικού, απαιτεί διαθέσιμη πρόσβαση στο διαδίκτυο.

#### 4.4.2 Toolbars

Αποτελεί την εργαλειοθήκη του EPANET. Οι εντολές εμφανίζονται σε μορφή εικονιδίων, πρόκειται για τις συνηθέστερες εντολές κατά τον σχεδιασμό και τη διαχείριση ενός δικτύου. Προφανώς οι εντολές που περιέχονται στο toolbar δύναται να εντοπιστούν και στο menu bar. Η παρουσία του έχει το χαρακτήρα βοήθειας προς το χρήστη. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι εντολές του:

								
Δημιουργία νέου αρχείου .	Άνοιγμα υπάρχοντος αρχείου.	Αποθήκευση αρχείου.	Εκτύπωση αρχείου.	Αντιγραφή αρχείου.	Διαγραφή ή επιλεγμένου στοιχείου από το δίκτυο.	Αναζήτηση συγκεκριμένου στοιχείου στο δίκτυο.	Εκτέλεση ανάλυσης .	Σύνθετη αναζήτηση στο δίκτυο.
								
Δημιουργία γραφικής παράστασης των αποτελεσμάτων.	Δημιουργία πίνακα των αποτελεσμάτων.	Διαμόρφωση της απεικόνισης του network map.	Επιλογή ενός αντικειμένου του δικτύου.	Επιλογή των ορίων ενός συνδέσμου.	Επιλογή περιοχής στο χάρτη.	Εποπτική κίνηση καταμήκους του δικτύου.	Zoom-in.	Zoom-out.
								
Προβολή δικτύου σε πλήρη έκταση.	Προσθήκη κόμβου στο δίκτυο.	Προσθήκη ταμειυτήρα στο δίκτυο.	Προσθήκη δεξαμενής στο δίκτυο.	Προσθήκη αγωγού στο δίκτυο.	Προσθήκη αντλίας στο δίκτυο.	Προσθήκη δικλείδας στο δίκτυο.	Προσθήκη κειμένου στο δίκτυο.	

#### 4.4.3 Status BAR

Το Status Bar απεικονίζεται στο κάτω μέρος του περιβάλλοντος εργασίας και αποτελείται από τέσσερις ενότητες. Ο ρόλος του είναι κυρίως εποπτικός.

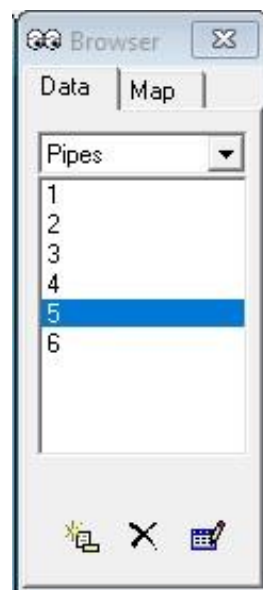
- I. Auto-Length: υποδηλώνει αν ο αυτόματος μετρητής μήκους σωλήνα είναι ενεργοποιημένος ή απενεργοποιημένος.
- II. Flow-Units: υποδηλώνει την μονάδα μέτρησης της παροχής.
- III. Zoom Level: υποδηλώνει το ποσοστό οπτικής μεγέθυνσης του δικτύου.
- IV. Run Status: υποδηλώνει αν η προσομοίωση έχει επιτευχθεί με επιτυχία
- V. XY Location: υποδηλώνει τις συντεταγμένες σημείου επάνω στο δίκτυο.

#### 4.4.4 Network Map

Το Network Map είναι το παράθυρο του EPANET στο οποίο πραγματοποιείται η σχηματική απεικόνιση των αντικειμένων που απαρτίζουν ένα δίκτυο διανομής και αποτελεί το βασικό περιβάλλον εργασίας. Η τοποθεσία των αντικειμένων και η μεταξύ τους απόσταση δεν είναι απαραίτητο να ανταποκρίνονται στη φυσική κλίμακα. Υπάρχει η δυνατότητα χρωματικής απεικόνισης επιλεγμένων φυσικών ή λογιστικών ιδιοτήτων των αντικειμένων όπως η παροχή των αγωγών. Δίνεται η δυνατότητα προσθήκης, αφαίρεσης ή επανατοποθέτησης αντικειμένων στο δίκτυο καθώς και η προσθήκη εικόνας υποβάθρου (π.χ χάρτη) προκειμένου να υπάρχει καλύτερη αντίληψη για την εικόνα ενός δικτύου.

#### 4.4.5 Data/Map Browser

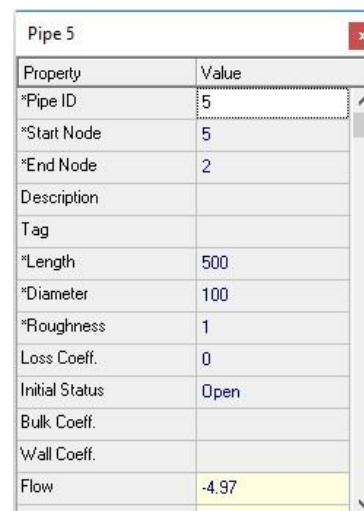
Το Data Browser (Εικόνα 22) κατηγοριοποιεί τα διάφορα φυσικά αντικείμενα ή τις λογιστικές παραμέτρους (π.χ καμπύλη αντλιών) που περιέχονται στο δίκτυο και δίνει πρόσβαση στις ιδιότητες τους προκειμένου να διευκολυνθεί ο ορθός σχεδιασμός. Αποτελεί σημαντικό εργαλείο κατά τον σχεδιασμό και την εποπτεία του δικτύου καθώς επί της ουσίας συγκεντρώνει όλες τις παραμέτρους που καθορίζουν την εκτέλεση μιας ανάλυσης και διευκολύνει την επεξεργασία τους. Το map browser δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει αντικείμενο και την παράμετρο που επιθυμεί να παρατηρήσει προκειμένου να έχει μια εικονική αναπαράσταση στο network map του μεγέθους και της μεταβολής της παραμέτρου που επέλεξε.



Εικόνα 22: Browser

#### 4.4.6 Property Editor

Το Property Editor (Εικόνα 23) χρησιμοποιείται προκειμένου να επεξεργασθούν οι ιδιότητες (δεδομένα εισόδου) των αντικειμένων. Πρόκειται για καρτέλα ιδιοτήτων εισόδου και εξόδου μεμονομένων αντικειμένων. Η εμφάνιση της προκύπτει με διπλή επιλογή (double click) του αντίστοιχου αντικειμένου στο network map.

The image shows a window titled "Pipe 5" with a close button in the top right. It contains a table with two columns: "Property" and "Value".

Property	Value
*Pipe ID	5
*Start Node	5
*End Node	2
Description	
Tag	
*Length	500
*Diameter	100
*Roughness	1
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	-4.97

Εικόνα 23: Property Editor

## 4.5 Βήματα για τη χρήση του EPANET

Πρωταρχικό βήμα για τη χρήση του EPANET είναι η γραφική απεικόνιση ή περιγραφή του δικτύου. Η γραφική απεικόνιση γίνεται στο windows EPANET επάνω στο επίπεδο του network map χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες εντολές για την προσθήκη των αντικειμένων. Το λογισμικό επίσης προσφέρει τη δυνατότητα αντί για το σχεδιασμό να δοθεί μια περιγραφή του δικτύου από αρχείο κειμένου με συγκεκριμένη και αυστηρή δομή και στη συνέχεια είτε να εισαχθεί στο windows EPANET από τις επιλογές του menu bar->file είτε να εκτελεστεί από το command line EPANET.

Ανεξάρτητα με τον τρόπο εισαγωγής του γραφήματος του δικτύου, είναι απαραίτητο να διευκρινιστούν οι ιδιότητες των αντικειμένων. Η λειτουργία του windows EPANET, μέσω είτε του data browser είτε του property editor, κάνει δυνατή την επεξεργασία των ιδιοτήτων. Στην περίπτωση εισαγωγής αρχείου κειμένου ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται τα δεδομένα εισόδου στα αντικείμενα θα περιγραφεί στην ενότητα 4.7.

Τελευταίο στάδιο, πριν την εκτέλεση της ανάλυσης είναι η περιγραφή της λειτουργίας του δικτύου. Το στάδιο αυτό εκτελείται κυρίως στα δίκτυα που η λειτουργία τους καθορίζεται από κανόνες. Για παράδειγμα, είναι πιθανόν να χρειαστεί η διατύπωση κανόνα για την παύση λειτουργίας αντλίας μετά από κάποιο χρονικό ή λειτουργικό γεγονός. Είναι προφανές ότι το βήμα αυτό δεν είναι απαραίτητο για το σχεδιασμό όλων των δικτύων.



Με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών εκτελείται η υδραυλική ανάλυση. Υπάρχουν δύο υπαρκτά σενάρια για την ανάλυση, είτε αυτή να έχει πραγματοποιηθεί επιτυχημένα είτε να έχει αποτύχει και να εμφανιστεί μήνυμα σφάλματος. Ανάλογα με τη στρατηγική και το χαρακτήρα της μελέτης πραγματοποιούνται τα επόμενα βήματα.

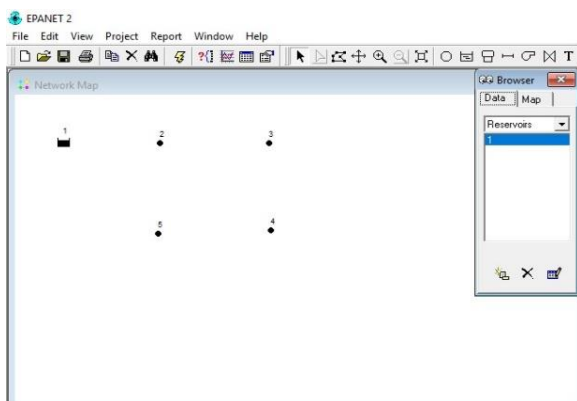


## 4.6 Παράδειγμα Σχεδίασης Τυπικού Δικτύου (Windows EPANET).

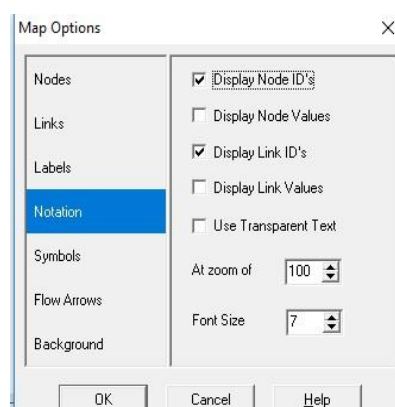
Για τη σχεδίαση δικτύου στο περιβάλλον εργασίας του EPANET, απαραίτητα εργαλεία είναι το Toolbar και το Network map. Στο παράδειγμα που ακολουθεί θα σχεδιασθεί ένα τυπικό δίκτυο με πηγή νερού ένα ταμιευτήρα, τέσσερις κόμβους ζήτησης και έξι αγωγούς.

Βήμα 1<sup>ο</sup>: Προσθήκη Κόμβων.

Προσθήκη των κόμβων ζήτησης και πηγών νερού μέσω του toolbar στο network map (Εικόνα 25). Επιλέγουμε τα εικονίδια προσθήκης αντικειμένου στο Toolbar (  για ταμιευτήρες και  για κόμβους) και τα τοποθετούμε στις επιθυμητές θέσεις στο network map. Από την διεύθυνση View->Options->Notation επιλέγοντας το Displays Nodes εμφανίζονται τα ID των αντικειμένων. (Εικόνα 24)




Εικόνα 25: Προσθήκη κόμβων.



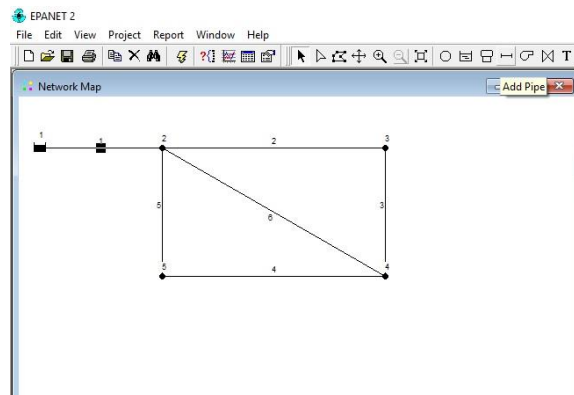
Εικόνα 24: Καρτέλα Map Options

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Προσθήκη αγωγών στο δίκτυο.

Επιλέγουμε το εικονίδιο προσθήκης των αγωγών από το Toolbar . Η ένωση των κόμβων του δικτύου γίνεται με επιλέγοντας με τον κέρσορα του υπολογιστή τον κόμβο αρχής, αφότου επιλεχθεί θα εμφανιστεί στο network map μια διακεκομμένη γραμμή που ακολουθεί τον κέρσορα. Η δημιουργία του αγωγού γίνεται επιλέγοντας με τον κέρσορα τον επιθυμητό κόμβο

πέρατος για τον σωλήνα. Πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία μέχρι όλοι οι κόμβοι του δικτύου να έχουν συνδεσιμότητα (Εικόνα 26). Από το Map Options επιλέγουμε την εμφάνιση των ID των αγωγών.

Το EPANET δίνει τη δυνατότητα, η αποτύπωση του δικτύου στο περιβάλλον εργασίας του να μην ανταποκρίνεται στη φυσική του κλίμακα, αυτό γίνεται απενεργοποιώντας με δεξί κλικ την επιλογή του Auto-Length στο Status Bar (βλ. Ενότητα 2.5.3)



Εικόνα 26: Προσθήκη αγωγών στο δίκτυο

**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** Εισαγωγή των ιδιοτήτων του δικτύου.

Με διπλό κλικ επάνω στα σημεία του δικτύου ανοίγει η καρτέλα του Property editor στην οποία εισάγονται οι ιδιότητες κάθε αντικειμένου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα λόγω απλότητας του δικτύου είναι απλή η εισαγωγή των στοιχείων από το Property editor. Για μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα δίκτυα προτιμάτε το Data Browser. Για τον ταμιευτήρα συμπληρώνουμε το κελί του υψομέτρου, για τους αγωγούς τα κελιά της διαμέτρου, του μήκους και της τραχύτητας ενώ για τους κόμβους το υψόμετρο και τη ζήτηση.

Στους παρακάτω πίνακες αποτυπώνονται τα δεδομένα για το συγκεκριμένο παράδειγμα.

Πίνακας 3 Πίνακας Κόμβων.

[JUNCTIONS]		
;ID	Elev	Demand

2	220	5
3	200	8
4	208	4
5	215	7



Πίνακας 4 Πίνακας Ταμιευτήρα.



[RESERVOIRS]	
;ID	Head
1	250

Πίνακας 5 Πίνακας Αγωγών.

[PIPES]							
;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
1	1	2	100	200	1	0	Open
2	2	3	100	100	1	0	Open
3	3	4	500	100	1	0	Open
4	4	5	500	100	1	0	Open
5	5	2	500	100	1	0	Open
6	2	4	500	100	1	0	Open

#### Βήμα 4<sup>ο</sup>: Αποθήκευση και ανάλυση δικτύου.

Η αποθήκευση επιτυγχάνεται είτε με το εικονίδιο  στο Toolbar είτε από την επιλογή στο Menu bar File->Save ή Save as. Αφότου αποθηκευτεί το δίκτυο, η εκτέλεση της προσομοίωσης πραγματοποιείται επιλέγοντας το εικονίδιο . Εφόσον η υδραυλική επίλυση πραγματοποιηθεί χωρίς σφάλματα [βλέπε ενότητα 4.10] εμφανίζεται το παράθυρο με μήνυμα «Run was successful». Το EPANET προσφέρει ποικίλους τρόπους παρουσίασης των αποτελεσμάτων του. Υπάρχει η δυνατότητα παρουσίασης της υδραυλικής συμπεριφοράς ενός ή περισσότερων αντικειμένων καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης μέσα από γραφήματα (π.χ πως μεταβάλλεται η παροχή αγωγού ή η πίεση ενός κόμβου σε κάθε χρονικό βήμα) ή η προβολή της υδραυλικής εικόνας όλων των αντικειμένων σε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα μέσα από πίνακες (π.χ πίεση όλων κόμβων σε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα).

Συγκεκριμένα το εικονίδιο  από το toolbar δημιουργεί γραφικές παραστάσεις διάφορων παραμέτρων (παροχή, ζήτηση, πίεση, κτλ) συναρτήσει του χρόνου για συγκεκριμένα αντικείμενα του δικτύου. Με την επιλογή  παρουσιάζονται οι τιμές παραμέτρων για όλους τους κόμβους ή αγωγούς για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή [Εικόνα 27].

Στο παρών παράδειγμα, η ανάλυση που γίνεται στο δίκτυο δεν περιέχει μεταβολή της ζήτησης επομένως δεν υπάρχει χρονική διακύμανση των παροχών οπότε δεν έχει νόημα η παρουσίαση γραφικών παραστάσεων συναρτήσει του χρόνου.

Network Table - Nodes			
Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc 2	5.00	249.54	29.54
Junc 3	8.00	246.64	46.64
Junc 4	4.00	246.24	38.24
Junc 5	7.00	245.54	30.54
Resvr 1	-24.00	250.00	0.00

*Εικόνα 27: Πίνακας παρουσίασης των τιμών ζήτησης, υψομέτρου, πίεσης ανά κόμβο.*

#### 4.7 Γραμμη εντολών EPANET (Command line EPANET)

Το EPANET διαθέτει την ικανότητα να εκτελείται και από γραμμές εντολών μέσα από ένα παράθυρο DOS. Σε αυτή τη περίπτωση, τα δεδομένα εισόδου εισάγονται στο λογισμικό μέσα από αρχείο κειμένου και τα αποτελέσματα τυπώνονται επίσης σε αρχείο κειμένου. Η γραμμή εντολής για να εκτελεσθεί το EPANET με αυτό το τρόπο είναι :

EPANET2d inpfile rptfile

Όπου inpfile ονομάζεται το αρχείο εισόδου και rptfile το αρχείο εξόδου.

## 4.8 Αρχείο εισόδου – Input file

Το αρχείο εισόδου για το command line EPANET έχει την ίδια δομή με το αρχείο που δημιουργείται από το γραφικό EPANET από τις εντολές :File->Export->Network. Η δομή του αρχείου χωρίζεται σε ενότητες, όπου κάθε ενότητα έχει αφετηρία μια λέξη κλειδί κλεισμένη σε αγκύλες [ ]. Οι ενότητες με τις αντίστοιχες λέξεις κλειδιά περιέχονται στον παρακάτω πίνακα.

<i>Network Components</i>	<i>System Operation</i>	<i>Water Quality</i>	<i>Options and Reporting</i>	<i>Network Map/Tags</i>
[TITLE]	[CURVES]	[QUALITY]	[OPTIONS]	[COORDINATES]
[JUNCTIONS]	[PATTERNS]	[REACTIONS]	[TIMES]	[VERTICES]
[RESERVOIRS]	[ENERGY]	[SOURCES]	[REPORT]	[LABELS]
[TANKS]	[STATUS]	[MIXING]		[BACKDROP]
[PIPES]	[CONTROLS]			[TAGS]
[PUMPS]	[RULES]			
[VALVES]	[DEMANDS]			
[EMITTERS]				

*Πίνακας 6 Ενότητες αρχείου εισόδου.*

Η σειρά των τμημάτων δεν είναι σημαντική για το λογισμικό, παρόλα αυτά ένας κόμβος πρέπει να ορισθεί στις ενότητες [JUNCTIONS], [RESERVOIRS], [TANKS], [PIPES], [PUMPS] ή [VALVES] πριν γίνει οποιαδήποτε αναφορά σε αυτόν. Επομένως είναι προτιμότερο αυτές οι ενότητες να συμπληρώνονται αμέσως μετά την έναρξη συγγραφής του αρχείου. Οι ενότητες που ορίζουν το network map/tags δεν είναι απαραίτητες για το command line EPANET. Κάθε ενότητα μπορεί να περιέχει μία ή παραπάνω γραμμές δεδομένων ενώ κενές γραμμές δύναται να εντοπίζονται σε οποιοδήποτε σημείο του αρχείου. Η χρήση ερωτηματικών (;) γίνεται προκειμένου να διαχωρίζονται τα σχόλια του προγραμματιστή από τα δεδομένα εισόδου. Ο μέγιστος αριθμός χαρακτήρων κάθε γραμμής είναι το 255. Η ταυτοποίηση των αντικειμένων του δικτύου γίνεται μέσα από τη στήλη των ID όπου ορίζονται τα ονόματά τους. Η Εικόνα 28 παρουσιάζει τμήμα του input file για το δίκτυο της ενότητας 4.6. Σε αυτήν φαίνεται η εκκίνηση του αρχείου με τη λέξη κλειδί [TITLE] και στη συνέχεια ακολουθούν ο ορισμός των κόμβων ζήτησης, του ταμιευτήρα και των αγωγών. Η απουσία δεξαμενής από το δίκτυο διατυπώνεται με κενή γραμμή κάτω από την αντίστοιχη ενότητα.

```

File Edit Format View Help
[TITLE]

[JUNCTIONS]
;ID          Elev          Demand          Pattern
2           220           5
3           200           8
4           208           4
5           215           7

[RESERVOIRS]
;ID          Head          Pattern
1           250
;

[TANKS]
;ID          Elevation          InitLevel          MinLevel

[PIPES]
;ID          Node1          Node2
1           1           2
2           2           3
3           3           4
4           4           5
5           5           2

```

Εικόνα 28: Παράδειγμα από τμήμα του Input αρχείου για το δίκτυο της ενότητας 2.7

Στη συνέχεια ακολουθεί ο τρόπος σύνταξης των ενοτήτων που απαιτήθηκαν για τη συγκεκριμένη εργασία:

- [JUNCTIONS]

Σκοπός είναι ο ορισμός όλων των κόμβων ζήτησης του δικτύου. Η δομή της ενότητας περιλαμβάνει το ID κόμβου, το υψόμετρο, τη βασική ζήτηση νερού και το πρότυπο της ζήτησης (αν υφίσταται). Στην ενότητα των Junctions πρέπει οπωσδήποτε να ορίζεται τουλάχιστον ένας κόμβος. Παρατηρούμε ότι παρότι δεν έχει ορισθεί κάποιο πρότυπο μεταβολής της ζήτησης, δημιουργείται η αντίστοιχη στήλη στην ενότητα των κόμβων αλλά παραμένει κενή. Με τη χρήση του ερωτηματικού στο τέλος της σειράς δηλώνεται στο λογισμικό η αλλαγή σειράς. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την περιγραφή του δικτύου προκειμένου να μη δοθεί ίδια ονοματολογία, δηλαδή ίδιο ID, σε αντικείμενα ίδιας φύσης. Είναι όμως εφικτό να ονομαστούν με την ίδια ετικέτα αντικείμενα διαφορετικής φύσης, όπως για παράδειγμα ένας αγωγός και

έναν κόμβο. Ακολουθεί παράδειγμα για τον τρόπο δόμησης της ενότητας των κόμβων ζήτησης σε αρχείο κειμένου.

Παράδειγμα:

[JUNCTIONS]

;ID	Elev.	Demand	Pattern
;-----			
2	220	5	;
3	200	8	;
4	208	4	;
5	215	7	;

- [OPTIONS]

Η συγκεκριμένη ενότητα ορίζει τις υδραυλικές παραμέτρους της ανάλυσης. Γίνεται επιλογή της μονάδας μέτρησης της παροχής, επιλέγεται φόρμουλα για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών, επιλέγεται το ειδικό βάρος του νερού καθώς ορίζεται και ο μέγιστος αριθμός επαναληπτικών διαδικασιών για την επίλυση του μη γραμμικού συστήματος εξισώσεων. Τέλος ορίζεται και το κριτήριο σύγκρισης (ακρίβεια) της σύγκλισης των υδραυλικών αναλύσεων. Παρακάτω δίνεται παράδειγμα της δομής της ενότητας και διευκρινίζονται οι ορισμοί που πρέπει να εισαχθούν στο αρχείο κειμένου του προγράμματος.

Η δομή της ορίζεται ως :

[OPTIONS]

UNITS

LPS

HEADLOSS	D-W
SPECIFIC GRAVITY	Value
TRIALS	Value
ACCURACY	Value
UNBALANCED	STOP/CONTINUE/CONTINUE n

#### Ορισμοί:

- i. UNITS: Ορίζεται η μονάδα μέτρησης της παροχής. Επιλέγεται LPS (Liters per second)
- ii. HEADLOSS: Επιλέγεται η φόρμουλα υπολογισμού των γραμμικών απωλειών. Έχει επιλεχθεί η φόρμουλα Darcy-Weisbach (D-W)
- iii. SPECIFIC GRAVITY: Ειδικό βάρος νερού. Επιλέγεται η τιμή 1 (Αδιάστατη).
- iv. TRIALS: Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση ενός δικτύου. Η προκαθορισμένη τιμή είναι 40
- v. ACCURACY: Ορίζει το κριτήριο σύγκλισης που καθορίζει πότε έχει υπάρξει υδραυλική λύση. Η προκαθορισμένη τιμή είναι το 0.001
- vi. UNBALANCED: Ορίζει ποια θα είναι η συνέχεια της εκτέλεσης εφόσον δε βρεθεί λύση μετά από τις επαναλήψεις που τίθενται στην επιλογή TRIALS. STOP σταματάει την ανάλυση. CONTINUE συνεχίζει μέχρι να βρεθεί υδραυλική λύση ενώ το CONTINUE n συνεχίζει για n επαναλήψεις.

- [PIPES]

Στο συγκεκριμένο τμήμα γίνεται ο ορισμός όλων των αγωγών του δικτύου. Η δομή αποτελείται από το όνομα – ετικέτα των αγωγών, το όνομα του κόμβου αφετηρίας, το όνομα του κόμβου πέρατος, το μήκος του αγωγού, τη διάμετρος του αγωγού, τον συντελεστή τραχύτητας, τον συντελεστή τοπικών απωλειών και την κατάσταση του αγωγού δηλαδή αν είναι ανοικτός , κλειστός ή περιέχει βαλβίδα ελέγχου ροής. Η παρουσία της βαλβίδας συμβολίζεται ως CV στο αρχείο κειμένου και σηματοδοτεί ότι η



ροή γίνεται μονάχα προς τον κόμβο πέρατος, δηλαδή τον κόμβο που ορίζεται από την 3<sup>η</sup> στήλη της ενότητας. .

Για τη φόρμουλα Darcy-Weisbach που χρησιμοποιείται ο συντελεστής τραχύτητας έχει μονάδες μήκους (mm). Ακολουθεί απλό παράδειγμα δύο σωλήνων για τον τρόπο δόμησης της ενότητας των αγωγών . Εξακολουθεί να ισχύει ο κανόνας που απαγορεύει να δοθεί ίδιο όνομα σε δύο διαφορετικούς αγωγούς του δικτύου.

Παράδειγμα:

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diam.	Roughness	Mloss	Status
;-----							
1	1	2	100	200	1	0	OPEN;
2	2	3	100	100	1	0	CV;

- [REPORT]

Η ενότητα αυτή ορίζει τη δομή του αρχείου εξόδου. Πρόκειται για τις εντολές προς το λογισμικό για το ποια στοιχεία θα εμφανίσει μετά την εκτέλεση της ανάλυσης.

Δομή:

PAGESIZE	Value;
FILE	filename
STATUS	YES/NO/FULL
SUMMARY	YES/NO
NODES	NONE/ALL/Node1 Node2...

LINKS

NONE/ALL/Node1 Node2..

### Ορισμοί:

- i. PAGESITE: Καθορίζει τον αριθμό των γραμμών ανά σελίδα για το αρχείο εξόδου. Η προκαθορισμένη εντολή δε θέτει κάποιο όριο.
- ii. FILE: Παρέχει το όνομα του αρχείου εξόδου.
- iii. STATUS: Καθορίζει πότε θα εμφανίζεται μήνυμα με την υδραυλική κατάσταση του δικτύου κατά την εκτέλεση. Αν επιλεγθεί YES, θα τυπώνεται αναφορά όποτε ένα στοιχείο του δικτύου μεταβάλλει τη κατάσταση του. Αν επιλεγθεί FULL, θα τυπώνεται η αλλαγή της κατάστασης του στοιχείου και σε ποιιά επανάληψη προέκυψε. Η προκαθορισμένη επιλογή είναι το NO.
- iv. SUMMARY: Καθορίζει την εμφάνιση ενός συνοπτικού πίνακα με τις λεπτομέρειες της ανάλυσης.
- v. NODES/LINKS : Καθορίζουν ποιοι αγωγοί ή κόμβοι θα τυπωθούν στα αποτελέσματα.

- [RESERVOIRS]

Η ενότητα αυτή ορίζει όλους τους ταμιευτήρες του δικτύου. Η δομή κάθε γραμμής αποτελείται από το ID του ταμιευτήρα, το υψόμετρο στάθμης, το πρότυπο μεταβολής υψομέτρου στάθμης όταν είναι αναγκαίο να μεταβάλλεται η στάθμη του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για κάθε δίκτυο, είναι υποχρεωτική η παρουσία ενός τουλάχιστον ταμιευτήρα ή δεξαμενής.

Παράδειγμα:

[RESERVOIRS]

;ID Head Pattern

;-----

1 250 ;

## 4.9 Αρχείο εξόδου – Output file.

Τα περιεχόμενα του αρχείου εξόδου από το command line EPANET καθορίζεται από την ενότητα [REPORT] του input file. Η δομή του περιέχει τέσσερις ενότητες:

- Status section
- (Energy section)
- Nodes section
- Links section

### A. Status section:

Η ενότητα του Status αναφέρει την αρχική κατάσταση όλων των στοιχείων του δικτύου καθώς και τις αλλαγές τους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το status των ταμιευτήρων και των δεξαμενών αναφέρει τα χρονικά σημεία στα οποία παρουσιάζουν ανώτατη ή μηδενική στάθμη (filling or emptying). Το status των αγωγών αναφέρεται πότε είναι ανοικτοί ή κλειστοί (Open or closed). Δύναται να επιλεγθεί να μην εμφανίζεται στο αρχείο εξόδου η συγκεκριμένη ενότητα.

### B. Nodes section:

Η ενότητα των κόμβων καθορίζεται από το [REPORT] του αρχείου εισόδου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης τυπώνονται για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης εκτός αν προκύψει κάποιο σφάλμα στο δίκτυο κατά της διάρκεια της ανάλυσης. Η προκαθορισμένη επιλογή για τα μεγέθη που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα των κόμβων αφορά τη ζήτηση, το υδραυλικό ύψος και την πίεση.

### C. Links section:

Η ενότητα των αγωγών καθορίζεται επίσης από το [REPORT] του αρχείου εισόδου. Τα μεγέθη που παρουσιάζονται στο αρχείο εξόδου είναι η παροχή, η ταχύτητα και οι απώλειες ενέργειας.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται τμήμα ενός τυπικού αρχείου εξόδου. [Εικόνα 29]

```

Hydraulic Status:
-----
0:00:00: Balancing the network:
          Trial 1: relative flow change = 0.655564
          Trial 2: relative flow change = 0.082951
          Trial 3: relative flow change = 0.007809
          Trial 4: relative flow change = 0.000222
0:00:00: Balanced after 4 trials
0:00:00: Reservoir 1 is emptying

Node Results:
-----
Node          Demand      Head      Pressure
              L/s         m         m
-----
2              5.00        249.54    29.54
3              8.00        246.64    46.64
4              4.00        246.24    38.24
5              7.00        245.54    30.54
1             -24.00       250.00    -0.00  Reservoir

Link Results:
-----
Link          Flow      Velocity  Headloss
              L/s         m/s       /1000m
-----
1             24.00        0.76      4.64
2              9.53        1.21     28.96
3              1.53        0.19      0.80
4              2.03        0.26      1.39
5             -4.97        0.63      7.98
6              4.51        0.57      6.59
    
```

Εικόνα 29: Τμήμα αρχείου εξόδου.

#### 4.10 Σφάλματα EPANET (ERROR MESSAGES)

Η εκτέλεση μιας προσομοίωσης από το EPANET ενδέχεται να ανασταλεί λόγω σφαλμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη σχεδίαση του δικτύου (windows EPANET), τη δημιουργία αρχείου εισόδου (command line EPANET), την εισαγωγή μη ρεαλιστικών τιμών στις παραμέτρους εισόδου ή την αδυναμία του συστήματος για υδραυλική επίλυση λόγω πολυπλοκότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις εμφανίζεται ERROR MESSAGE στο status section του αρχείου εξόδου. Ο επόμενος πίνακας συγκεντρώνει τα πιθανά μηνύματα σφάλματος.

ID	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
101	Η ανάλυση τερματίστηκε λόγω ανεπαρκούς διαθέσιμης μνήμης.

- 110 Η ανάλυση τερματίστηκε λόγω αδυναμίας υδραυλικής επίλυσης των εξισώσεων. Απαιτείται έλεγχος για τυχόν έλλειψη συνδεσιμότητας τμημάτων του δικτύου με δεξαμενή - ταμιευτήρα ή αδικαιολόγητες τιμές εισόδου.
- 200 Ένα ή περισσότερα σφάλματα στα δεδομένα εισόδου. Η φύση του σφάλματος θα περιγραφεί τα παρακάτω σφάλματα.
- 201 Υπάρχει συντακτικό λάθος σε γραμμή του αρχείου εισόδου. Είναι πιθανότερο να έχει συμβεί σε αρχείο που συντάχθηκε εξωτερικά απο το EPANET.
- 202 Μη ρεαλιστική τιμή έχει εισαχθεί σε παράμετρο του δικτύου.
- 203 Αντικείμενο αναφέρεται σε απροσδιόριστο κόμβο.
- 204 Αντικείμενο αναφέρεται σε απροσδιόριστο σύνδεσμο.
- 205 Αντικείμενο αναφέρεται σε απροσδιόριστο χρονικό πρότυπο.
- 206 Αντικείμενο αναφέρεται σε απροσδιόριστη καμπύλη.
- 207 Προσπάθεια έγινε να ελεγχθεί δικλείδα ελέγχου. Αγωγός έχει τεθεί σε κατάσταση δικλείδας ελέγχου (CV) από το property editor. Η κατάσταση αυτή δε δύναται να μεταβληθεί από κανόνες ελέγχου.
- 208 Έχει πραγματοποιηθεί αναφορά σε απροσδιόριστο κόμβο. Πιθανόν να αφορά έναν έλεγχο.
- 209 Μη ρεαλιστική τιμή έχει τεθεί σε κόμβο από το property editor.
- 210 Έχει πραγματοποιηθεί αναφορά σε απροσδιόριστο σύνδεσμο. Πιθανόν να αφορά έναν έλεγχο.
- 211 Μη ρεαλιστική τιμή έχει τεθεί σε σύνδεσμο από το property editor.
- 212 Μια ανάλυση ανίχνευσης πηγής αναφέρεται σε έναν απροσδιόριστο κόμβο.

- 213 Μη ρεαλιστική τιμή σε επιλογή ανάλυσης (π.χ αρνητική τιμή σε χρονικό βήμα)
- 214 Υπερβαση ορίου χαρακτήρων σε γραμμή του αρχείου εισόδου (<255)
- 215 Δύο ή περισσότεροι κόμβοι αναφέρονται με ίδιο ID
- 216 Ενεργειακά δεδομένα παρέχονται για απροσδιόριστη αντλία.
- 217 Λανθασμένα ενεργειακά δεδομένα παρέχονται σε αντλία.
- 219 Δικλείδα συνδέεται εσφαλμένα με δεξαμενή-ταμιευτήρα. Τύποι δικλείδας όπως PRV,PSV,FCV δε δύνανται να συνδέονται άμεσα με δεξαμενή-ταμιευτήρα.
- 220 Μια βαλβίδα συνδέεται παράνομα με μια άλλη βαλβίδα.
- 221 Βασικός κανόνας ελέγχου περιέχει λανθασμένη συνθήκη.
- 223 Ανεπαρκής αριθμός κόμβων. Ένα δίκτυο πρέπει να περιέχει τουλάχιστον μια δεξαμενή/ταμιευτήρα και ένα κόμβο διασταύρωσης.
- 224 Ανεπάρκεια ταμιευτήρα ή δεξαμενής.
- 225 Λανθασμένο πάνω/κάτω όριο επιπέδου στάθμης για δεξαμενή.
- 226 Μη παροχή καμπύλη αντλίας σε αντλία.
- 227 Λανθασμένη καμπύλη αντλίας σε αντλία.
- 230 Καμπύλη δε διαθέτει αυξανόμενες τιμές X.
- 233 Κόμβος δε συνδέεται με συνδέσμους.
- 302 Το σύστημα δε μπορεί να ανοίξει προσωρινό αρχείο εισόδου.
- 303 Το σύστημα δε μπορεί να ανοίξει το status section του αρχείου εξόδου.
- 308 Αδυναμία αποθήκευσης των αποτελεσμάτων.







## 5 Υδραυλική ανάλυση δικτύου υπό την αστοχία αγωγών.

Η σεισμική δραστηριότητα ενδέχεται να προκαλέσει βλάβες στα δομικά στοιχεία στο υπέδαφος. Για την ανάλυση αξιοπιστίας ενός συστήματος αγωγών υδροδότησης πρέπει να γίνει σε πρώτο στάδιο εκτίμηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την πιθανότητα αστοχίας ενός μεμονωμένου αγωγού και στη συνέχεια να εκφραστεί μια σχέση που ορίζει την ευαισθησία του κάθε αγωγού προς την θραύση του.

Η εύρεση της αξιοπιστίας του δικτύου, πέρα από την εκτίμηση της θραύσης ή όχι των αγωγών, ενέχει και το στοιχείο της επαρκούς υδραυλικής κάλυψης. Με την έννοια αυτή πρέπει να μελετηθεί πέρα από το κομμάτι της αστοχίας και της συνδεσιμότητας των αγωγών του δικτύου, ο βαθμός στον οποίο η ένταση ενός σεισμού επηρεάζει την υδραυλική συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος. Κριτήριο για αυτό αποτελεί η μετατόπιση της πιεζομετρικής γραμμής, δηλαδή η δυνατότητα του δικτύου όχι μόνο να παρέχει νερό σε ένα κόμβο ζήτησης αλλά να εξασφαλίζει και την κατάλληλη πίεση προκειμένου ο κόμβος να καθίσταται λειτουργικός.

Η έγκυρη εκτίμηση της ροής και της πιεζομετρικής γραμμής σε ένα δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει αστοχίες αγωγών λόγω σεισμικής δραστηριότητας προϋποθέτει την ορθή αναπαράσταση της αστοχίας πριν την εκτέλεση της ανάλυσης. Θα γίνει περιγραφή της μεθοδολογίας GIRAFFE (Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes) η οποία αναπτύσσεται για την μοντελοποίηση και την υδραυλική ανάλυση δικτύων διανομής που έχουν καταστροφές από σεισμική δραστηριότητα. Με τον όρο της αστοχίας ενός αγωγού, εννοείται ο ολοκληρωτικός διαχωρισμός του ανάντη και του κατόντη τμήματος του σημείου θραύσης έτσι ώστε να μην είναι δυνατή η ροή, χάνοντας τελικά την ικανότητα μεταφοράς νερού.

Το ζήτημα της απόκρισης ενός δικτύου διανομής απέναντι σε τυχόν σεισμική δραστηριότητα είναι πολυπαραγοντικό. Η συμπεριφοράς του συστήματος θα καθοριστεί από την ένταση του σεισμού, τη δομή του δικτύου, τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο σύνδεσης των αγωγών αλλά και το χρονικό ορίζοντα εκδήλωσης του σεισμού καθώς σημαντικός παράγοντας που θα

επιηρεάσει την πιεζομετρική γραμμή είναι η ζήτηση από τους κόμβους, η οποία διακυμαίνεται καθόλη τη διάρκεια του χρόνου.

## 5.1 Τρωτότητα αγωγών δικτύου διανομής.

Με τον όρο τρωτότητα (vulnerability) νοείται η συμπεριφορά ενός υπό διακινδύνευση στοιχείου που οφείλεται σε ένα φαινόμενο με μεταβλητή ένταση. Ιδιαίτερα για την περίπτωση σεισμού η εμπειρία έχει δείξει ότι τα δίκτυα διανομής είναι αρκετά τρωτά σε ισχυρούς σεισμούς παρουσιάζοντας θραύσεις μετά την εκδήλωσή τους. Οι αστοχίες που εμφανίζονται οφείλονται στα εξής φαινόμενα:

- Εδαφική ταλάντωση, δηλαδή αιφνίδιες παραμορφώσεις του εδάφους εξαιτίας της διάδοσης σεισμικών κυμάτων. Οι αστοχίες που προκαλούνται από την εδαφική ταλάντωση εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής του δικτύου και άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου.
- Διασταυρώσεις με ρήγματα, στις περιοχές των ρηγμάτων εμφανίζονται τοπικές μόνιμες παραμορφώσεις. Είναι προτιμότερο, εάν αυτό είναι εφικτό, να αποφεύγεται η διασταύρωση του δικτύου με ρήγματα. Όπου αυτό δεν είναι δυνατόν, προτιμάται να μην κατασκευάζονται συνδέσεις και αλλαγές διευθύνσεων σε περιοχές ρηγμάτων και τα δίκτυα να βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος.
- Καθιζήσεις, σε ζώνες μετάβασης από μία στρώση σε μία άλλη, είναι συχνό φαινόμενο να συμβαίνουν διαφορικές καθιζήσεις, με αποτέλεσμα την αστοχία αγωγών.
- Ρευστοποίηση, δηλαδή μετατροπή κορεσμένου, μη συνεκτικού εδάφους από στερεά μορφή σε υγρή, ως αποτέλεσμα της αυξημένης πίεσης του νερού των πόρων που συνεπάγεται μερική ή ολική απώλεια της διατμητικής αντοχής. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης εμφανίζεται όταν χαλαρά, κορεσμένα, κοκκώδη εδάφη υπόκεινται σε ισχυρή ταλάντωση. Η ρευστοποίηση, λόγω της άνωσης που αναπτύσσεται, έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση των υπόγειων κατασκευών και σε περιπτώσεις όπως έντονη εδαφική κλίση ή μεγάλα επιφανειακά φορτία, την ανάπτυξη μόνιμων παραμορφώσεων που οδηγούν όλες τις κατασκευές που εδράζονται στο συγκεκριμένο έδαφος σε αστοχία.

Για την διατύπωση μιας σχέσης που εκφράζει την τρωτότητα θα πρέπει επομένως να ληφθούν υπόψη οι σεισμικές και γεωλογικές παράμετροι της περιοχής, η τοπολογία του δικτύου καθώς και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές των στοιχείων που συνθέτουν το δίκτυο. Σημαντικός παράγοντας για την καλύτερη μελέτη του φαινομένου της τρωτότητας υπήρξε και το γεγονός καταγραφής ιστορικών δεδομένων για τη συμπεριφορά του δικτύου στη διάρκεια του χρόνου και κάτω από κανονικές ή μη συνθήκες λειτουργίας.

Η έρευνα για την επίδραση της σεισμικής συμπεριφοράς στα δίκτυα ύδρευσης έχει ξεκινήσει προ τριακονταετίας και επικαιροποιείται συνεχώς. Τα αποτελέσματα των ερευνών δείχνουν ότι η τρωτότητα μπορεί να εκφραστεί από απλές έως πιο σύνθετες συναρτήσεις που λαμβάνουν υπόψη διάφορες παραμέτρους. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι η **μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV: Peak Ground Velocity)** και η **μέγιστη εδαφική παραμόρφωση (PGD : Peak Ground Deformation)**, οι οποίες προσδιορίζουν τη σεισμική διέγερση και παρουσιάζουν χωρική μεταβλητότητα, καθώς η έκταση ενός υπό μελέτη δικτύου ύδρευσης είναι μεγάλη. Άλλες δευτερεύουσες παράμετροι που μπορούν να ληφθούν υπόψη είναι το υλικό του σωλήνα, η διάμετρος, η διαβρωσιμότητα που εξαρτάται από τον τύπο εδάφους καθώς και το είδος σύνδεσης αγωγών. Στις συναρτήσεις εκτίμησης της τρωτότητας η εξαρτημένη μεταβλητή συνήθως είναι ο **ρυθμός επισκευής του σωλήνα**, ο οποίος συσχετίζεται ξεχωριστά για PGV και PGD. Οι συναρτήσεις της τρωτότητας προκύπτουν πιθανοτικά, κατόπιν στατιστικής ανάλυσης, βασιζόμενες σε παλαιότερα δεδομένα αστοχιών.

Από το σύνολο του ερευνητικού φάσματος, έχει προκύψει ότι οι οδηγίες των American Lifelines Alliance (ALA), αναφορικά με τους αγωγούς νερού, ανταποκρίνονται καλύτερα στα ευρωπαϊκά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα οι ALA το 2001 δημοσίευσαν ένα σύνολο λεπτομερών διαδικασιών για να εκτιμήσουν την πιθανότητα βλαβών υπό την επίδραση του σεισμού σε διάφορα στοιχεία, που συνθέτουν ένα δίκτυο ύδρευσης. Για υπόγειους αγωγούς, σχέσεις τρωτότητας δημιουργήθηκαν ξεχωριστά για επιδράσεις από μόνιμη παραμόρφωση του εδάφους και για επιδράσεις από την σεισμική του κίνηση. Η βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε για την δεύτερη κατηγορία επιδράσεων περιλαμβάνει επίπεδα ζημιών των αγωγών από 18 σεισμούς στην περίοδο 1923-1995. Στόχος των οδηγιών είναι να προτείνουν μια

αποτελεσματική και συγχρόνως οικονομική προσέγγιση του σεισμικού σχεδιασμού αγωγών νερού, εφαρμόσιμη σε όλη την επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών και όχι μόνο. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις σχεδιασμού για διαφορετικά είδη αγωγών, ανάλογα με την χρησιμότητα τους στην απόδοση του δικτύου και τις τοπικές σεισμικές παραμέτρους. Η σχέση τρωτότητας – αγωγού που προτάθηκε από την ομάδα ALA είναι η  $K_1 \times 0.241 \times PGV$ , όπου  $K_1$  είναι συντελεστής που εκφράζει το υλικό των αγωγών, τον τρόπο σύνδεσης, τη διάμετρο και τις παραμέτρους εδάφους.

Από τα αίτια θραύσης αγωγού που προαναφέρθηκαν, είναι ορθό να δηλωθεί ότι η PGV υποδηλώνει την ισχυρή εδαφική ταλάντωση εξαιτίας της διάδοσης σεισμικών κυμάτων, ενώ η PGD σχετίζεται με φαινόμενα κατολισθήσεων, ρευστοποίησης του εδάφους και παρουσία ρήγματος στη θέση του αγωγού.

Σε περίπτωση μελέτης δικτύου με άγνωστα δεδομένα για τα υλικά των αγωγών, τη διάμετρο τους, την αντίσταση τους στη διάβρωση του εδάφους χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις, όπου RR(Repair Rate) είναι ο ρυθμός επισκευής των σωλήνων για 100m μήκους σωλήνα:

$$RR_{PGV} = 0.01425 \cdot PGV \quad (29)$$

$$RR_{PGD} = 4.281 \cdot PGD^{0.319} \quad (30)$$

Το PGV σε cm/s και το PGD σε cm.

Στη διαφορετική περίπτωση που οι παράμετροι προσαρμογής σχετικές με το υλικό  $K_1$ ,  $K_2$ , οι οποίες δίνονται σε μορφή πίνακα στις οδηγίες των ALA για τα διάφορα υλικά σωλήνων, είναι γνωστές, τότε οι παραπάνω σχέσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$RR_{PGV} = K_1 \cdot 0.01425 \cdot PGV \quad (31)$$

$$RR_{PGD} = K_2 \cdot 4.281 \cdot PGD^{0.319} \quad (32)$$

Η σεισμική ένταση σχετίζεται τόσο με τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV, όσο και με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA. Εξαιτίας όμως της σχέσης που έχει η PGV με τις εδαφικές τάσεις από το σεισμό, που είναι η κύρια αιτία των ζημιών των αγωγών αλλά και της ευαισθησίας που εμφανίζει σε μακρύτερες περιόδους συγκριτικά με την PGA άρα και της μεγαλύτερη ευκολίας για τη διαμόρφωση ντετερμινιστικών μοντέλων εκτίμησης, η PGV είναι πιο ευρέως διαδεδομένη σεισμική παράμετρος για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των αγωγών.

Από τη στιγμή που ο ρυθμός επισκευής (RR) είναι γνωστός, δηλαδή ο αριθμός θραύσεων κατά μήκος του σωλήνα, η πιθανότητα αστοχίας του σωλήνα μπορεί να υπολογιστεί με αφαίρεση από τη μονάδα της πιθανότητας μηδενικών θραύσεων κατά μήκος του σωλήνα. Σύμφωνα με τις οδηγίες των ALA, η πιθανότητα αστοχίας του σωλήνα  $P_f$  υπολογίζεται ως:

$$P_f = 1 - e^{-RR \cdot L} \quad (33)$$

όπου  $RR = \max(RR_{PGV}, RR_{PGD})$  και L το μήκος του σωλήνα.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η σχέση (33) δεν λαμβάνει υπόψη το ιστορικό των θραύσεων του δικτύου, οπότε υπήρξε η αναγκαιότητα να εκφραστεί με ένα συντελεστή η παλαιότητα του δικτύου όσον αφορά τις αστοχίες που έχουν σημειωθεί είτε από σεισμό είτε όχι. Σε αυτή τη διαδικασία υπάρχει εύλογη δυσκολία να συγκεραστούν οι ζημιές των αγωγών λόγω σεισμού ή άλλων παραγόντων. Για τον υπολογισμό της τρωτότητας εξαιτίας μη σεισμικών δράσεων χρησιμοποιείται η ανάλυση επιβίωσης (survival analysis), η οποία απαιτεί για τη δημιουργία της δεδομένα για τον αριθμό των προηγούμενων θραύσεων, το υλικό του σωλήνα, τη διάμετρο και την ηλικία του δικτύου. Για την περίπτωση σεισμικής τρωτότητας όπως αναφέρθηκε, ακολουθούνται οι οδηγίες των ALA και χρησιμοποιώντας μια ορθολογιστική προσέγγιση τη συνδυάζουμε με τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβίωσης.

Οι σεισμικές και μη-σεισμικές επιδράσεις έχουν διακριτές διαφορές και δεν είναι πάντα εύκολο και καθολικά αποδεκτό να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα με τέτοιο τρόπο που να συνδυάζει τις καμπύλες επιβίωσης με αυτές της σεισμικής τρωτότητας. Γι'αυτό το λόγο η σχέση (33) τροποποιείται, ενσωματώνοντας τον όρο  $k(t)$ , ο οποίος είναι ο λόγος της καμπύλης επιβίωσης για την κατάσταση του αγωγού με τις ζημιές (NOPB $\neq$ 0, Number of Previous Breaks) με την κατάσταση του χωρίς καθόλου ζημιές (NOPB=0). Επομένως  $k(t)=S_{UD}(t)/S_D(t)$ , όπου οι δείκτες UD, D αναφέρονται στην κατάσταση του δικτύου χωρίς και με βλάβες αντίστοιχα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξαιτίας του γεγονότος ότι το δίκτυο της Ν.Αρτάκης είναι πρόταση υλοποίησης και προς κατασκευή ο λόγος  $k(t)$  θα θεωρηθεί ίσος με την μονάδα.

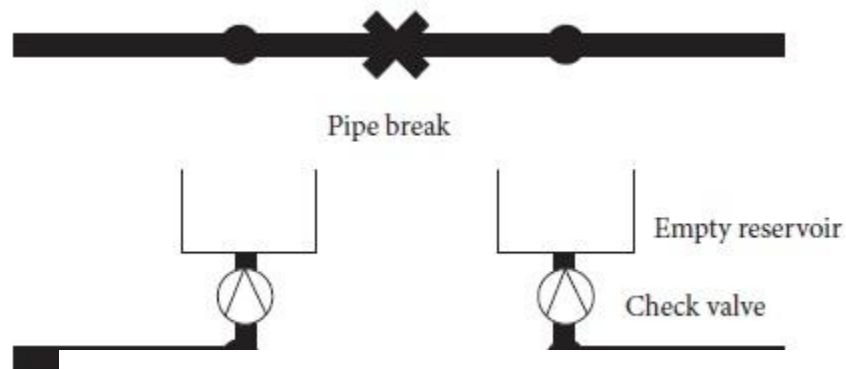
$$P_f(t) = 1 - e^{-k(t) \cdot RR \cdot L} \quad (34)$$

## 5.2 Αναπαράσταση αστοχίας.

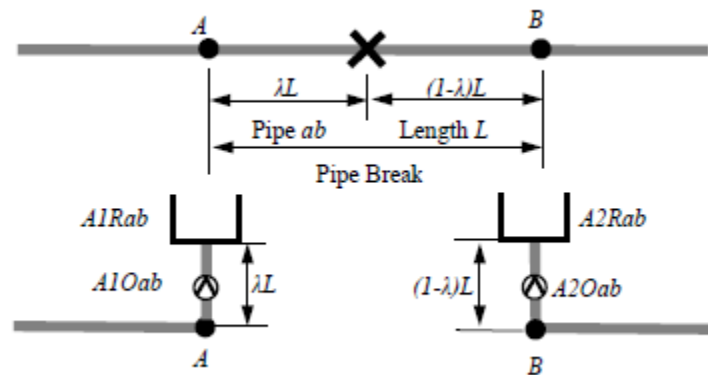
Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, ως αστοχία νοείται ο πλήρης διαχωρισμός του αγωγού. Το νερό πλέον ρέει από τα δύο σπασμένα άκρα στο περιβάλλον. Στην Εικόνα 31 και στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται το υδραυλικό μοντέλο ενός αγωγού που έχει αστοχήσει <sup>[1][3]</sup>. Θεωρείται ότι ο αγωγός AB (που συνδέει τους κόμβους A και B) σπάει. Το μήκος του αγωγού ισούται με L και το σημείο αστοχίας εντοπίζεται σε απόσταση λL από τον κόμβο αφετηρίας (κόμβος A). Η προσομοίωση γίνεται εξαλείφοντας αρχικά τον αγωγό AB. Στη συνέχεια προστίθενται δύο κενοί ταμιευτήρες (στο συγκεκριμένο παράδειγμα ονομάζονται A1Rab και A2Rab) των οποίων το υψόμετρο καθορίζεται με γραμμική παρεμβολή των υψομέτρων των κόμβων A και B. Έπειτα εισάγονται στο δίκτυο δύο νέοι αγωγοί (A10ab και A20ab) οι οποίοι έχουν την ίδια διάμετρο και τραχύτητα με τον αρχικό αγωγό AB. Οι νέοι αγωγοί συνδέουν τους κόμβους A και B με τους νέους ταμιευτήρες ενώ ελέγχεται προκειμένου ο συντελεστής τοπικών απωλειών να ισούται με την μονάδα και να εισαχθεί βαλβίδα προκειμένου η ροή να έχει πάντα κατεύθυνση προς τους ταμιευτήρες. Το παραπάνω εξασφαλίζεται από το EPANET με την αλλαγή της κατάστασης

(status) των νέων αγωγών σε CV. Στην παρούσα εργασία έγινε η παραδοχή ότι το σημείο αστοχίας θα εντοπίζεται στο μέσο του μήκους των αγωγών.

Η διαδικασία της προσομοίωσης της αστοχίας με την αντικατάσταση του σωλήνα που έχει υποστεί θραύση με δύο νέους σωλήνες κατευθυνόμενους προς κενή δεξαμενή, προσφέρει στη διαδικασία της υδραυλικής μελέτης τη δυνατότητα εκτίμησης των απωλειών νερού προς το έδαφος και μια ορθότερη εκτίμηση των γραμμικών απωλειών. Θα ήταν αδόκιμη μια προσέγγιση που θα αναπαριστούσε την θραύση αγωγού με μοναδικό κριτήριο την παύση της παροχέτευσης προς τον κατάντη κόμβο καθώς θα προέκυπταν εμφανώς αλλοιωμένα υδραυλικά αποτελέσματα όσον αφορά την παροχή και την πιεζομετρική γραμμή. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ως αστοχία αποκλειστικά το φαινόμενο της θραύσης και αγνοήθηκε η περίπτωση της διαρροής.



Εικόνα 31 Προσομοίωση αστοχίας αγωγού [1]



Εικόνα 30 Προσομοίωση αστοχίας αγωγού [2]

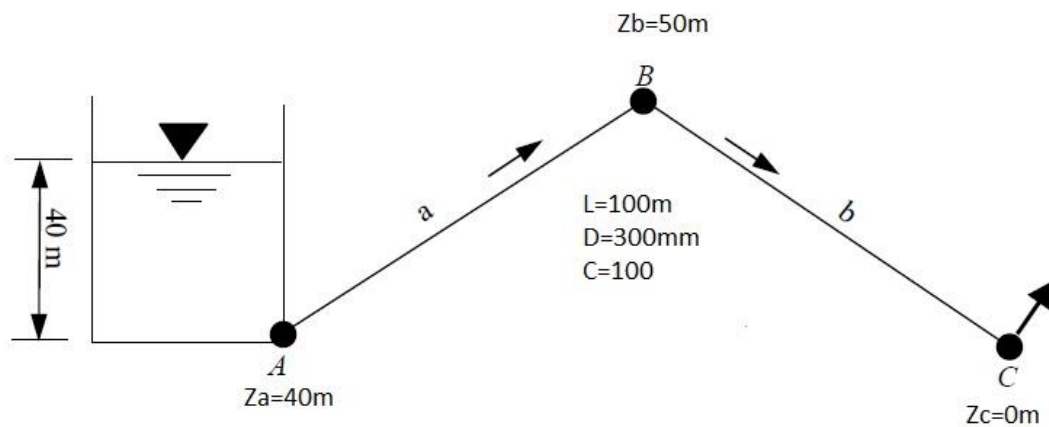
### 5.3 Αρνητικές Πιέσεις στο EPANET.

Η υδραυλική ανάλυση του δικτύου με τη χρήση του EPANET, γίνεται για ασυμπίεστη ροή σε αγωγούς υπό πίεση και βασίζεται στους θεμελιώδεις νόμους: της αρχής διατήρησης της μάζας και διατήρησης της ενέργειας [βλ.ενότητα 2.1.4]. Όπως έχει τονιστεί, ο νόμος της διατήρησης της μάζας εκφράζεται ως εξίσωση συνέχειας, η οποία υποδηλώνει πως όλες οι απαιτήσεις του συστήματος πρέπει να ικανοποιούνται. Η διατήρηση της ενέργειας σηματοδοτεί ότι η ροή γίνεται από τους κόμβους με μεγάλο ενεργειακό υψόμετρο προς τους κόμβους με χαμηλότερο. Η ενέργεια του νερού (11) ισούται με το ενεργειακό υψόμετρο, το οποίο είναι το άθροισμα του



σχετικού υψομέτρου και της πίεσης, ενώ η ταχύτητα (κινητική ενέργεια) αμελείται εξαιτίας των μικρών τιμών της. Η συμβατική υδραυλική ανάλυση από τον αλγόριθμο του EPANET δε διακρίνει αρνητικές και θετικές πιέσεις αλλά χρησιμοποιεί μονάχα τη διαφορά του υψομέτρου για τον προσανατολισμό της ροής προκειμένου να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις των κόμβων σε νερό. Η συγκεκριμένη λειτουργία του αλγορίθμου περί ικανοποίησης όλων των ζητήσεων, οδηγεί σε μη ρεαλιστικές υψηλές αρνητικές πιέσεις σε ορισμένους κόμβους. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό σε δίκτυα που έχουν υποστεί ζημιές από σεισμική δραστηριότητα, καθώς το άθροισμα των απωλειών νερού από αγωγούς που έχουν αστοχήσει, πιθανόν να είναι υψηλότερο από το νερό που παροχετεύεται από τη δεξαμενή του δικτύου.

Ο τρόπος με τον οποίο προκύπτουν αρνητικές τιμές πίεσης στο EPANET μπορεί να εξηγηθεί με το παρακάτω παράδειγμα. Θεωρώντας το απλό υδραυλικό δίκτυο της Εικόνα 32 αποτελούμενο από δύο αγωγούς και τρεις κόμβους, με τον κόμβο A να αντιπροσωπεύει δεξαμενή με επίπεδο στάθμης τα 40μ, το κόμβο B με υψόμετρο τα 50μ και τον κόμβο C καθορισμένο στα 0μ υψόμετρο προκειμένου να προσομοιώνει αγωγό που έχει αστοχήσει και έχει πάψει να είναι αεροστεγής. Γίνεται η παραδοχή ότι οι αγωγοί έχουν το ίδιο μήκος και διάμετρο, ενώ οι τοπικές απώλειες θα



Εικόνα 32 Δίκτυο με αρνητικές πιέσεις.

αγνοηθούν. Ο υπολογισμός των γραμμικών απωλειών για το συγκεκριμένο παράδειγμα για λόγους απλότητας θα γίνει με τη φόρμουλα του Hazen-Williams ((17), θεωρώντας συντελεστή τραχύτητας των αγωγών ίσο με 100. Το υδραυλικό ύψος στο κόμβο Α ισούται με 40μ. Η υψομετρική διαφορά συγκριτικά με το κόμβο C οδηγεί τη ροή από το κόμβο Α προς το C διαμέσου του κόμβου Β. Εφαρμόζοντας τη σχέση Hazen-William στους αγωγούς προκύπτουν τα αποτελέσματα:

$$H_A - H_B = \frac{10.7la}{C_a^{1.852} d_a^{4.87}} Q_a^{1.852} \quad (1)$$

$$H_B - H_C = \frac{10.7lb}{C_b^{1.852} d_b^{4.87}} Q_b^{1.852} \quad (2)$$

Από το νόμο διατήρησης της συνέχειας ισχύει ότι  $Q_A=Q_B$ . Συγκρίνοντας τις εξισώσεις 1-2 προκύπτει ότι:

$$H_A - H_B = H_B - H_C$$

αφού  $L_A=L_B$ ,  $C_A=C_B$ ,  $D_a=D_b$  και  $Q_A=Q_B$ .

Λύνοντας ως προς  $H_B$ :

$$H_B = \frac{1}{2} * (H_A - H_C) = \frac{1}{2} * (40 - 0) = 20m \quad (3)$$

Το υδραυλικό ύψος όμως ισούται με το άθροισμα του υψομέτρου  $H_{BE}$  και της πίεσης  $H_{BP}$ . Το υψόμετρο έχει θεωρηθεί ίσο με 50m οπότε:

$$H_{BP} = H_B - H_{BE} = 20 - 50 = -30m \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη  $H_A=40m$  και  $H_B=20m$  στην εξίσωση (1) του παραδείγματος:

$$Q_b = \left( \frac{C_b^{1.852} d_b^{4.87} (H_B - H_C)}{10.7 l_b} \right)^{1/1.852} = \left( \frac{100^{1.852} 0.3^{4.87} * 30}{10.7 * 100} \right)^{1/1.852} = 612.2 (L/s) \quad (5)$$

Με τη συμβατική υδραυλική ανάλυση (ανάλογη του EPANET), η παροχή υπολογίσθηκε 491,8L/s στους αγωγούς a και b, ενώ η πίεση προέκυψε αρνητική -30m. Δεδομένου όμως ότι τα δίκτυα διανομής που έχουν αστοχήσει δεν είναι αεροστεγή, η πίεση στο κόμβο B είναι ορθότερο να θεωρηθεί μηδενική. Θεωρώντας όμως την πίεση στο κόμβο B μηδενική, το συνολικό υδραυλικό ύψος ισούται με 50m, το οποίο είναι μεγαλύτερο από τη στάθμη της δεξαμενής A. Το νερό δεν έχει τη δυνατότητα να μεταφερθεί επομένως δεν υπάρχει παροχή στους αγωγούς. Τα αποτελέσματα επομένως της συμβατικής υδραυλικής ανάλυσης είναι ανακριβή και ο κόμβος B θεωρείτε κόμβος μηδενικής παροχής.

Για το ίδιο παράδειγμα της εικόνας Εικόνα 32 θεωρώντας το υψόμετρο στον κόμβο B ίσο με 30m, το υδραυλικό ύψος  $H_B$  μπορεί να υπολογισθεί από τις (1) και (3). Σημειώνεται όμως ότι το υδραυλικό ύψος θα ισούται και πάλι με 20m, ως το μέσο των υψομέτρων A και C αφού δε διαφοροποιείται ανάλογα με το υψόμετρο του κόμβου B. Η διαφοροποίηση εντοπίζεται στην πίεση του κόμβου καθώς με γνωστό υδραυλικό ύψος και υψόμετρο προκύπτει:

$$H_{BP} = H_B - H_{BE} = 20 - 30 = -10m$$

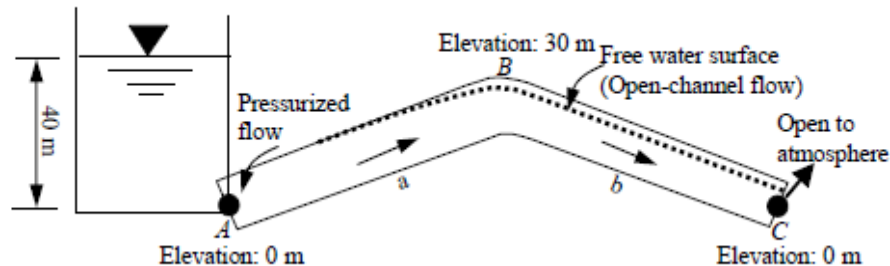
Η παροχή στους αγωγούς εξακολουθεί να ισούται με 491.8 L/s. Η αύξηση του υψομέτρου του κόμβου B προκάλεσε μόνο τη μείωση της πίεσης αλλά δε μετέβαλε την παροχή καθώς αυτή εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά των A και C. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κόμβος B εξακολουθεί να παρουσιάζει αρνητική πίεση. Θέτοντας και πάλι την τιμή της μηδενικής πίεσης σε αυτόν, το συνολικό υδραυλικό ύψος του κόμβου θα είναι ίσο με 30m, το οποίο είναι χαμηλότερο από το υψόμετρο της στάθμης της δεξαμενής, επομένως θα υπάρξει ροή προς το κόμβο C από τη δεξαμενή.

Με γνωστά τα μεγέθη  $H_A$  και  $H_B$ , οι παροχές στους αγωγούς υπολογίζονται από την εξίσωση (5).

$$Q_a = \left( \frac{C_a^{1.852} d_a^{4.87} (H_A - H_B)}{10.7 l_a} \right)^{1/1.852} = \left( \frac{100^{1.852} 0.3^{4.87} * 10}{10.7 * 100} \right)^{1/1.852} = 338.3 (L/s) \quad (6)$$

$$Q_b = \left( \frac{C_b^{1.852} d_b^{4.87} (H_B - H_C)}{10.7 l_b} \right)^{1/1.852} = \left( \frac{100^{1.852} 0.3^{4.87} * 30}{10.7 * 100} \right)^{1/1.852} = 612.2 (L/s) \quad (7)$$

Η παροχή των αγωγών προκύπτει διαφορετική, επομένως η συνθήκη συνέχειας δεν ικανοποιείται αφού δεν υπάρχει ζήτηση στον κόμβο Β. Η μη ικανοποίηση της εξίσωσης συνέχειας συνεπάγεται πως οι συνθήκες ροής του δικτύου δεν μπορούν να επιλυθούν με τις ίδιες εξισώσεις επίλυσης της συμβατικής υδραυλικής ανάλυσης, ακόμα και μετά τη διόρθωση της αρνητικής πίεσης σε μηδενική. Αυτό συμβαίνει γιατί η συμβατική υδραυλική ανάλυση προϋποθέτει συνθήκες ροής υπό πίεση. Στο παραπάνω παράδειγμα η ροή στην περιοχή του κόμβου Β γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια και ο κόμβος θεωρείται ως κόμβος μερικής ροής, μέσω του οποίου το νερό δύναται να φθάσει με μειωμένη παροχή συγκριτικά με εκείνες που προβλέπονται από τη συμβατική ανάλυση με τις αρνητικές πιέσεις. Υιοθετώντας τη συνθήκη για την είσοδο αέρα στον αγωγό, οι συνθήκες ροής στην περιοχή της μερικής ροής περιπλέκονται. Πιθανόν να σημειώνεται ροή υπό πίεση σε ένα τμήμα του αγωγού και μετατροπή από ροή υπό πίεση σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια στο υπόλοιπο τμήμα.



Εικόνα 33: Παράδειγμα δικτύου με αγωγό μερικής ροής. [3]

#### 5.4 Διαχείριση αρνητικών πιέσεων.

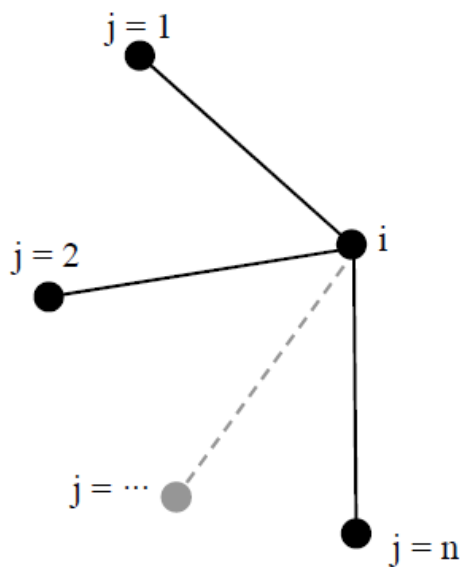
Αρκετοί μελετητές που έχουν ασχοληθεί με το σχεδιασμό δικτύων διανομής (π.χ Ballantyne 1990; Okumura και Shinozuka 1991; Shinozuka 1981,1982; Hwang 1998; Khater και Grigoriu 1989; Markov 1994) ανέπτυξαν θεωρίες για τον χειρισμό των αρνητικών πιέσεων. Αυτές οι μέθοδοι αναθεωρούνται συνεχώς και παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο Ballantyne το 1990 εκτέλεσε αναλύσεις για την αξιολόγηση των σεισμικών επιδράσεων στο δίκτυο διανομής του Σιάτλ, χρησιμοποιώντας το λογισμικό KYPipe. Το πρόγραμμα ακολούθησε επίσης έναν αλγόριθμο συμβατικής υδραυλικής ανάλυσης στον οποίο όλες οι απαιτήσεις των κόμβων έπρεπε να ικανοποιηθούν, δημιουργώντας αρνητικές πιέσεις σε τμήματα του κατεστραμμένου δικτύου. Ο Ballantyne σημείωσε πως το λογισμικό παρήγαγε ανακριβείς αποτελέσματα στις περιπτώσεις εμφάνισης αρνητικών πιέσεων. Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων θεώρησε πως στους συγκεκριμένους κόμβους δεν υπάρχει διαθεσιμότητα νερού.

Ο Shinozuka με τους συνεργάτες του (Okumura και Shinozuka 1991; Shinozuka 1981, 1982; Hwang 1998) μελέτησε την επιρροή των σεισμικών φαινομένων με την χρήση του KYPipe. Η προσέγγιση του για τις αρνητικές πιέσεις του δικτύου, ήταν η αρχική εξάλειψη των κόμβων που παρουσιάζουν αρνητική πίεση και των αγωγών που συνδέονται σε αυτούς. Μετά την διαδικασία αφαίρεσης των παραπάνω αντικειμένων, η υδραυλική ανάλυση επαναλαμβάνονταν προκειμένου να αντληθούν εκ νέου τα αποτελέσματα της πίεσης και της παροχής για το υγιές τμήμα του δικτύου.

Το 1994 ο Markov και οι ερευνητές του πανεπιστημίου Cornell (Markov 1994; Khater και Grigoriu 1989) μελέτησαν την υδραυλική συμπεριφορά του κατεστραμμένου δικτύου διανομής του San Francisco, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό GISALLE. Για την αντιμετώπιση των αρνητικών πιέσεων, θεωρήθηκε ότι η ροή παύει να είναι υπό πίεση στις περιπτώσεις που η πίεση είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής και αναπτύχθηκαν κανόνες για την αντιμετώπιση των κόμβων με αρνητικές πιέσεις. Θεωρήθηκε ο κόμβος  $i$ , της  $j$ , ενός δικτύου διανομής με πίεση  $p_i < 0$ . Το υδραυλικό ύψος στον κόμβο  $i$  ισούται με  $H_i = H_{iE} + p_i / \gamma_w$ , όπου  $H_{iE}$  είναι το υψόμετρο του

κόμβου  $i$  και  $\gamma_w$  το μοναδιαίο βάρος του νερού. . Με την παραδοχή, ότι μετά την είσοδο αέρα στον αγωγό η πίεση μηδενίζεται  $p_i=0$  τότε θα ισχύει  $H_i=H_{iE}+p_i/\gamma_w=H_{iE}$ . Η παροχή  $Q_k$  στο σωλήνα που συνδέει τους κόμβους  $i$  και  $j$  θα έπρεπε να αναλυθεί υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες (ροή με ελεύθερη επιφάνεια). Εφόσον το υψόμετρο στον κόμβο  $i$  είναι υψηλότερο από το κόμβο  $j$  (δηλαδή  $H_i=H_{iE}>H_j$ ) τότε η παροχή του αγωγού θα είναι μηδενική. Αν αυτή η υπόθεση ισχύει για όλους τους αγωγούς που συνδέονται με τον κόμβο  $i$  τότε ο κόμβος θα θεωρείται μηδενικής παροχής. Στην αντίθετη περίπτωση που η συνθήκη δεν επιβεβαιώνεται ο κόμβος θεωρείται μερικής παροχής.



Εικόνα 34 Κόμβος Markov

Κατά τον Markov, ο χειρισμός ενός δικτύου με βλάβες περιέχει πολλά στάδια. Αρχικά, οι κόμβοι με αρνητικές πιέσεις απομονώνονται και διαχωρίζονται σε κόμβους μηδενικής και μερικής παροχής. Οι κόμβοι μηδενικής παροχής εξαλείφονται σταδιακά, ξεκινώντας με τον κόμβο της μέγιστης αρνητικής πίεσης. Σε κάθε βήμα αμέσως μετά την εξάλειψη επαναλαμβάνεται η υδραυλική ανάλυση για τον υπολογισμό των παροχών και των πιέσεων. Στις περιπτώσεις που ένα τμήμα του δικτύου έχει απομονωθεί (δεν υπάρχει συνδεσιμότητα με το κυρίως δίκτυο) τότε εξαλείφεται. Στη συνέχεια μελετώνται οι κόμβοι μερικής παροχής. Η επίδραση τους

προσεγγίζεται με την αλλαγή της τραχύτητας των αγωγών που συνδέονται σε αυτούς έως ότου μηδενιστεί η πίεση του ζητούμενου κόμβου. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η ακριβής λύση των αγωγών με ροή υπό ελεύθερη επιφάνεια. Κατά την διαδικασία μοντελοποίησης των κόμβων μερικής ή μηδενικής παροχής, ελέγχονται οι προηγούμενοι κόμβοι προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι συνεχίζουν να τηρούν τα κριτήρια των κόμβων μερικής ή μηδενικής παροχής. Ο Markon εφάρμοσε μια ανάλυση ευαισθησίας για την ακολουθία των εξαλείψεων στα τελικά αποτελέσματα και διαπίστωσε ότι δεν έχει σημαντική επιρροή στα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η ακολουθία των εξαλείψεων, με αφετηρία τον κόμβο της μέγιστης αρνητικής πίεσης, προσδίδει έναν ορθολογικό και εύκολο στον προγραμματισμό τρόπο για την εξάλειψη των αρνητικών κόμβων.

Ανάμεσα από τις τρεις μεθοδολογίες που αναλύθηκαν, η προσέγγιση του Ballantyne <sup>[2]</sup>είναι η απλούστερη με τις λιγότερες υπολογιστικές απαιτήσεις καθώς εκτελεί μία μόνο υδραυλική ανάλυση και θεωρεί ότι δεν υπάρχει παροχή νερού προς τους κόμβους που συναντάται αρνητική πίεση. Η ορθότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έγκειται μόνο στους κόμβους μηδενικής παροχής (όπως ορίζονται από τον Markon) και στους κόμβους μερικής παροχής με την υπόθεση ότι ο χειριστής του συστήματος απομονώνει αμέσως τους συγκεκριμένους κόμβους προκειμένου από αποφευχθεί μόλυνση και απώλειες νερού και πίεσης. Παρόλα αυτά ο Ballantyne δε λαμβάνει υπόψη την ανακατανομή της ροής και της πίεσης μετά την απομόνωση. Η βελτίωση στο συγκεκριμένο ζήτημα σημειώνεται στην μεθοδολογία που διατύπωσε ο Shinozuka <sup>[2]</sup>.

Ο Markon ήταν αυτός που προώθησε έναν εναλλακτικό τρόπο διαχείρισης του ζητήματος, διαφοροποιώντας τους «αρνητικούς» κόμβους σε μηδενικής και μερικής παροχής, αντιμετωπίζοντας την κάθε κατηγορία διαφορετικά αντικατοπτρίζοντας με αυτόν τον τρόπο ορθότερα τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες ορισμένοι κόμβοι παροχετεύονται παρότι την αρνητική πίεση που εμφανίζουν. Η λύση του Markon, δηλαδή της ρύθμισης της τραχύτητας των αγωγών είναι δύσκολο να αιτιολογηθεί με ακρίβεια λόγω της δεδομένης δυσκολίας για την υδραυλική επίλυση της ροής σε τμήμα δικτύου με ροή υπό ελεύθερη επιφάνεια.

Το μειονέκτημα της θεωρίας του Markon είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη περιπτώσεις στις οποίες η μεταβολή της τραχύτητας δεν μπορεί να εξαλείψει αρνητική πίεση, οδηγώντας έτσι σε προβλήματα αριθμητικής σύγκλισης. Με βάση αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε δίκτυα, η εξισορρόπηση αρνητικής πίεσης δεν είναι εφικτή με την αλλαγή του συντελεστή τραχύτητα εφόσον η πίεση είναι μικρότερη από  $-0.07\text{Mpa}$  ( $-10\text{psi}$ ). Οι αρχικές αναλύσεις στο δίκτυο της Ν.Αρτάκης αποτύπωσαν αρκετά μεγαλύτερες τιμές πίεσης συγκριτικά με αυτήν. Εν τέλει, η προσέγγιση του Markon διατηρεί το ερώτημα αν η μείωση της παροχής μέσω της ρύθμισης του συντελεστή τραχύτητας είναι η κατάλληλη για την προσομοίωση συνθηκών ροής με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγούς σχετιζόμενους με κόμβους μερικής παροχής.

#### 5.4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΝΗΤΙΚΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΜΕΣΩ EPANET.

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται μια προσέγγιση απομόνωσης για την αντιμετώπιση των αρνητικών πιέσεων. Η διαδικασία αυτή συμβαδίζει με επαναληπτική λειτουργία του EPANET. Μετά από κάθε υδραυλική ανάλυση εντοπίζεται ο κόμβος με τη μέγιστη αρνητική πίεση και εξαλείφεται μαζί με όλους τους συνδέσμους που επικοινωνούν με αυτόν. Εάν κάποιο τμήμα του δικτύου αποκοπεί τότε εξαλείφεται και αυτό. Πραγματοποιείται και πάλι ανάλυση του δικτύου, ενώ η διαδικασία θα επαναληφθεί μέχρι να μην παρουσιάζονται κόμβοι με αρνητική πίεση.

[1][3][2]

Εξαιρώντας τη μεταφορά νερού μέσω κόμβων μερικής ροής, η προσέγγιση που υιοθετείται στο Giraffe απομακρύνει τη ροή υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και μεταβατικές πιέσεις που προσεγγίζουν την ατμοσφαιρική. Μια τέτοια ροή θα συμβαίνει γενικά σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες και δεν είναι αξιόπιστη για πυροπροστασία μετά από σεισμό. Ως εκ τούτου, το μοντέλο εξαλείφει τις σωληνώσεις με αβέβαιες και μη αξιόπιστες ροές, συγκεντρώνοντας έτσι τα τμήματα του δικτύου που μπορούν να είναι αποτελεσματικά κατά την αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης.

Η παραπάνω προσέγγιση μοντελοποίησης, εκφράζει μια κατάσταση βλάβης ως λειτουργική κατάσταση μετατρέποντας το κατεστραμμένο δίκτυο σε ένα που ικανοποιεί τις απαιτήσεις θετικής πίεσης και ικανής ροής σε όλους τους αγωγούς. Εξαλείφοντας αγωγούς με αναξιόπιστη



ροή, υπάρχει το πρακτικό πλεονέκτημα να δειχθεί στον διαχειριστή του δικτύου ποια τμήματα δε λειτουργούν πλέον, παρέχοντας έτσι πληροφορίες για τα πλέον ευάλωτα τμήματα και πιθανές στρατηγικές αντιμετώπισης. Το μοντέλο δε λαμβάνει υπόψη ρητά την παροχή νερού και τις απώλειες πίεσης που σχετίζονται με τη μερική ροή, επειδή δεν είναι διαθέσιμες ακριβείς αναλύσεις δικτύου σε αυτή την κατάσταση. Αντί αυτού αφαιρεί τα αναξιόπιστα τμήματα του συστήματος και εμφανίζει το υπόλοιπο τμήμα που ικανοποιεί τις απαιτήσεις κατώτατου ορίου.

## 5.5 Η μέθοδος MONTE CARLO – Σύνδεση EPANET με MATLAB.

Η έκφραση μέθοδος Monte Carlo περιλαμβάνει κυρίως στοχαστικές διαδικασίες, εκείνες δηλαδή που βασίζονται στην χρήση των τυχαίων αριθμών και της στατιστικής για την λύση προβλημάτων. Γενικά, η μέθοδος Monte Carlo είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων μέσω προσομοίωσης τυχαίων αριθμών. Η αβεβαιότητα για τη σεισμική δραστηριότητα, την επιρροή της στο δίκτυο αλλά και τις υδραυλικές επιπτώσεις απαιτεί μια στοχαστική προσέγγιση Monte Carlo, η οποία προσμετρά διάφορες παραμέτρους και παράγει βάσει αυτών αποτελέσματα για την αστοχία ή όχι ενός αγωγού. Η παραγωγή των αποτελεσμάτων αφορά το σύνολο των αγωγών του δικτύου διανομής, ενώ πραγματοποιείται αρκετές δεκάδες έως εκατοντάδες φορές προκειμένου η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων να προσεγγίσει όσο το δυνατόν πλησιέστερα την τυπική υδραυλική συμπεριφορά του δικτύου ώστε να γίνουν εμφανέστερα τα σημεία εκείνα του δικτύου που θα παρουσιάσουν μεγαλύτερη πιθανότητα μη-ικανοποίησης της ζήτησης νερού υπό τις συνθήκες μελέτης.

Το μέγεθος του δικτύου, οι τεχνικές αναπαράστασης της αστοχίας, οι επαναληπτικές διαδικασίες για την εξισορρόπηση του δικτύου δηλαδή την απαλοιφή των αρνητικών πιέσεων και το πλήθος των αναλύσεων Monte Carlo αποτρέπουν τη μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς με τη χρήση του Windows EPANET [ενότητα 4.6] λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων. Η υδραυλική ανάλυση και η στατιστική περιγραφή των αποτελεσμάτων θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση του Command Line EPANET [ενότητα 4.7] σε συνδυασμό με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος Matlab, που αποτελεί ένα σύγχρονο μαθηματικό πακέτο

για υπολογισμούς και κατασκευή γραφημάτων, και που παρέχει επίσης και τη δυνατότητα προγραμματισμού. Όπως προαναφέρθηκε το EPANET δύναται να λειτουργήσει με την εντολή : EPANET2d Inpfile rptfile μέσα από γραμμές εντολών σε ένα παράθυρο DOS. Το εργαλείο epanet2d.exe έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει τη γέφυρα επικοινωνίας των δύο λογισμικών, έτσι ώστε το αρχείο εισόδου δεδομένων (Inpfile) να συγγράφεται μέσα στο λογισμικό Matlab, στη συνέχεια να εκτελείται η υδραυλική ανάλυση με τη κλήση του EPANET από από τη Matlab μέσω κατάλληλης εντολής και τέλος να γίνεται αποθήκευση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων του εξισορροπημένου δικτύου που έχουν τυπωθεί στο αρχείο εξόδου (rptfile).

## 5.6 Περιγραφή Μεθοδολογίας

Η ενότητα 5.1 περιγράφει την διαδικασία παραγωγής της πιθανότητας αστοχίας ενός αγωγού καταλήγοντας στη σχέση (34). Στην παρούσα εργασία έγινε η παραδοχή ότι ο συντελεστής  $K_1$  του υλικού θα ισούται με την μονάδα ( $K_1=1$ ) και η εδαφική επιτάχυνση θα είναι μηδενική ( $PGD=0$ ), επομένως η πιθανότητα αστοχίας του κάθε αγωγού εξαρτάται από το μήκος του και από την ταχύτητα εδάφους. Επιλέχθηκε να μελετηθούν έξι μεγέθη σεισμού εκφρασμένα από την εδαφική ταχύτητα του εδάφους, συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι τιμές {20, 30, 40, 50, 60 και 70 cm/s}. Η ανώτερη τιμή (70cm/s) εδαφικής ταχύτητας επιλέχθηκε γιατί τα αποτελέσματα φανέρωσαν γενική αστοχία του δικτύου, οπότε κρίθηκε άσκοπη η μελέτη για μεγαλύτερη ένταση σεισμού. Για κάθε τιμή από τις παραπάνω, έχοντας ως δεδομένα τα στοιχεία των αγωγών συμπεριλαμβανομένου και του μήκους, δημιουργήθηκε ένα **μητρώο πιθανότητας** που περιλαμβάνει την πιθανότητα αστοχίας του κάθε σωλήνα. Για να την μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για κάθε τιμή PGV, εκτελέστηκαν εκατό (100) επαναλήψεις Monte Carlo (MC) προκειμένου να μελετηθούν τα αποτελέσματα.

Σε κάθε επανάληψη MC η τελική κατάσταση του κάθε αγωγού, δηλαδή αν αστοχεί ή παραμένει άθραυστος καθορίστηκε με τη χρήση συνεχής ομοιόμορφης κατανομής (Uniform distribution continuous) των τιμών μηδέν (0) και ένα (1) βασισμένη στην πιθανότητα αστοχίας του κάθε σωλήνα. Ο αριθμός μηδέν θεωρήθηκε ως τιμή που αναπαριστά τη θραύση ενώ ο αριθμός ένα

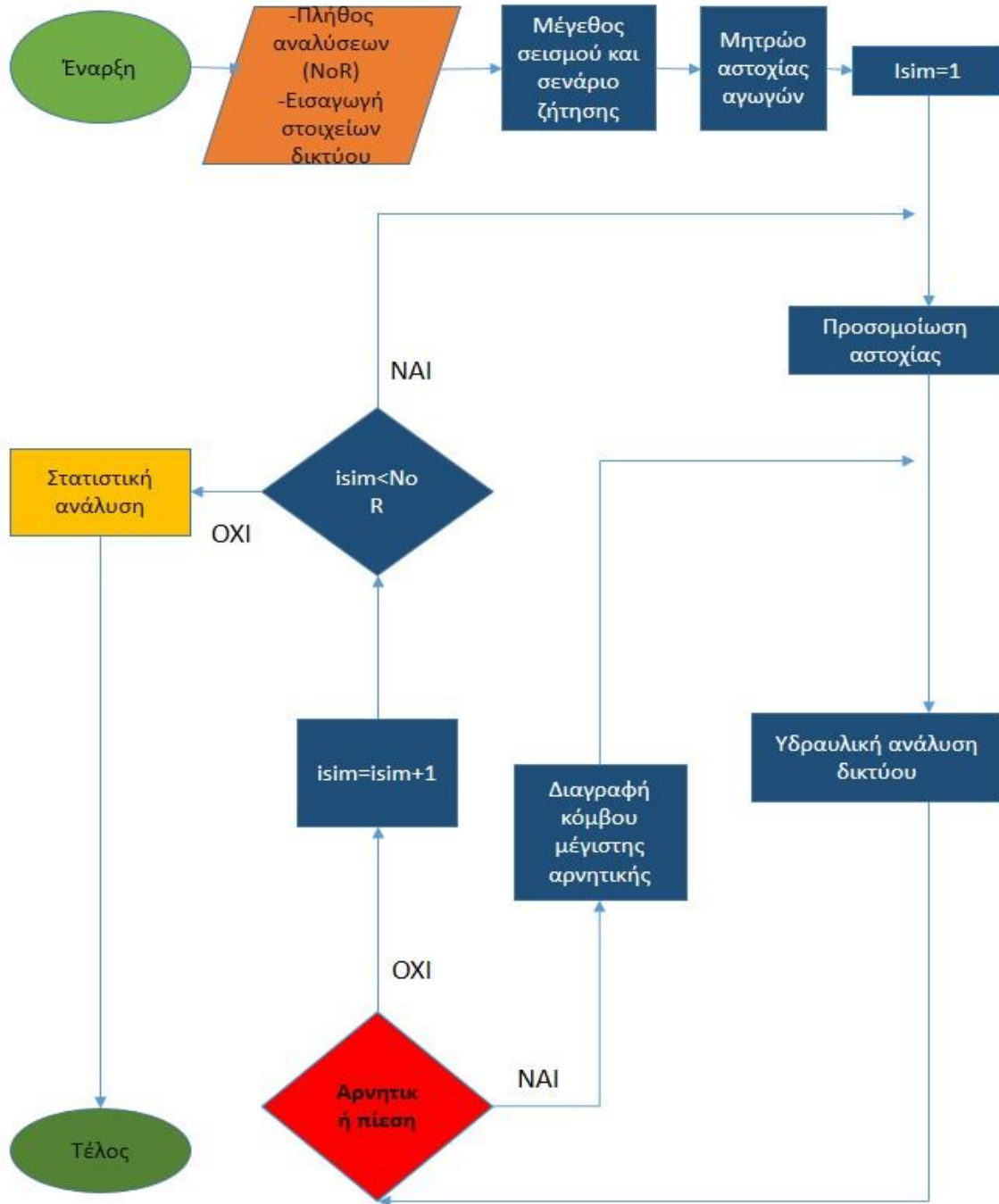
καθορίζει την μη-αστοχία. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ένα **μητρώο αστοχίας** που καθορίζει την εικόνα του δικτύου για κάθε ανάλυση της MC.

Η ορθή υδραυλική μελέτη ενός δικτύου είτε σε αυτό έχουν σημειωθεί βλάβες είτε η δομή του παραμένει ακέραια, απαιτεί την προσομοίωση του σε διαφορετικές χρονικές στιγμές προκειμένου να συμπεριληφθεί στα αποτελέσματα η επιρροή της μεταβολής της ζήτησης των καταναλωτών. Για τον λόγο αυτό, έγινε η επιλογή για κάθε μέγεθος σεισμού να εξεταστεί το δίκτυο σε τρεις φάσεις κατανάλωσης, η μελέτη επομένως έγινε για το δυσμενές σενάριο της μέγιστης ωριαίας αιχμής του χρόνου, για την μέγιστη ημερήσια παροχή του χρόνου και για την μέση ημερήσια παροχή. Αποτελεί σύνηθες φαινόμενο η εκδήλωση πυρκαγιάς να έπεται σεισμικών δράσεων, επομένως κρίθηκε αναγκαίο στα σενάρια ζήτησης να ενσωματωθεί η ενεργοποίηση δύο πυροσβεστικών κρουνών που αυξάνουν τη συνολική ζήτηση κατά +10lt/s.

Το μέγεθος του σεισμού και η ζήτηση ήταν οι παράμετροι που επηρέασαν τον συνολικό αριθμό εκτέλεσης των MC. Συνοπτικά για τα 6 μεγέθη σεισμού και τα 3 σενάρια ζήτησης πραγματοποιήθηκαν 18 εκτελέσεις.

Με τον καθορισμό των παραπάνω δεδομένων εισόδου ο αλγόριθμος προχωράει στο κυρίως μέρος της τροποποίησης της δομής και της υδραυλικής ανάλυσης του δικτύου. Ανάλογα με το μητρώο αστοχίας που έχει δημιουργηθεί, το δίκτυο τροποποιείται με τη διαδικασία που έχει περιγραφεί στην ενότητα 5.2 έτσι ώστε να γίνει η μοντελοποίηση των ενδεχόμενων αστοχιών. Στην πλειοψηφία των αναλύσεων, η αλλαγή της δομής του δικτύου οδηγεί το λογισμικό στην εμφάνιση αρνητικών πιέσεων στους κόμβους, στις περιπτώσεις αυτές η λειτουργία του αλγορίθμου καθορίζεται από την μεθοδολογία της ενότητας 5.4.1, δηλαδή την ακολουθία εξάλειψης των κόμβων με τη μέγιστη αρνητική πίεση έως την υδραυλική εξισορρόπηση του δικτύου.

Το διάγραμμα ροής στην Εικόνα 35 Γενικό Διάγραμμα Ροής περιγράφει τη γενικότερη λογική που ακολουθεί ο κώδικας για την προσομοίωση της αστοχίας και τη διαχείριση των αρνητικών πιέσεων. Στην επόμενη ενότητα θα επεξηγηθεί αναλυτικότερα η λογική προγραμματισμού του κώδικα στη Matlab.



Εικόνα 35 Γενικό Διάγραμμα Ροής

## 5.7 Περιγραφή Κώδικα

Η εκπόνηση της εργασίας απαιτεί την υδραυλική μελέτη του δικτύου στη Νέα Αρτάκη υπό την επίδραση σεισμικής φόρτισης και όχι τη διαστασιολόγηση του δικτύου, επομένως τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την εργασία αντλούνται από το αντίστοιχο αρχείο του Windows Eranet μέσα από τη σειρά εντολών File->Export->Network. Το αρχείο αυτό το ονομάζουμε «artaki.inp», η δομή του είναι ίδια με αυτή που περιγράφεται στην ενότητα 4.8 και περιέχει πληροφορίες για όλα τα αντικείμενα τα οποία περιέχονται στο δίκτυο καθώς και για τον τρόπο παρουσίασης της υδραυλικής ανάλυσης. Το artaki.inp αποτελεί αρχείο κειμένου, για τη διευκόλυνση της εισαγωγής των στοιχείων αυτών στη Matlab, κρίνεται χρήσιμο η αποθήκευση των χαρακτηριστικών κάθε αντικειμένου (στοιχεία κόμβων, αγωγών, ταμιευτήρων και συντεταγμένες) σε μορφή πινάκων σε λογιστικά φύλλα (αρχεία excel). Η Matlab παρέχει τη δυνατότητα μέσα από το εργαλείο Import Data να εισάγονται πίνακες με τη μορφή είτε αριθμών είτε χαρακτήρων είτε μικτοί. Κατά την εκπόνηση της εργασίας, στη matlab εισήχθησαν τρεις πίνακες που αντιπροσώπευαν τα δεδομένα εισόδου για τους κόμβους, τους αγωγούς και τις συντεταγμένες (junctions, pipes, coor). Το πλήθος των στηλών για κάθε πίνακα ήταν τρεις, οχτώ και τρεις αντίστοιχα, δηλαδή όσες και οι στήλες που προέκυψαν στο artaki.inp. Εξαιτίας της μεταβλητότητας που παρουσιάζει η δομή του δικτύου λόγω της αστοχίας των αγωγών αλλά και της διαδικασίας εξάλειψης των κόμβων με μέγιστες αρνητικές πιέσεις, δημιουργήθηκαν επιπλέον στήλες (9<sup>η</sup>) στο πίνακα των αγωγών και (4<sup>η</sup>) στο πίνακα των κόμβων προκειμένου να δηλώνεται η τυχόν αστοχία του αγωγού και η ανάγκη εξάλειψης του κόμβου αντίστοιχα. **Με την τιμή «Print» δηλώνεται πως ένας αγωγός δεν έχει αστοχήσει και διατηρεί την ικανότητα μεταφοράς νερού (η αντίστοιχη τιμή για τους κόμβους σηματοδοτεί ότι δεν υπάρχει ανάγκη εξάλειψης του κόμβου) , ενώ με την τιμή «No-Print» δηλώνεται η αστοχία του αγωγού ή του κόμβου.** Η σημασία των επιπρόσθετων στηλών εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι τιμές αυτές λειτουργούν ως κριτήριο για την τύπωση ή όχι των συγκεκριμένων αντικειμένων στο Input file.  
Ο κώδικας δεν τυπώνει τις τιμές αυτές στο Input!

Στο πρώτο στάδιο του κώδικα, δημιουργήθηκε το script «writeInpFile». Ο ρόλος του συγκεκριμένου script κατά την πορεία εκτέλεσης του κώδικα είναι να δημιουργεί το αντίστοιχο

αρχείο κειμένου (input file) που αντιστοιχεί στην κάθε φάση της ανάλυσης. Το writelnrFile script καλείται από το κυρίαρχο script του κώδικα που ονομάζεται **main\_prgtry**. Στην πρώτη του εκτέλεση το writelnrFile καλείται ουσιαστικά να δημιουργήσει ένα αρχείο κειμένου **ίδιο** με το artaki.inr, δηλαδή τη βάση για την εκτέλεση του EPANET. Στο συγκεκριμένο στάδιο προφανώς θεωρούμε πως κανένας αγωγός δεν έχει αστοχήσει (οι τιμές στην 9<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> στήλη του πίνακα των αγωγών και κόμβων είναι Print). Η συνέχιση της εκτέλεσης του κώδικα στα επόμενα στάδια, εξαιτίας της διαδικασίας προσομοίωσης της αστοχίας αλλά και της μεθοδολογίας διαχείρισης των αρνητικών πιέσεων, απαιτεί την προσθήκη συνθηκών στο writelnrFile προκειμένου να είναι δυνατή η περιγραφή παρουσίας ή απουσίας των αγωγών.

Η συνθήκη αστοχίας ή μη-αστοχίας των αγωγών κρίνεται στους υπολογισμούς που γίνονται στο script randomFailureProbabilities. Στις λειτουργίες στο εν λόγω script γίνεται παραγωγή των αριθμών μηδέν και ένα, που αντιστοιχούν σε κατάσταση αστοχίας και μη-αστοχίας αντίστοιχα. Η παραγωγή των αριθμών είναι σε συνάρτηση με τη κατανομή-πιθανότητα που ορίζεται από το κώδικα. Αρχικά έγινε η επιλογή της μελέτης του δικτύου με ενιαία πιθανότητα αστοχίας για το δίκτυο ίση με 5%, σε δεύτερο στάδιο η πιθανότητα ορίστηκε διακριτά σε κάθε αγωγό ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του και το μέγεθος του σεισμού (PGV). Από τη διαδικασία στο randomFailureProbabilities γεννιέται εν τέλει το μητρώο που καθορίζει την κατάσταση του κάθε αγωγού σε κάθε ανάλυση. Πριν την είσοδο στο τμήμα επεξεργασίας του δικτύου του κώδικα, από το script Demands\_modeling ορίζεται το σενάριο φόρτισης του δικτύου όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Το διάγραμμα ροής του κώδικα (Εικόνα 36), μετά την περάτωση των παραπάνω πράξεων, διακρίνεται σε δύο βασικές διαδικασίες επαναλήψεων, η πρώτη αφορά τη διαδικασία επανάληψης της κάθε ανάλυσης και ο αριθμός της εξαρτάται από το πλήθος των αναλύσεων Monte Carlo που θα επιλέξει ο χρήστης, και η δεύτερη είναι η εσωτερική επανάληψη για κάθε ανάλυση που θα συμβεί εφόσον οι αστοχίες αγωγών οδηγήσουν στην εμφάνιση αρνητικών πιέσεων και θα επαναλαμβάνονται μέχρι την εξάλειψή τους.

Μετά τη συγγραφή του αρχικού αρχείου δεδομένων (Input χωρίς αστοχίες αγωγών) και την εκτέλεση του script `randomFailureProbabilities`, ο κώδικας εισέρχεται στο κυρίως μέρος. Σε αυτό το στάδιο, ανάλογα με το μητρώο αστοχίας και την αντίστοιχη ανάλυση προκύπτει η πρώτη μεταβολή της δομής του δικτύου. Σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στην ενότητα 5.2 ελέγχονται όσοι αγωγοί έχουν αστοχήσει και αντικαθίσταται η τιμή `Print` σε `No-Print` στην αντίστοιχη θέση του πίνακα των αγωγών, έτσι ώστε όταν καλεστεί εκ νέου το `writelnPFile` να μην εισαχθούν σε αυτό. Η προσομοίωση της αστοχίας όπως αναφέρθηκε πέρα από την εξάλειψη του αγωγού προϋποθέτει τη δημιουργία νέων αγωγών από τους κόμβους αφετηρίας και πέρατος, με δικλείδα για τον έλεγχο της κατεύθυνσης της ροής αποκλειστικά προς κενές δεξαμενές. Ο προγραμματισμός αυτός επιτυγχάνεται στο script **`createDamagedNetwrok`**. Συγκεκριμένα, ορίζεται το μέγεθος του πίνακα των ταμιευτήρων (`reservoir`), πρόκειται για ένα πίνακα με τρεις στήλες, με την πρώτη να αντιστοιχεί στα ID των νέων ταμιευτήρων, τη δεύτερη στα υψόμετρα που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή των υψομέτρων των κόμβων ενώ η τρίτη αντιστοιχεί στα πρότυπα διακύμανσης της στάθμης η οποία όμως παραμένει κενή για το δίκτυο της εργασίας. Για την καλύτερη κατανόηση της δομής του μεταβαλλόμενου δικτύου, έχει επιλεγεί η ονοματολογία των ταμιευτήρων να γίνεται συναρτήσει του ονόματος του αγωγού που αφαιρέθηκε και των όρων «`start_new`» και «`end_new`», αναλόγως αν πρόκειται για τον ταμιευτήρα που συνδέεται στο κόμβο αφετηρίας ή πέρατος. Για παράδειγμα ο ταμιευτήρας που προκύπτει λόγω της αφαίρεσης του αγωγού «2», που συνένωνε τους κόμβους «1» και «2», και συνδέεται με τον κόμβο 1, θα ονομάζεται `2_start_new`. Ανάλογη είναι η διαδικασία για τη δημιουργία του πίνακα των νέων αγωγών (`newPipes`). Ο πίνακας θα έχει μέγεθος σειρών ίσο με το διπλάσιο του πλήθους των αγωγών που αστόχησαν και θα αποτελείται από 9 στήλες με τα γνωστά περιεχόμενα για κάθε στήλη [ενότητα 4.8]. Η ονοματολογία που γίνεται στη 1<sup>η</sup> στήλη πραγματοποιείται με αντίστοιχο τρόπο όπως η ονοματολογία στο πίνακα των ταμιευτήρων, δηλαδή ο αγωγός που συνδέει τον κόμβο αφετηρίας του αγωγού που έχει αστοχήσει (έστω αγωγός «2») με τον αντίστοιχο ταμιευτήρα (έστω ταμιευτήρας `2_start_new`) λέγεται `2_start` (ο αντίστοιχος λέγεται `2_end`). Στη δεύτερη στήλη ορίζεται η αφετηρία του αγωγού, δηλαδή ο κόμβος ενώ στη 3<sup>η</sup> στήλη εισέρχεται το όνομα της δεξαμενής που καταλήγει. Με την παραδοχή ότι οι αστοχίες θα συμβαίνουν στο μισό του μήκους των αγωγών η 4<sup>η</sup> στήλη συμπληρώνεται με

L/2, οι στήλες 5,6,7 έχουν τις ίδιες τιμές με τον αντίστοιχο αγωγό που αφαιρέθηκε καθώς θα έχουν ίδια διάμετρο και ίδιους συντελεστές απωλειών. Τέλος, στην 8<sup>η</sup> στήλη τοποθετείται η τιμή CV για τον έλεγχο της ροής, ενώ η 9<sup>η</sup> στήλη παίρνει προς το παρών την τιμή Print.

Δημιουργώντας αυτά τα μητρώα, ο κώδικας είναι σε θέση να καλέσει το script writeInpFile προκειμένου να δοθεί η νέα περιγραφή του δικτύου στο EPANET. Η διαφοροποίηση με το αρχικό αρχείο που είχε εντολές το script να τυπώσει, εντοπίζονται στο ότι οι αγωγοί που αστόχησαν δε θα τυπωθούν ενώ οι συνθήκες που υπάρχουν στο script για την ύπαρξη των πινάκων reservoirs, newripes πλέον τηρούνται οπότε θα τυπωθούν τα νέα αντικείμενα του δικτύου.

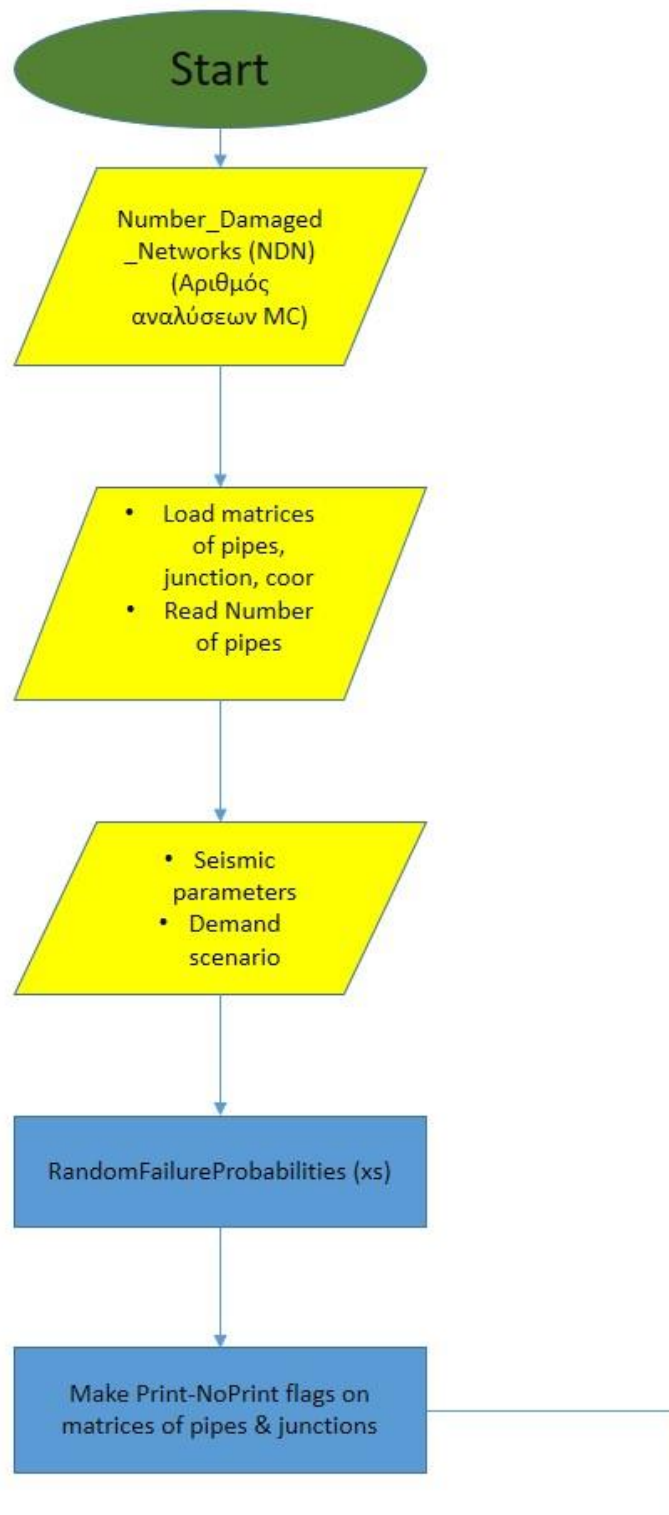
Οι διαδικασίες που έχουν περιγραφεί έχουν προσομοιώσει τις αστοχίες των αγωγών αλλάζοντας τη δομή του δικτύου. Ο κώδικας σε αυτό το στάδιο καλεί το EPANET προκειμένου να αναλύσει υδραυλικά το δίκτυο. Η υδραυλική ανάλυση του EPANET αποτυπώνεται επάνω στο αρχείο κειμένου outfile, το οποίο περιέχει όλα τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει μαζί με τις ενδεχόμενες αναφορές του EPANET. Όπως έχει επισημανθεί στην ενότητα 5.4 είναι πιθανόν να παρουσιασθούν αρνητικές πιέσεις και να χρειασθεί νέα επεξεργασία στο δίκτυο. Με τις εντολές του script **readOutput** διαβάζονται τα αποτελέσματα του EPANET και αποθηκεύονται σε πίνακες όσα είναι χρήσιμα. Η μεταβολή του δικτύου πέρα από αλλαγές στα υδραυλικά αποτελέσματα, ενδεχομένως να επιφέρει και κάποια σφάλματα στη λειτουργία του EPANET, τα οποία εμφανίζονται στο Hydraulic Status του outfile. Τα σφάλματα έχουν επισημανθεί στην ενότητα 4.10. Το συνηθέστερο αίτιο για την πρόκληση των σφαλμάτων πέρα από τις αρνητικές πιέσεις, είναι η αποκόλληση τμήματος ή μεμονωμένων στοιχείων από το υπόλοιπο δίκτυο λόγω της εξάλειψης αγωγών, γεγονός που μπλοκάρει την υδραυλική ανάλυση. Η πρόβλεψη που γίνεται για αυτές τις καταστάσεις είναι οι αλλαγές των τιμών Print σε No-Print εκείνων των στοιχείων προκειμένου να μην τυπώνονται στο input file και να συνεχίζεται η ανάλυση. Ιδιαίτερη σημασία για τη λειτουργία του κώδικα αποτελούν οι εντολές για τον εντοπισμό των περιπτώσεων ύπαρξης αρνητικής πίεσης (ή αποκομμένου τμήματος από το δίκτυο), όπου δίνεται συγκεκριμένη τιμή σε μεταβλητή «σημαία» η οποία λέγεται hasNegativePressure.



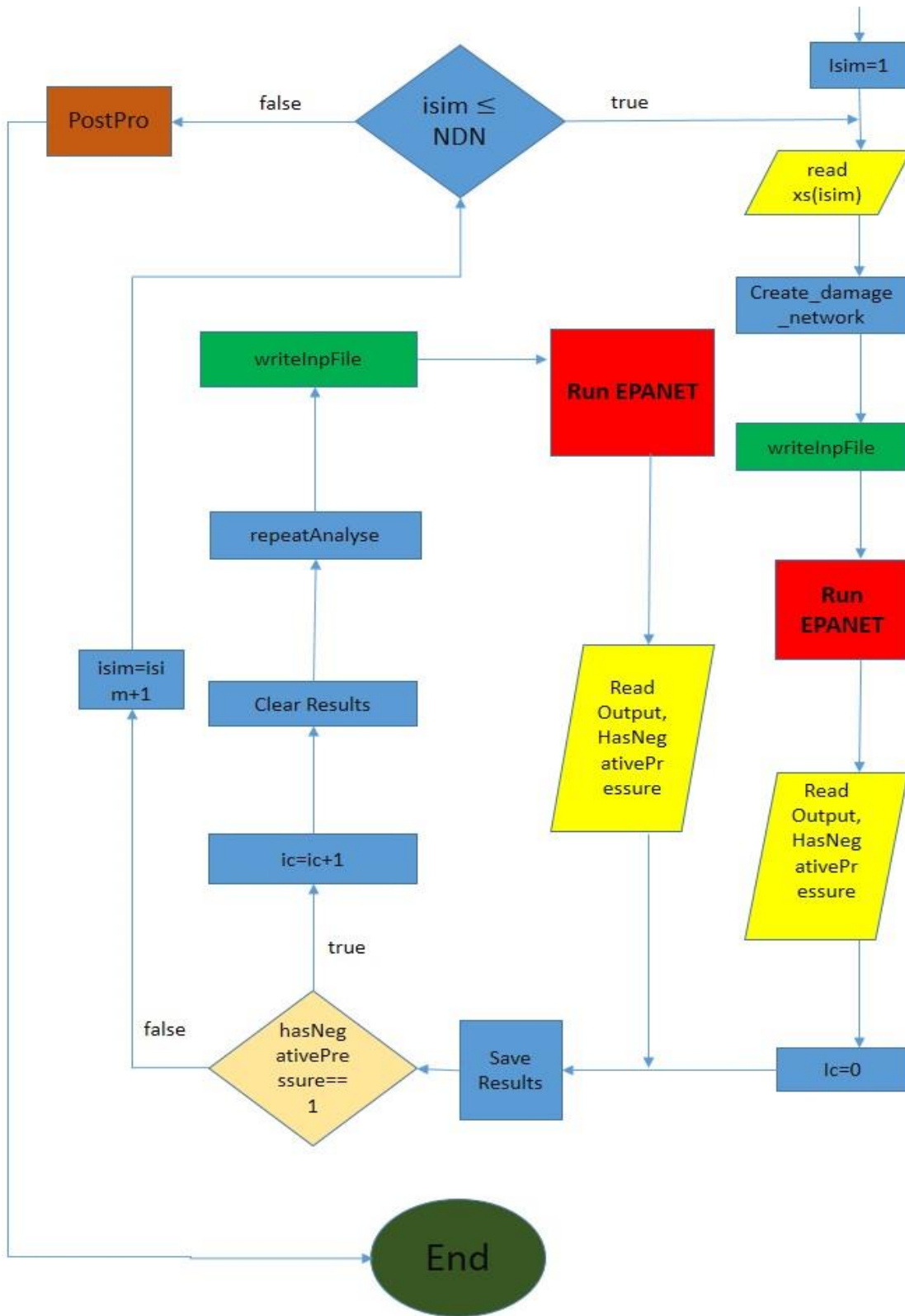
Η συγκεκριμένη μεταβλητή αποκαλείται σημαία γιατί η τιμή της καθορίζει την είσοδο ή όχι στην εσωτερική επανάληψη κάθε ανάλυσης. Έχει γίνει η επιλογή η `hasNegativePressure` να έχει την τιμή της μονάδας όσο υπάρχουν αρνητικές πιέσεις ή τμήματα δικτύου χωρίς συνδεσιμότητα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η είσοδος ή παραμονή στην εσωτερική επανάληψη. Ο ρόλος αυτού του σταδίου είναι η εξισορρόπηση του δικτύου, η λειτουργία του script **repeatAnalyse** επικεντρώνεται στην αλλαγή της τιμής `Print` όλων των στοιχείων που αποκόβονται από το δίκτυο αλλά και του κόμβου με τη μέγιστη αρνητική πίεση και όσων συνδέσμων επικοινωνούν με αυτόν. Για την επιτυχημένη περάτωση της συγκεκριμένης λειτουργίας απαιτούνται έλεγχοι στα μητρώα των `pipes`, `newpipes` και `junctions`. Ο κώδικας αποθηκεύει στη μνήμη του το όνομα των κόμβων που πρέπει να αφαιρεθούν, αναζητά τους κόμβους αυτούς στο πίνακα `junctions` για να κατοχυρώσει την τιμή `No-Print` στην 4<sup>η</sup> στήλη και στη συνέχεια ανατρέχει στο μητρώο των `pipes` και ελέγχει αν ο κάθε αγωγός επικοινωνεί με το κόμβο ελέγχοντας τις τιμές της 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> στήλης, προκειμένου να κατοχυρώσει ή όχι την τιμή `No Print`. Με την αλλαγή των τιμών `Print` αυτών των στοιχείων καλείται το `writelnpFile` για τη δημιουργία του αρχείου εισόδου και κατόπιν εκτελείται η υδραυλική ανάλυση από το EPANET, εξάγοντας τα αποτελέσματα και πάλι στο `outfile` που θα αναλυθεί από το `readOutput`. Το τμήμα αυτό του κώδικα θα επαναλαμβάνεται μέχρι την εξάλειψη των αρνητικών πιέσεων.

Η παραπάνω επαναληπτικές διαδικασίες πραγματοποιούνται για όλα τα σενάρια που έχουν επισημανθεί. Δηλαδή για 6 διαφορετικές τιμές `PGV` και για 3 διαφορετικά σενάρια φόρτισης για κάθε μέγεθος σεισμικής δράσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα εξισορροπημένα δίκτυα αποθηκεύονται στο τέλος του κώδικα, σε αρχεία `.mat` από την `matlab` προκειμένου να γίνει η τελική στατιστική ανάλυση από το script `PostPro` και να παραχθούν τα συμπεράσματα.

Το διάγραμμα ροής της επόμενης σελίδας αποτυπώνει τη διαδικασία που περιγράφηκε για συνδυασμό μίας τιμής `PGV` και ενός σεναρίου φόρτισης (`iDemand=1` ή `2` ή `3`) που αντιστοιχεί στη μέγιστη ωριαία, μέγιστη ημερήσια και μέση ημερήσια ζήτηση των κόμβων αντίστοιχα.



Εικόνα 36 Διάγραμμα ροής κώδικα [1/2]



Εικόνα 37 Διαγραμμα ροής κώδικα [2/2]







## 6 Αποτελέσματα Υδραυλικών Αναλύσεων.

Η ενότητα αυτή εστιάζει στην παρουσίαση και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των υδραυλικών αναλύσεων που εκτελέσθηκαν στο δίκτυο της Ν. Αρτάκης για έξι σενάρια σεισμού και τρία σενάρια ζήτησης. Η αναπαράσταση του δικτύου στο λογισμικό EPANET αποτελούταν από 234 κόμβους και 366 αγωγούς. Ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 5 για την μοντελοποίηση της θραύσης των αγωγών και την διαχείριση των αρνητικών πιέσεων που προέκυψαν. Τα παραγόμενα αποτελέσματα της υδραυλικής ανάλυσης που αντλήθηκαν για την στατιστική ανάλυση ήταν η πίεση των κόμβων και η παροχή των αγωγών. Έγινε υπολογισμός της μέσης τιμής των μεγεθών για κάθε ανάλυση, της τυπικής απόκλισης καθώς και του συντελεστή διακύμανσης. Η κατάσταση λειτουργικότητας του δικτύου έπειτα από την ανάλυση κάθε συνδυασμού σεναρίων (μέγεθος σεισμού – κατάσταση ζήτησης) εκφράστηκε με τον όρο *service ability* που αντιπροσωπεύει το ποσοστό του δικτύου (αριθμός κόμβων) που ικανοποιεί συγκεκριμένη απαίτηση πίεσης νερού.

Η απόκριση του δικτύου ύδρευσης εξετάστηκε για επτά διαφορετικές εδαφικές ταχύτητες. Η χαμηλότερη τιμή ταχύτητας που εξετάστηκε ήταν τα 10cm/s ενώ έγιναν αναλύσεις με βήμα ταχύτητας (+10cm/s) μέχρι και τα 70cm/s που διαπιστώθηκε ότι το δίκτυο δεν κατέχει πλέον την ικανότητα τροφοδότησης νερού στο μεγαλύτερο τμήμα του οικισμού. Κάθε μία από τις επτά εδαφικές ταχύτητες συνδυάστηκε με τρία διαφορετικά σενάρια ζήτησης που αντιστοιχούν στην μέγιστη ωριαία ζήτηση του έτους, στην μέγιστη ημερήσια ζήτηση του έτους και στην μέση ημερήσια ζήτηση. Επί του δυσμενέστερου, θεωρήθηκε παράλληλη ενεργοποίηση δύο πυροσβεστικών κρουνών και στα τρία σενάρια ζήτησης. Εν συνόλω, διαμορφώθηκαν εικοσιένα σενάρια που αφορούσαν την κατάσταση του δικτύου και σε κάθε σενάρια εκτελέσθηκαν 100 επαναλήψεις Monte Carlo.

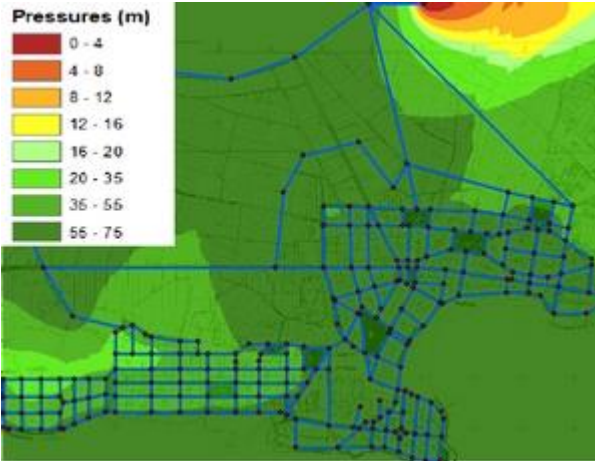
## 6.1 Αποτελέσματα πίεσης κόμβων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση των θραύσεων κατά μήκος του δικτύου, μετατρέπει την κατάσταση αστοχίας σε μια λειτουργική κατάσταση με κριτήριο την εξάλειψη των κόμβων που δεν πληρούν το κριτήριο των θετικών πιέσεων. Σε κάθε ανάλυση Monte Carlo, όσοι κόμβοι δεν παρουσίασαν θετική πίεση, το αντίστοιχο μέγεθος τους θεωρήθηκε μηδενικό. Έγινε υπολογισμός της μέσης πίεσης κάθε κόμβου για κάθε συνδυασμό σεισμού-ζήτησης και έπειτα πραγματοποιήθηκε απεικόνιση των αποτελεσμάτων με τη χρήση του προγράμματος GIS. Στις παρακάτω εικόνες γίνεται χωρική απεικόνιση της κατανομής των πιέσεων στο σύνολο του δικτύου για όλα τα σενάρια.

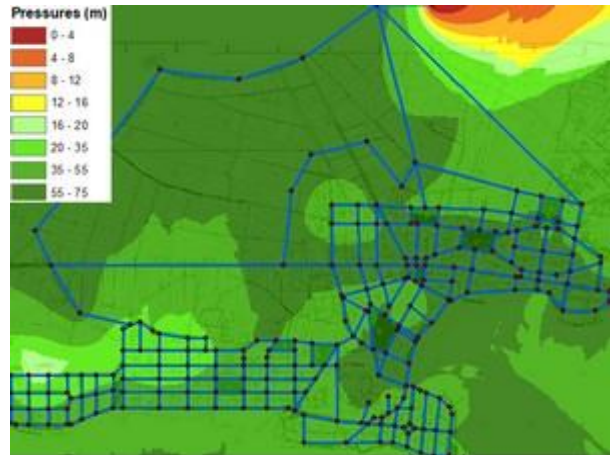
Θα γίνει έκθεση του ύψους των πιέσεων των κόμβων σε κανονική λειτουργία του δικτύου δηλαδή χωρίς να περιλαμβάνονται αστοχίες αγωγών ( $PGV=0\text{cm/s}$ ) προκειμένου να γίνει εμφανέστερη η απόκριση του δικτύου στην σταδιακή αύξηση της εδαφικής ταχύτητας. Στη συνέχεια, θα προβληθούν ανά σενάριο ζήτησης οι χάρτες κατανομής της πίεσης που δημιουργήθηκαν για όλο το φάσμα της σεισμικής δραστηριότητας που μελετήθηκε. Η λεζάντα που απεικονίζει τη διαφοροποίηση των πιέσεων ανά χρωματισμό απεικονίζεται παρακάτω.



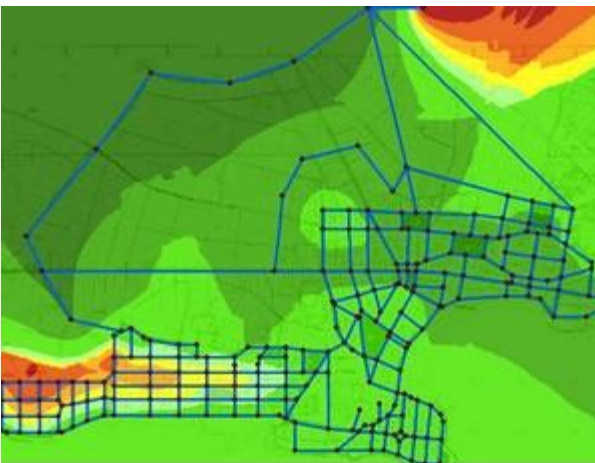
### 6.1.1 Ύψη πιέσεων για Μέση Ημερήσια Ζήτηση.



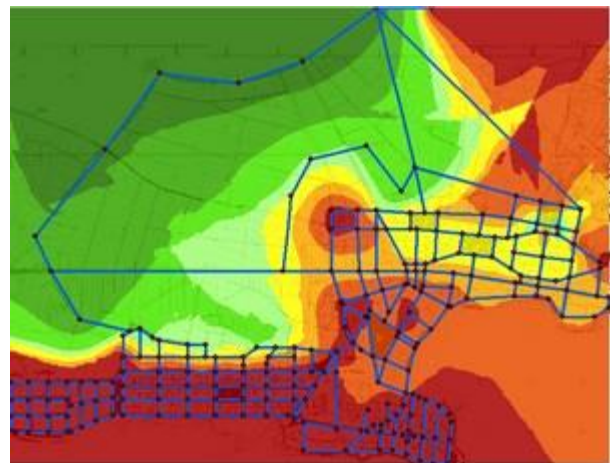
Εικόνα 38: Κανονική κατάσταση δικτύου χωρίς βλάβες ( $PGV=0\text{cm/s}$ ) για μέση ημερήσια ζήτηση.



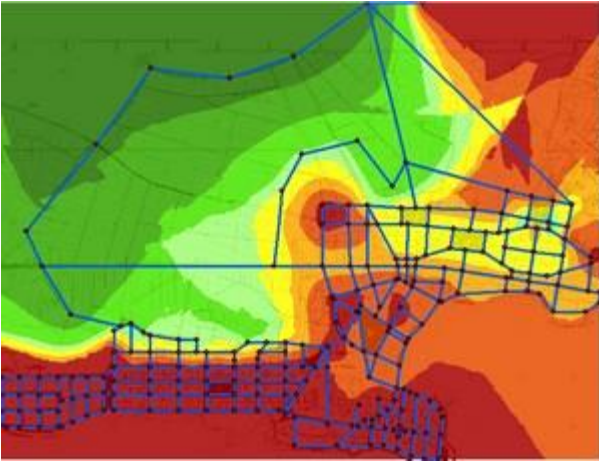
Εικόνα 39:  $PGV=10\text{cm/s}$  για μέση ημερήσια ζήτηση.



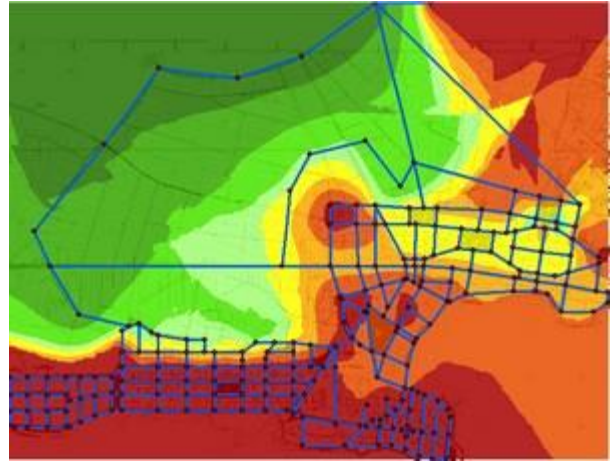
Εικόνα 40:  $PGV=20\text{cm/s}$  για μέση ημερήσια ζήτηση.



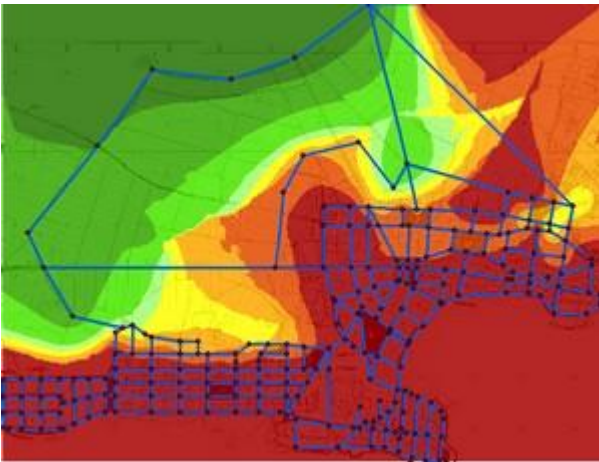
Εικόνα 41:  $PGV=30\text{cm/s}$  για μέση ημερήσια ζήτηση.



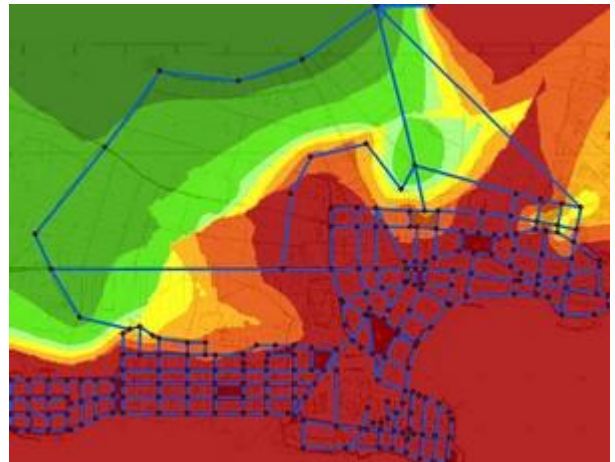
Εικόνα 42: PGV=40cm/s για μέση ημερήσια ζήτηση.



Εικόνα 43: PGV=50cm/s για μέση ημερήσια ζήτηση.

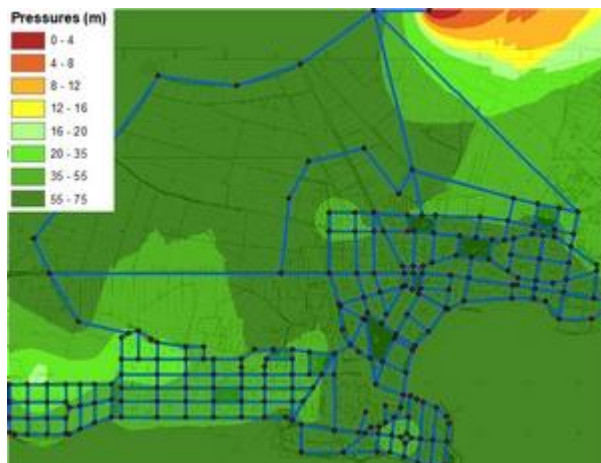


Εικόνα 44: PGV=60cm/s για μέση ημερήσια ζήτηση.

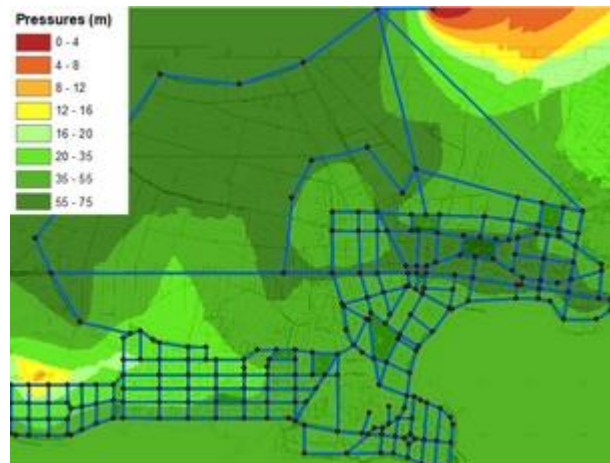


Εικόνα 45: PGV=70cm/s για μέση ημερήσια ζήτηση.

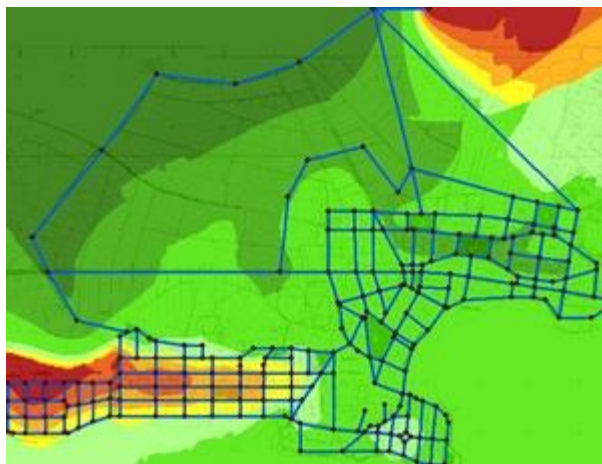
### 6.1.2 Ύψη πιέσεων για Μέγιστη Ημερήσια Ζήτηση.



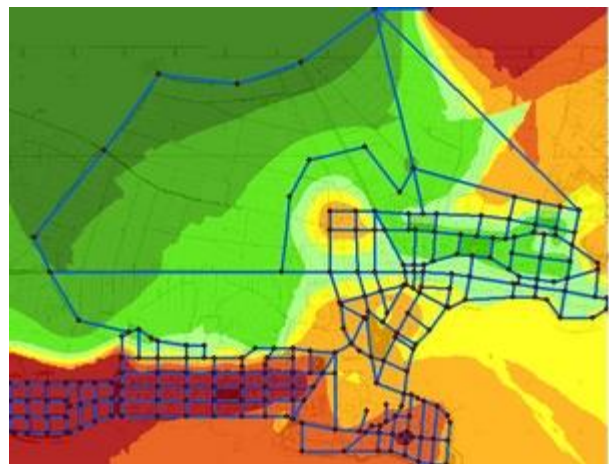
Εικόνα 46: Κανονική κατάσταση δικτύου (PGV=0cm/s) για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



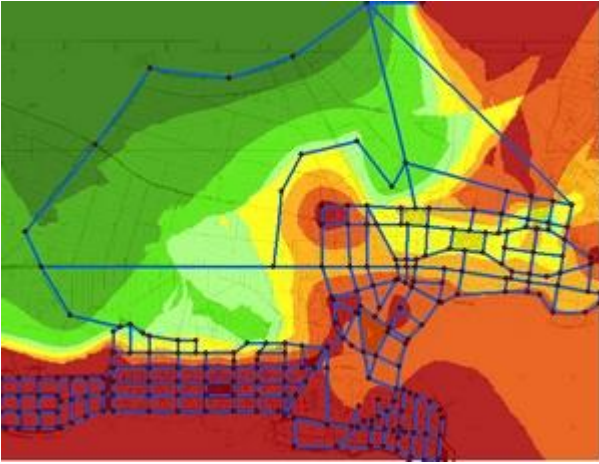
Εικόνα 47: PGV=10cm/s για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



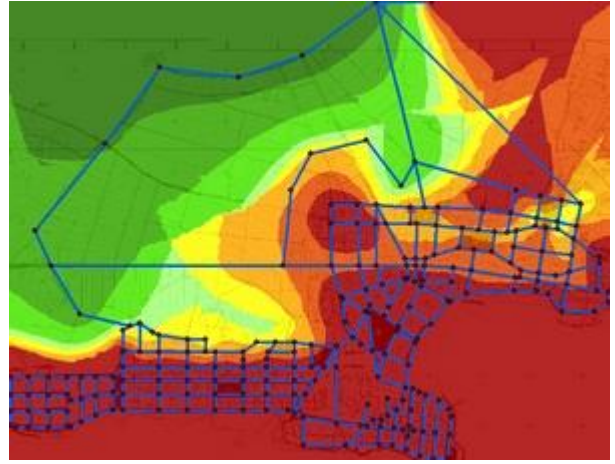
Εικόνα 48: PGV=20cm/s για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



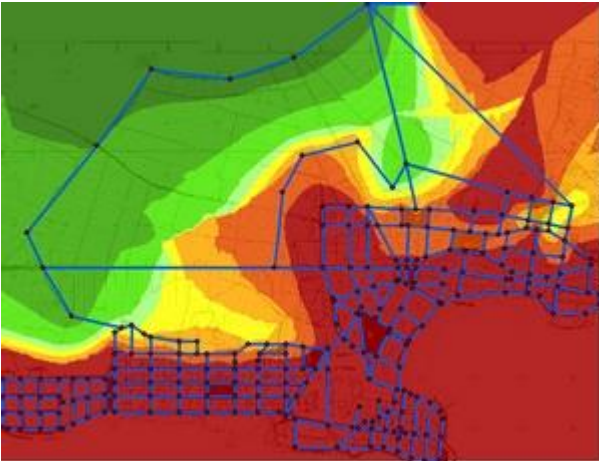
Εικόνα 49: PGV=30cm/s για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



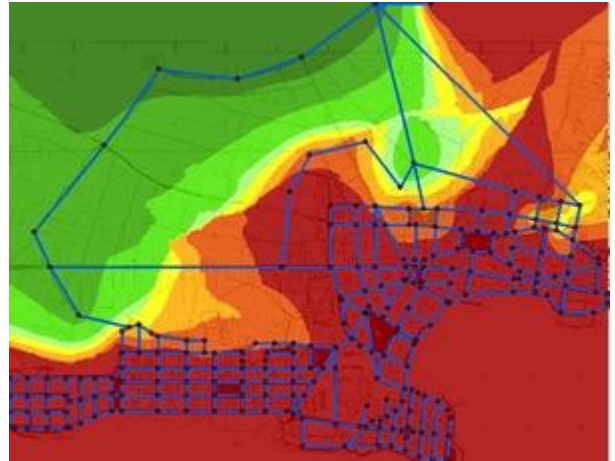
Εικόνα 50:  $PGV=40cm/s$  για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



Εικόνα 51:  $PGV=50cm/s$  για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.

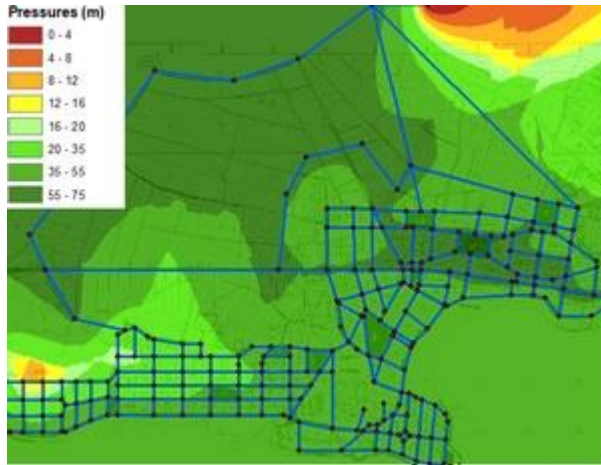


Εικόνα 52:  $PGV=60cm/s$  για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.

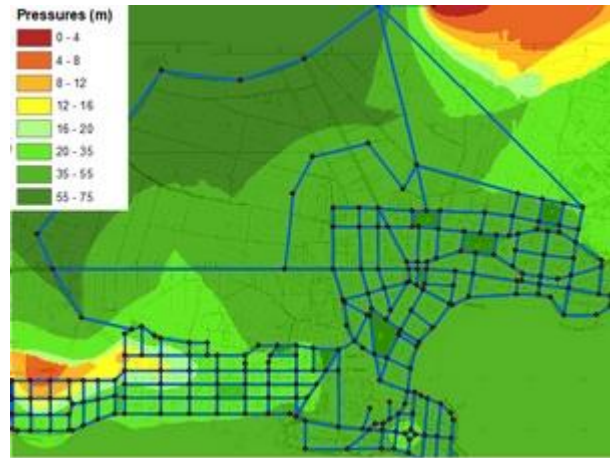


Εικόνα 53:  $PGV=70cm/s$  για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.

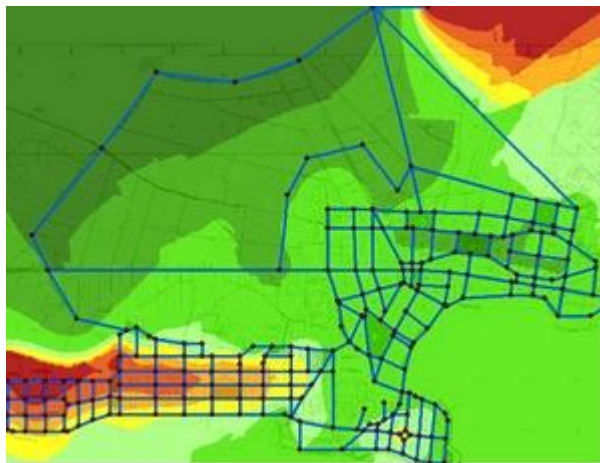
### 6.1.3 Ύψη πιέσεων για Μέγιστη Ωριαία ζήτηση.



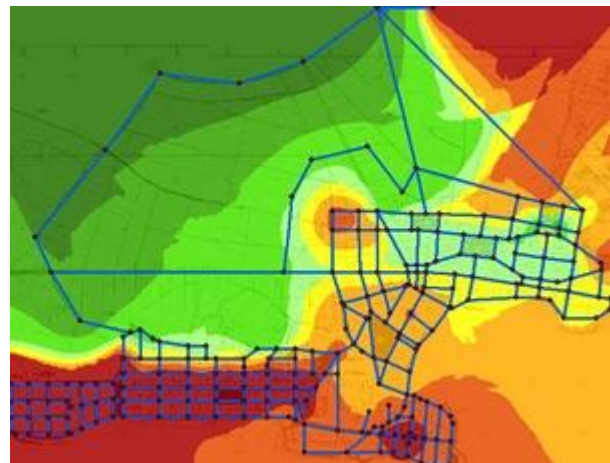
Εικόνα 54: Κανονική κατάσταση δικτύου χωρίς βλάβες για μέγιστη ωριαία ζήτηση.



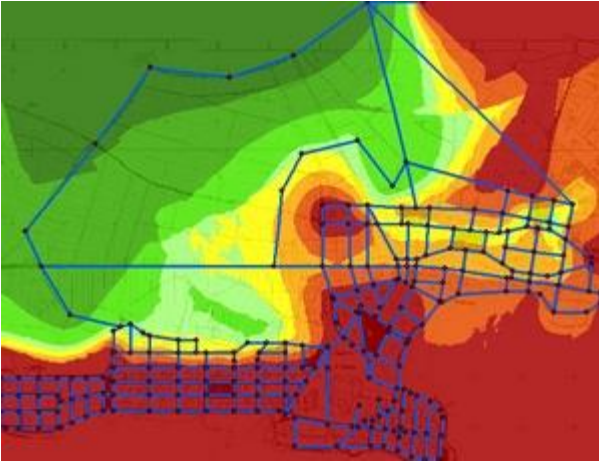
Εικόνα 55: PGV=10 cm/s για μέγιστη ωριαία ζήτηση.



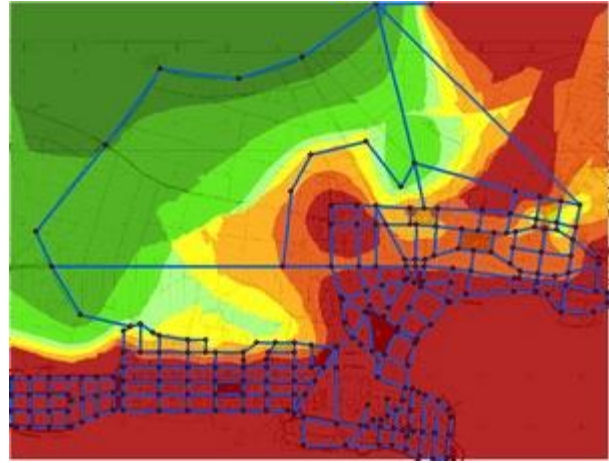
Εικόνα 56: PGV=20 cm/s για μέγιστη ωριαία ζήτηση.



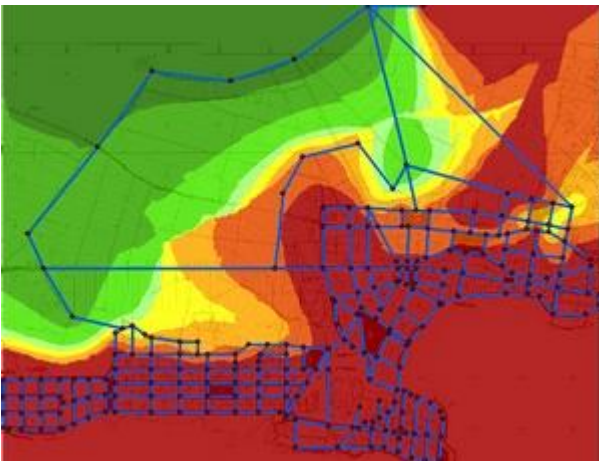
Εικόνα 57: PGV=30 cm/s για μέγιστη ωριαία ζήτηση.



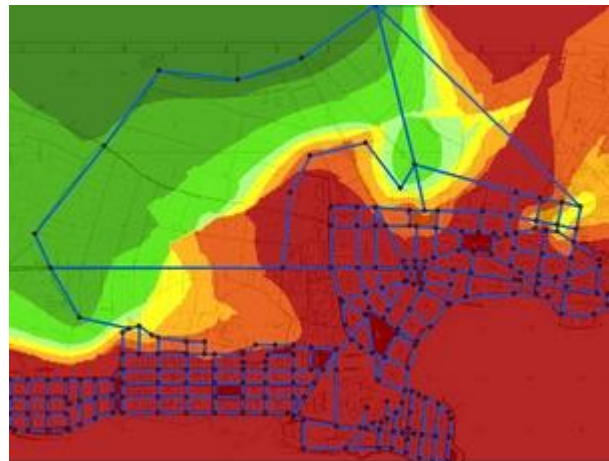
Εικόνα 58: PGV=40cm/s για μέγιστη ωριαία ζήτηση.



Εικόνα 59 PGV=50cm/s για μέγιστη ωριαία ζήτηση.



Εικόνα 60: PGV=60cm/s για μέγιστη ωριαία ζήτηση.



Εικόνα 61 PGV=70cm/s για μέγιστη ωριαία ζήτηση.

## 6.2 Πιθανότητα αστοχίας κόμβων.

Στην προηγούμενη ενότητα αναρτήθηκαν οι χάρτες κατανομής πίεσης στους κόμβους του δικτύου. Οι τιμές σε κάθε κόμβο αντιστοιχούν στην μέση τιμή των εκατό αναλύσεων Monte Carlo που πραγματοποιήθηκαν για κάθε σενάριο ζήτησης και σεισμού. Παρατηρείται ότι για τιμές μέγιστης εδαφικής ταχύτητας από 20cm/s το δίκτυο παρουσιάζει αδυναμία παροχής νερού με προβλεπόμενη από τον κανονισμό πίεση. Με δεδομένα τις πιέσεις από τις αναλύσεις MC βρέθηκε η εμπειρική πιθανότητα απόλυτης αστοχίας για κάθε κόμβο σε κάθε σενάριο ζήτησης και μέγεθος σεισμού. Ο όρος απόλυτη αστοχία σηματοδοτεί τη μηδενική παροχή νερού του κόμβου προς τους καταναλωτές και ορίζεται από την σχέση:

$$Pf = 1 - \frac{\prod_{i=1}^{100} P_i > 0}{100} \quad (35)$$

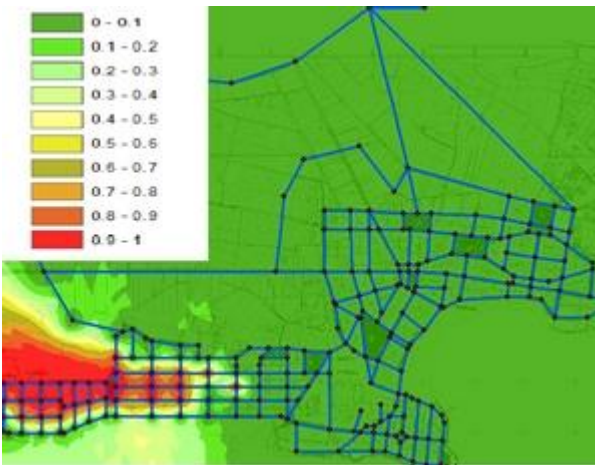
όπου ο όρος  $\prod_{i=1}^{100} P_i > 0$  ισούται με το πλήθος των επαναλήψεων MC όπου ο κόμβος  $i$  παρουσίασε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, δηλαδή της μηδενικής ενώ ο αριθμός 100 στον παρανομαστή αφορά το πλήθος αναλύσεων Monte Carlo.

Για τα δυσμενή σενάρια της μέγιστης ωριαίας, μέγιστης ημερήσιας παροχής και την ενεργοποίηση δύο πυροσβεστικών κρουνών σε συνδυασμό με τις θραύσεις αγωγών λόγω σεισμού, κρίνεται λογικό το όριο της μηδενικής πίεσης στους κόμβους για τον υπολογισμό της εμπειρικής πιθανότητας αστοχίας κόμβου καθότι οτιδήποτε άλλο θα ήταν αυστηρό. Αντίθετα για την μέση ημερήσια παροχή κρίνεται αναγκαία η αύξηση του ορίου αποδεκτής πίεσης. Για λόγους πληρότητας της μελέτης έγινε υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας για όριο πίεσης στα 15m, τιμή που προβλέπεται από τον κανονισμό ύδρευσης αν και κρίνεται επίσης αυστηρός και για όριο πίεσης στα 8m που αποτελεί και το πλέον εύλογο όριο πίεσης για το δίκτυο. Οι σχέση για τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας ήταν :

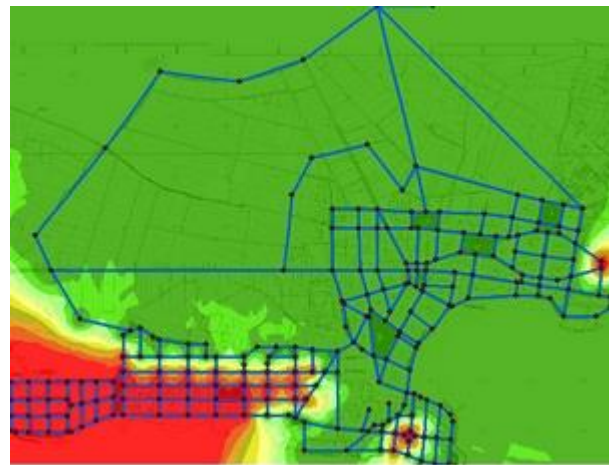
$$1 - \frac{\prod_{i=1}^{100} P_i > 8m}{100} \quad (36)$$

### 6.2.1 Πιθανότητα αστοχίας κόμβων για την Μέγιστη Ωριαία ζήτηση.

Οι παρακάτω χάρτες απεικονίζουν τη διακύμανση της πιθανότητας αστοχίας των κόμβων ανά χρωματισμό. Η μέγιστη εδαφική ταχύτητα 10cm/s δεν παρουσίασε απόλυτη αστοχία κάποιου τμήματος του δικτύου ή κόμβου οπότε κρίθηκε ότι δεν είναι αναγκαία η απεικόνιση της.

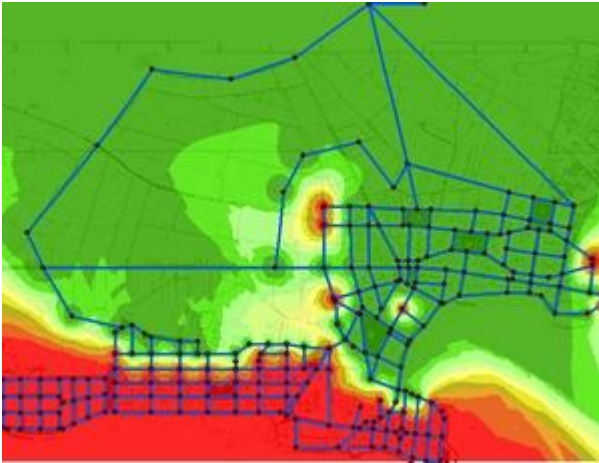


Εικόνα 62: PGV=20cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ωριαία ζήτηση.

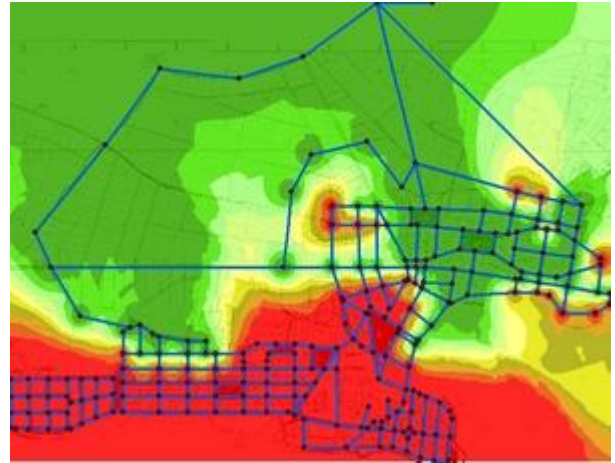


Εικόνα 63: PGV=30cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ωριαία ζήτηση.

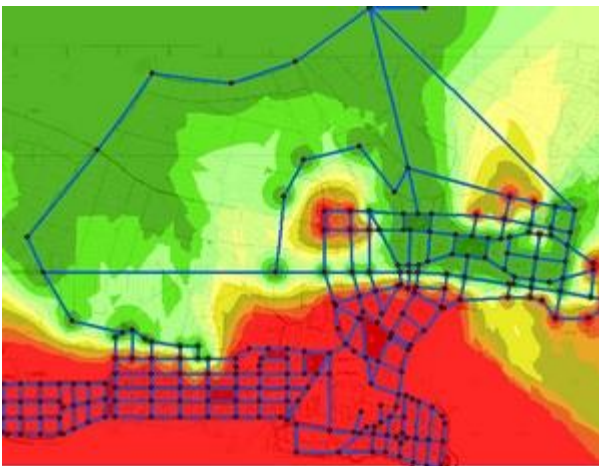




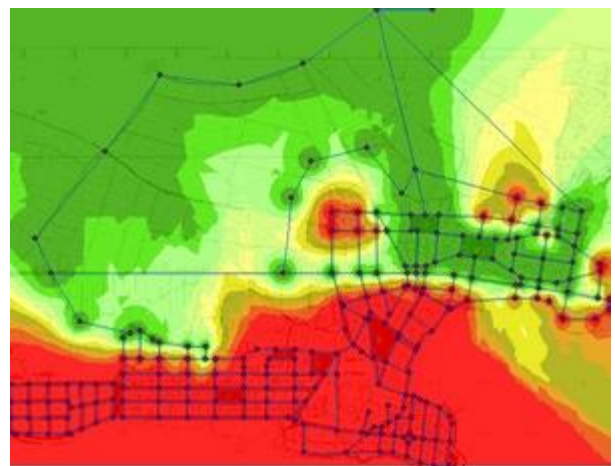
*Εικόνα 64: PGV=40cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ωριαία ζήτηση.*



*Εικόνα 65: PGV=50cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ωριαία ζήτηση.*



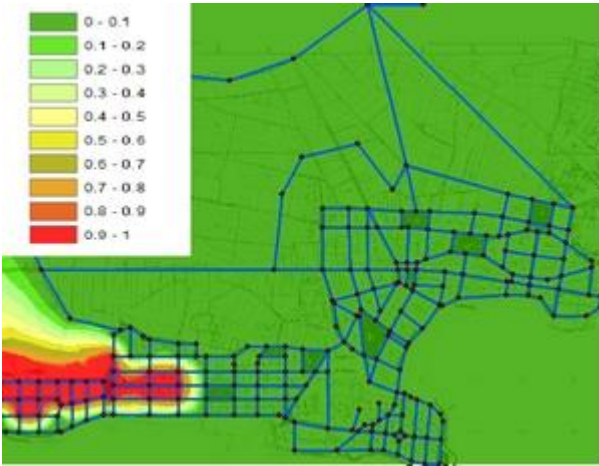
*Εικόνα 66: PGV=60cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ωριαία ζήτηση.*



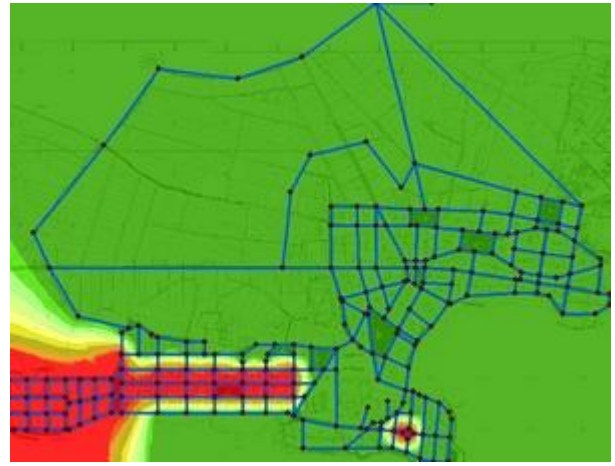
*Εικόνα 67: PGV=70cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ωριαία ζήτηση.*

### 6.2.2 Πιθανότητες αστοχίας δικτύου για την Μέγιστη Ημερήσια ζήτηση.

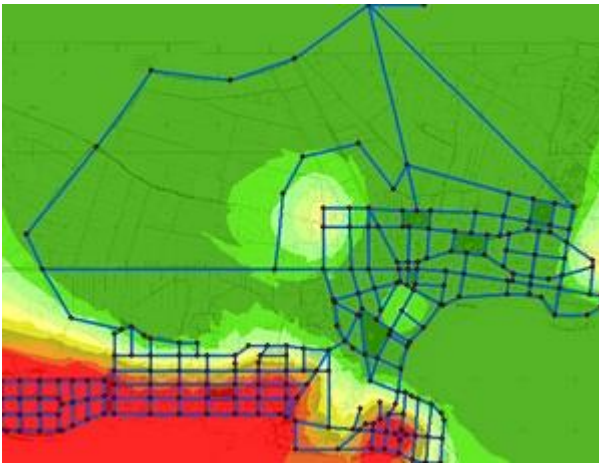
Για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 10cm/s εξακολουθεί να ισχύει ότι και στην περίπτωση της μέγιστης ωριαίας ζήτησης δηλαδή η απουσία αστοχίας κάποιου τμήματος του δικτύου ή μεμονωμένου κόμβου.



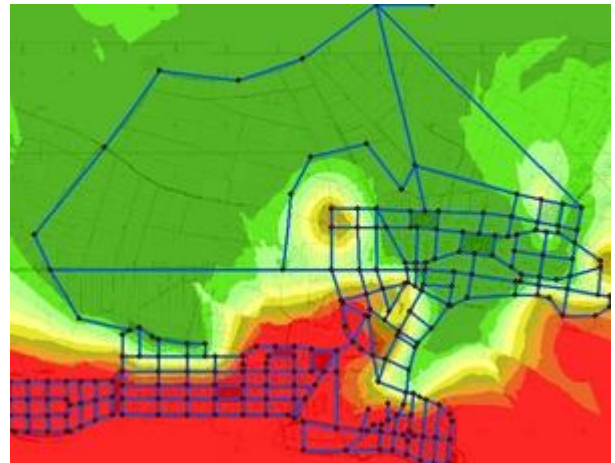
Εικόνα 68:  $PGV=20cm/s$  πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



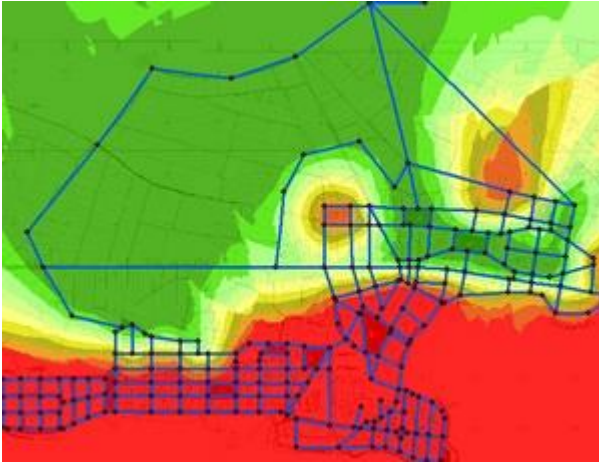
Εικόνα 69:  $PGV=30cm/s$  πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



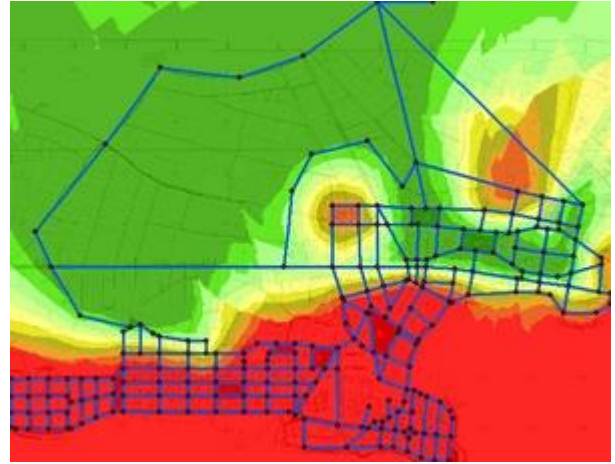
Εικόνα 70:  $PGV=40cm/s$  πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



Εικόνα 71:  $PGV=50cm/s$  πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



*Εικόνα 72: PGV=60cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.*

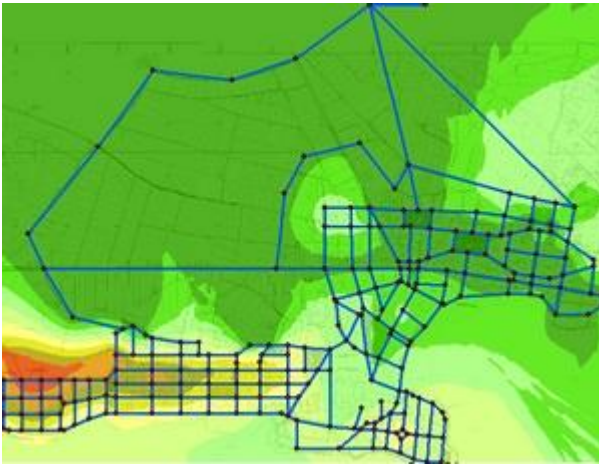


*Εικόνα 73: PGV=70cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.*

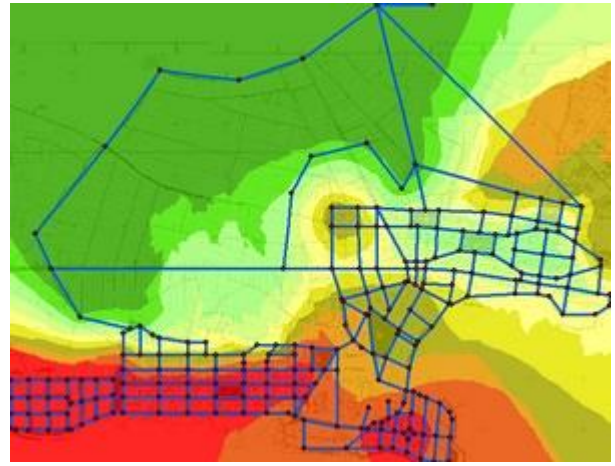
### 6.2.3 Πιθανότητα αστοχίας κόμβων για Μέση Ημερήσια ζήτηση.

Όπως προαναφέρθηκε για μέση ημερήσια ζήτηση το όριο στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής πίεσης δεν είναι αποδεκτό επομένως τέθηκαν δύο τιμές ως όριο αστοχίας, η αυστηρή τιμή των 15m που προβλέπεται για κανονική λειτουργία του δικτύου και το εύλογο όριο στα 8μ.

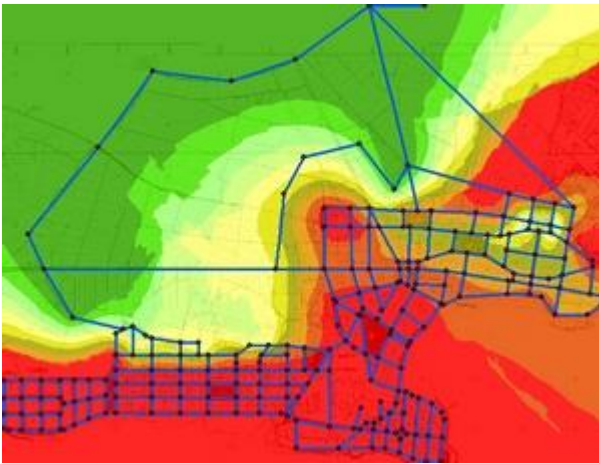
6.2.3.1 Μέση ημερήσια ζήτηση και όριο αστοχίας στα 15m.



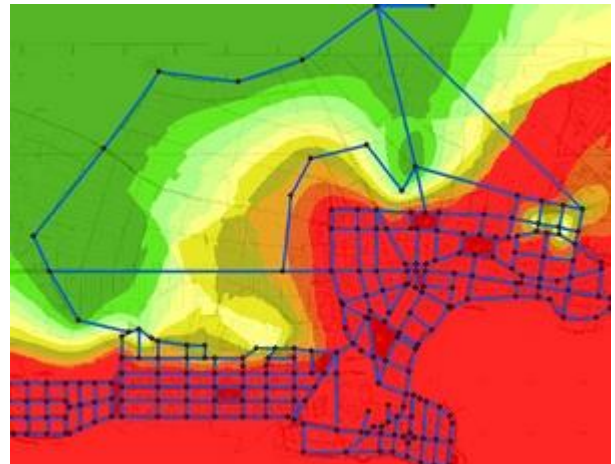
Εικόνα 74:PGV=20cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.



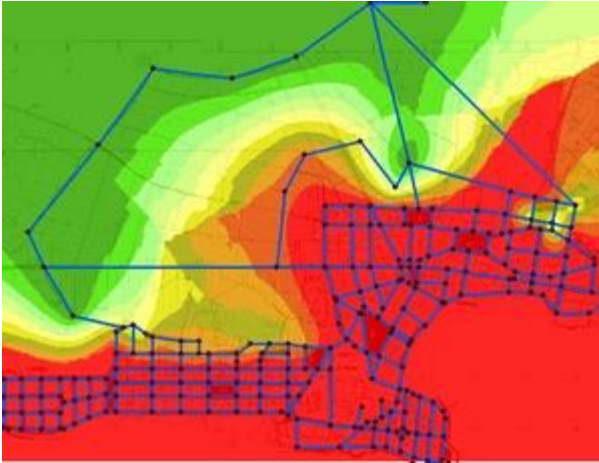
Εικόνα 75:PGV=30cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.



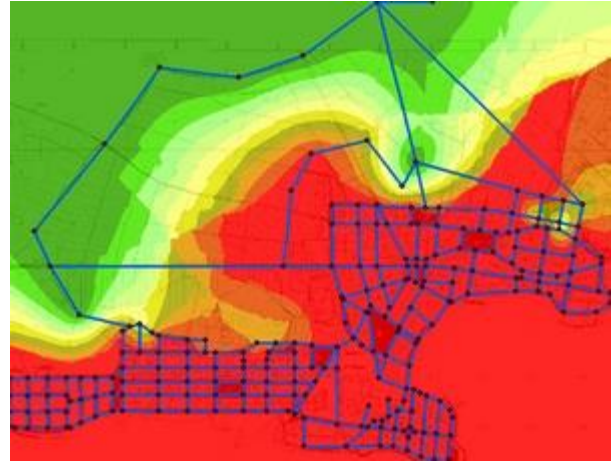
Εικόνα 76:PGV=40cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.



Εικόνα 77:PGV=50cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.

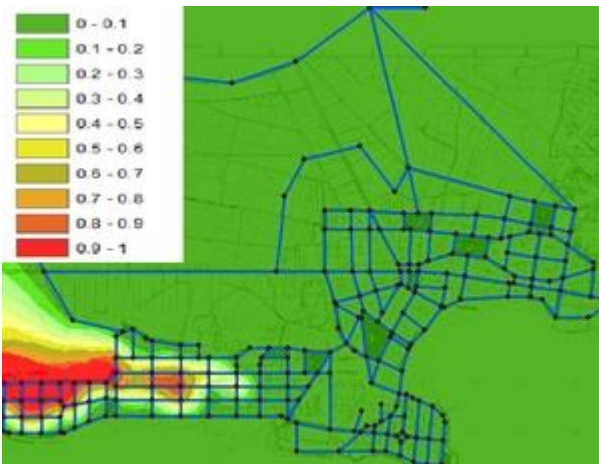


Εικόνα 78:PGV=60cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.

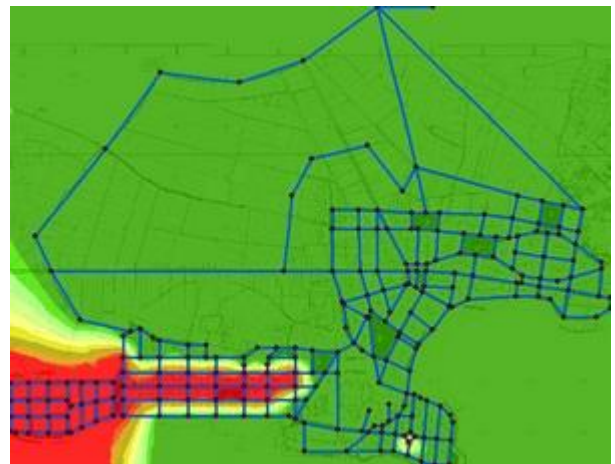


Εικόνα 79:PGV=70cm/s

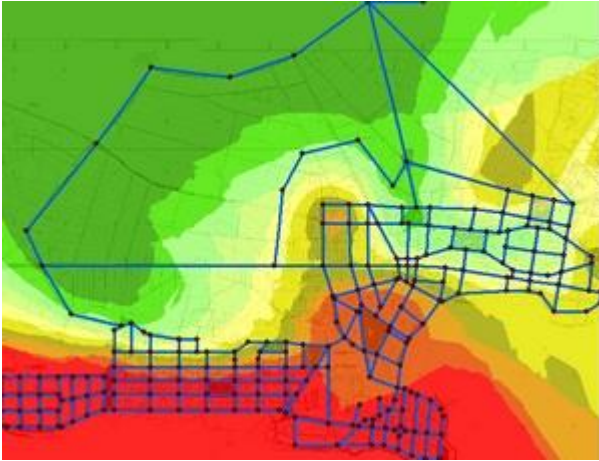
### 6.2.3.2 Μέση ημερήσια ζήτηση και όριο αστοχίας στα 8m.



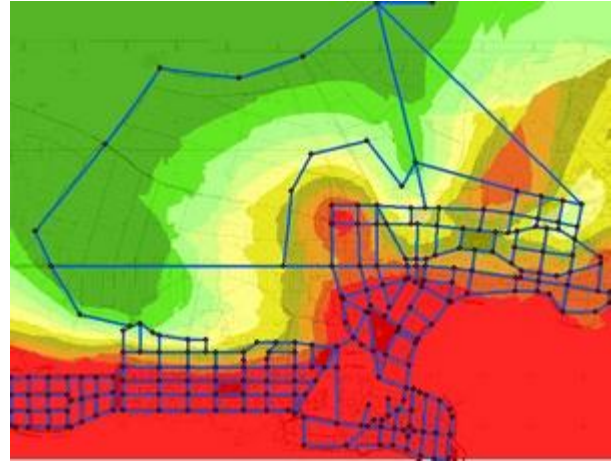
Εικόνα 80:PGV=20cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.



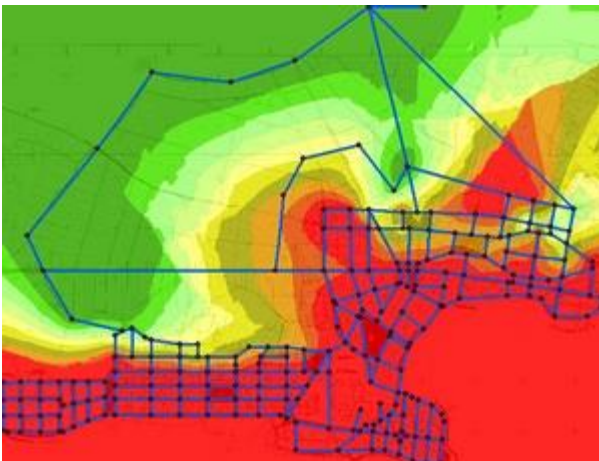
Εικόνα 81:PGV=30cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.



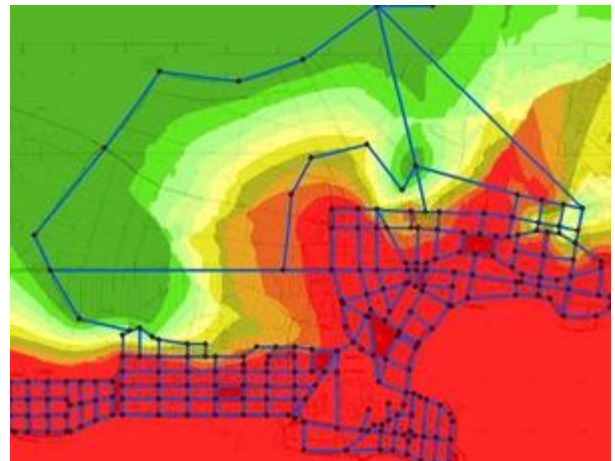
Εικόνα 82:PGV=40cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.



Εικόνα 83:PGV=50cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.



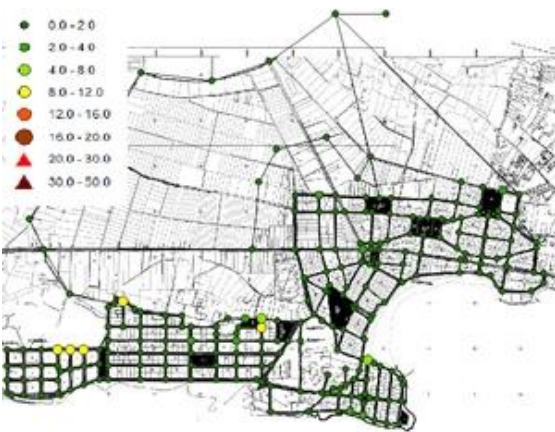
Εικόνα 84:PGV=60cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.



Εικόνα 85:PGV=70cm/s πιθανότητα αστοχίας για μέση ημερήσια ζήτηση.

#### 6.2.4 Διασπορά των πιέσεων για τις αναλύσεις Monte Carlo.

Η διασπορά των τιμών πίεσης κάθε κόμβου για τις αναλύσεις Monte Carlo (100 αναλύσεις) έγινε με τη μέθοδο του εκατοστημορίου που αποτελεί γενίκευση της μεθόδου της διαμέσου. Το ρ-οστό εκατοστημόριο ενός συνόλου είναι εκείνη η τιμή, η οποία όταν οι τιμές διαταχθούν σε αύξουσα σειρά, έχει από αριστερά της το ρ% των δεδομένων και από δεξιά της το υπόλοιπο (100-ρ)%. Ορίστηκε η 16οστή τιμή του εκατοστημορίου, δηλαδή υπολογίσθηκε το μέγεθος του μισού της διαφοράς της 84ής από την 16<sup>η</sup> τιμή για την μέση ημερήσια ζήτηση.



Εικόνα 86: Διασπορά πιέσεων PGV=10cm/s



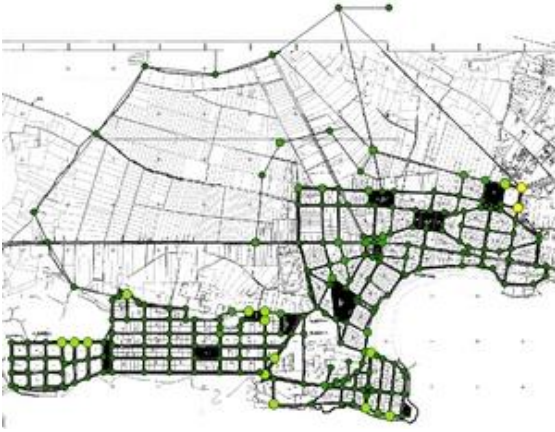
Εικόνα 87: Διασπορά πιέσεων PGV=20cm/s



Εικόνα 88: Διασπορά πιέσεων PGV=30cm/s



Εικόνα 89: Διασπορά πιέσεων PGV=40cm/s

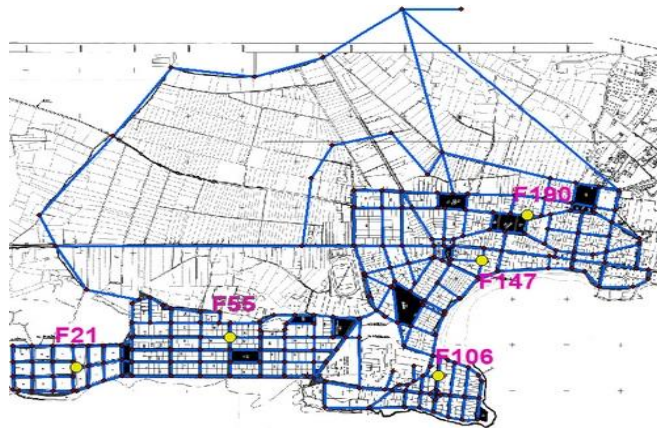


Εικόνα 90: Διασπορά πιέσεων PGV=50cm/s

Εικόνα 91: Διασπορά πιέσεων PGV=60cm/s

### 6.3 Ιστογράμματα κρίσιμων κόμβων.

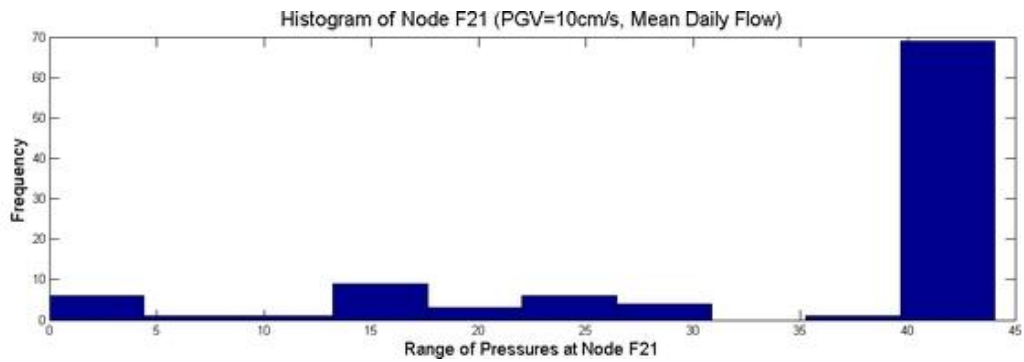
Το ιστόγραμμα είναι γραφική απεικόνιση στατιστικών συχνοτήτων περιοχών τιμών ενός μεγέθους. Στον οριζόντιο άξονα παριστάνονται οι διακυμάνσεις του εύρους των τιμών, ενώ στον κάθετο ορίζονται οι αντίστοιχη συχνότητα εμφάνισης. Στο δίκτυο της Ν. Αρτάκης κρίθηκαν ως κρίσιμοι τέσσερις κρίσιμοι κόμβοι, ένας κόμβος για κάθε πολεοδομική ζώνη του δικτύου μελέτης που βρίσκεται στο κέντρο περίπου της περιοχής του. Πρόκειται για τους κόμβους Φ21 για τη ζώνη Α, Φ55 της ζώνης Β, Φ106 της ζώνης Γ και Φ147 για τις ζώνες Δ-Ε. Η θέση των κόμβων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



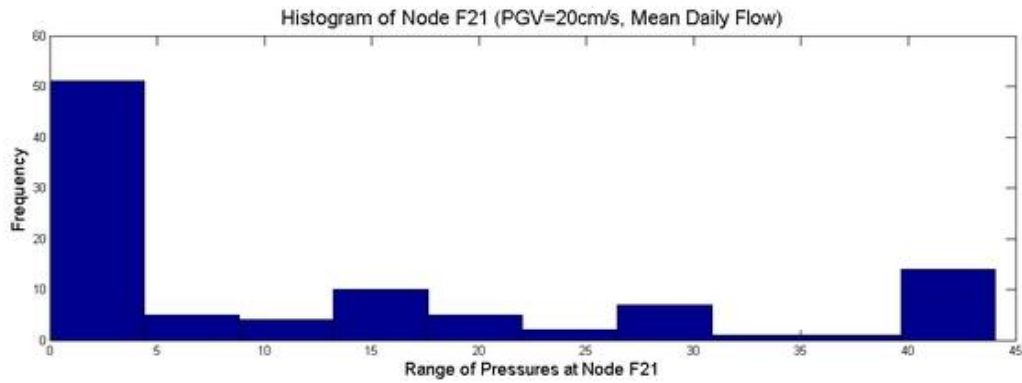
Εικόνα 92: Τοποθεσία κρίσιμων κόμβων.



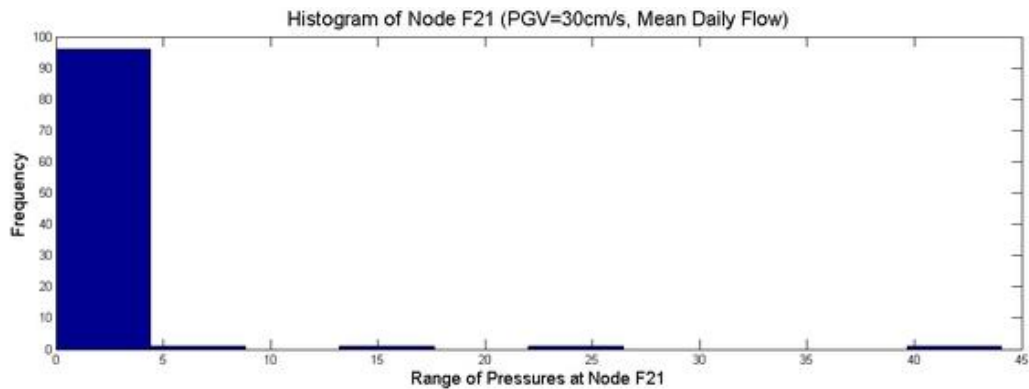
### 6.3.1 Ιστογράμματα κόμβου Φ21.



Εικόνα 93 Ιστόγραμμα Φ21 για PGV=10cm/s.

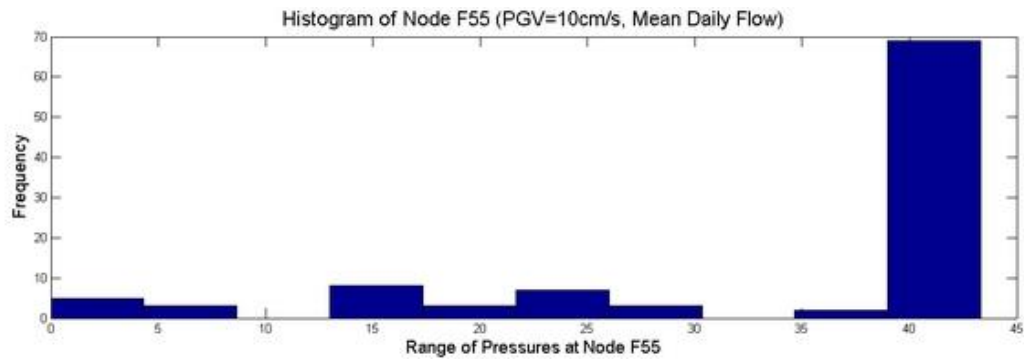


Εικόνα 94 Ιστόγραμμα Φ21 για PGV=20cm/s.

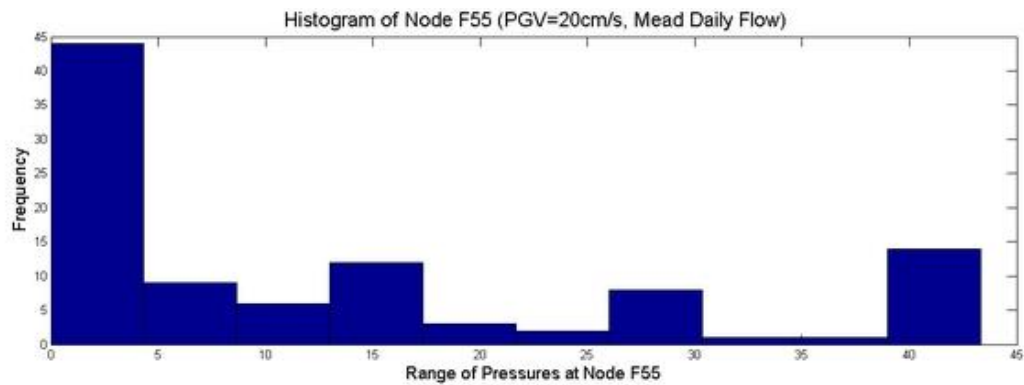


Εικόνα 95 Ιστόγραμμα Φ21 για PGV=30cm/s.

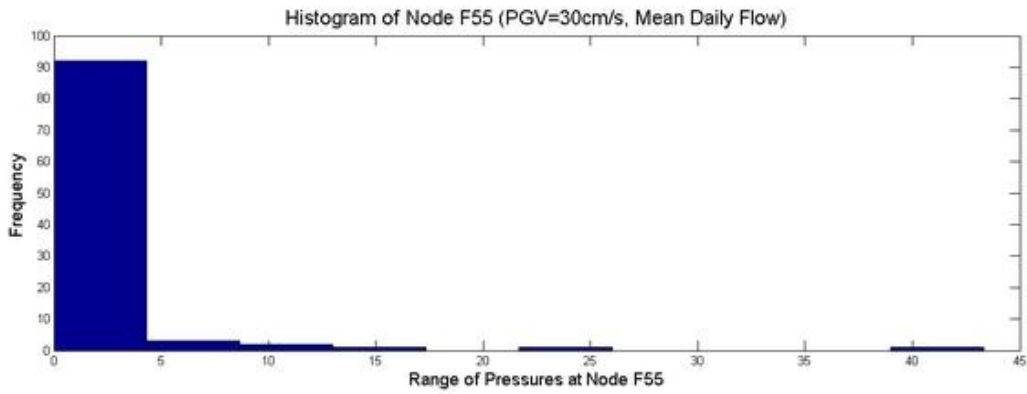
### 6.3.2 Ιστογράμματα κόμβου Φ55.



Εικόνα 96: Ιστόγραμμα κόμβου Φ55 για PGV=10cm/s.

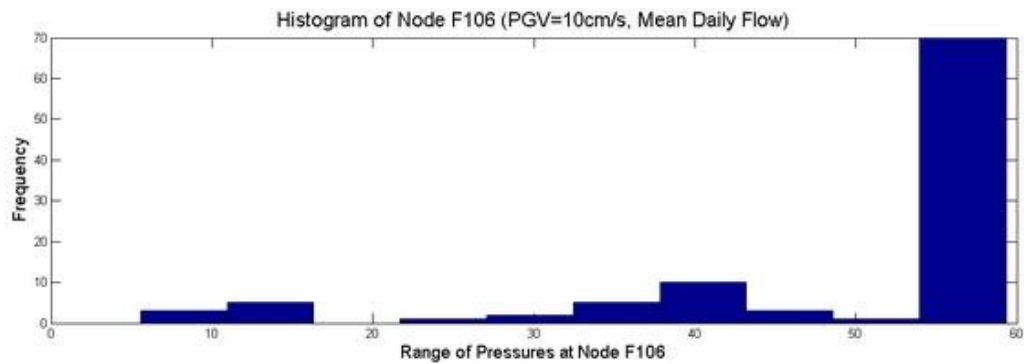


Εικόνα 97: Ιστόγραμμα κόμβου Φ55 για PGV=20cm/s.

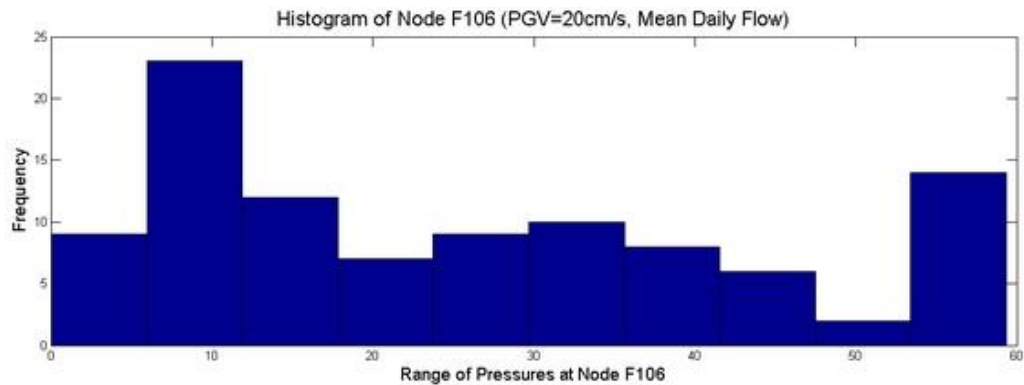


Εικόνα 98: Ιστογράμμα κόμβου Φ55 για PGV=30cm/s.

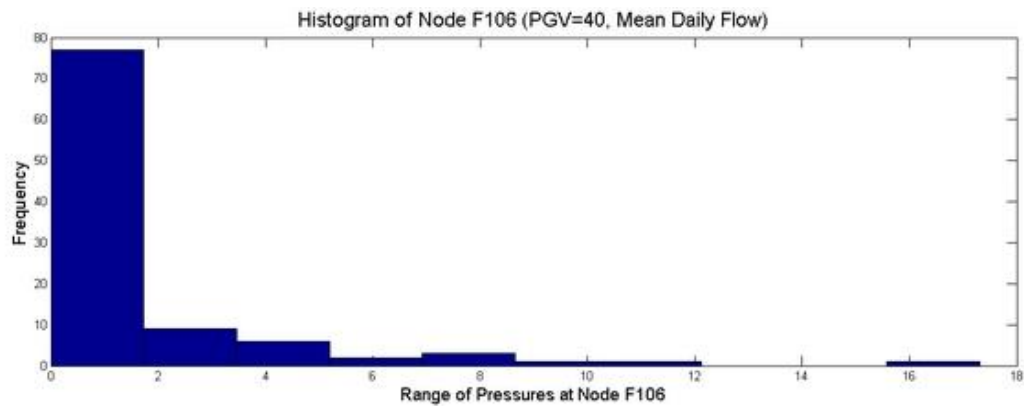
### 6.3.3 Ιστογράμματα κόμβου Φ106.



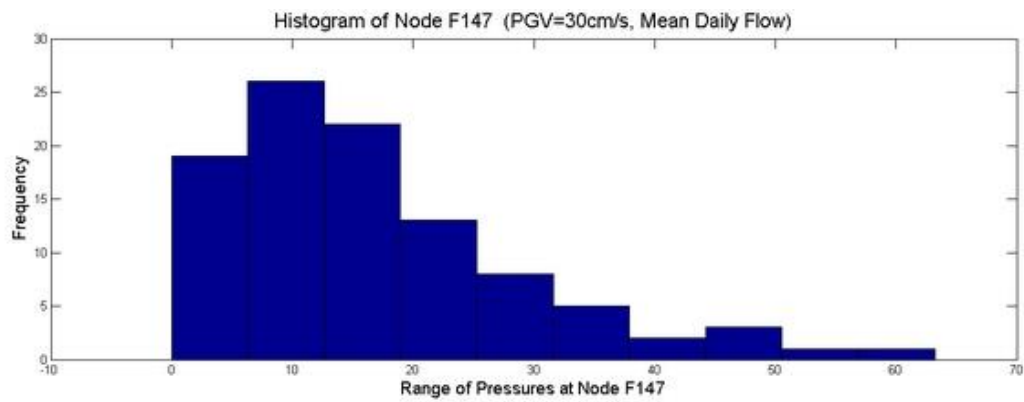
Εικόνα 99: Ιστογράμμα κόμβου Φ106 για PGV=10cm/s.



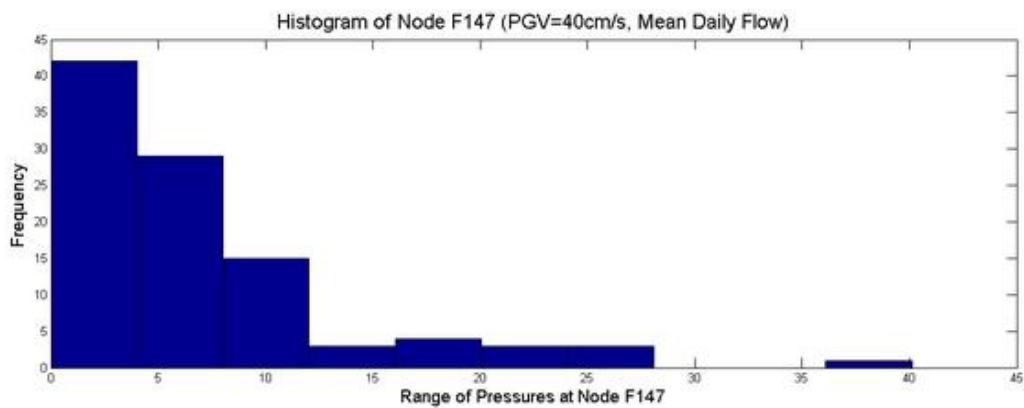
Εικόνα 100: Ιστογράμμα κόμβου Φ106 για PGV=20cm/s.



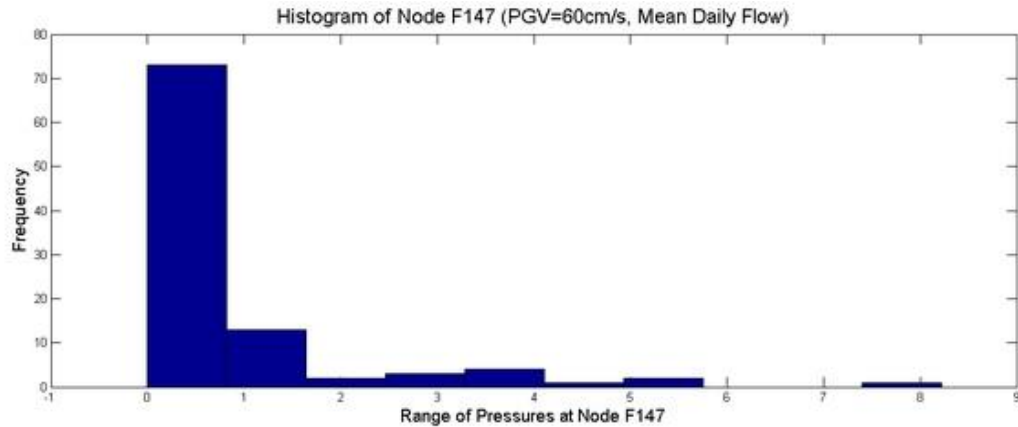
Εικόνα 101: Ιστόγραμμα κόμβου Φ106 για PGV=40cm/s



Εικόνα 102: Ιστόγραμμα κόμβου Φ147 για PGV=30cm/s.



Εικόνα 103: Ιστόγραμμα κόμβου Φ147 για PGV=40cm/s.

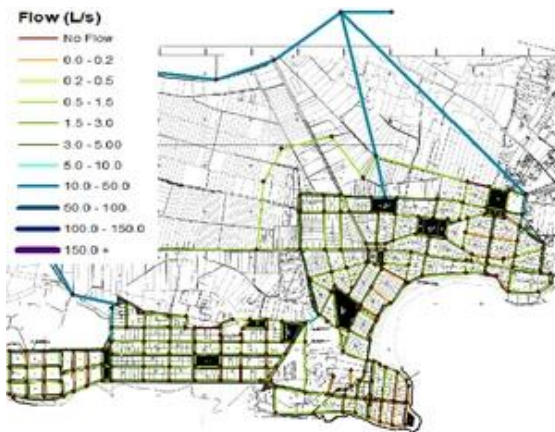


Εικόνα 104: Ιστογράμμα κόμβου Φ147 για PGV=60cm/s

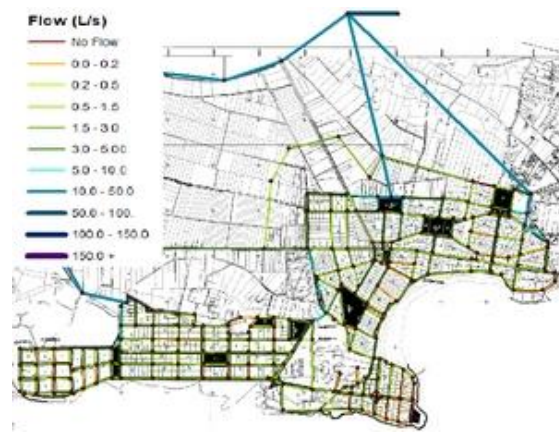
#### 6.4 Μέσες παροχές δικτύου.

Το δεύτερο υδραυλικό μέγεθος που αναλύθηκε από τα αποτελέσματα των υδραυλικών εκτελέσεων είναι η παροχή των αγωγών. Υπολογίσθηκε η μέση τιμή για κάθε εκτέλεση MC με διαφορετικές παραμέτρους εισόδου (PGV-ζήτηση), όμως η διαδικασία εξάλειψης κατά την εκτέλεση του κώδικα των τμημάτων με αρνητική πίεση συμψηφίζοντας τους κόμβους μερικής και μηδενικής παροχής, επιτρέπει μόνο μια σχετικά αβέβαιη προσέγγιση για τη ποσότητα παροχής στους αγωγούς διανομής. Αντίθετα η παραδοχή για μη αστοχία των αγωγών τροφοδοσίας του δικτύου, δύναται να παρέχει ακριβέστερες πληροφορίες για την παροχέτευση αυτών των αγωγών. Στα επόμενα σχήματα θα αποτυπωθεί η διακύμανση της παροχής ανά σενάριο και ανά μέγιστη εδαφική ταχύτητα.

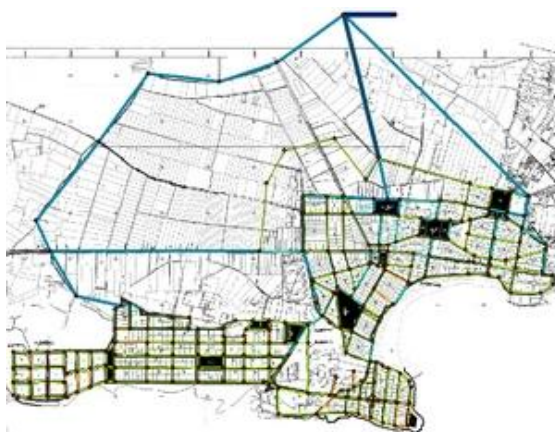
### 6.4.1 Μέση παροχή για μέση ημερήσια ζήτηση.



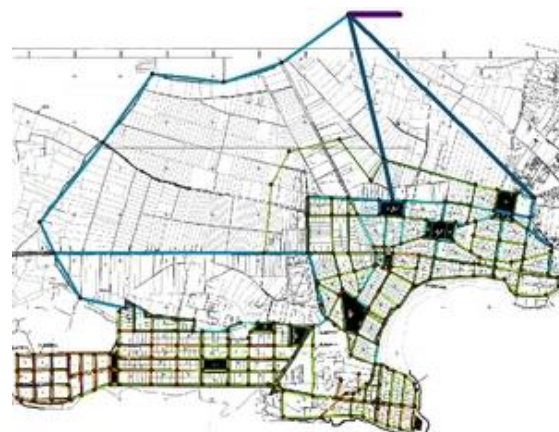
Εικόνα 105: Κανονική λειτουργία δικτύου



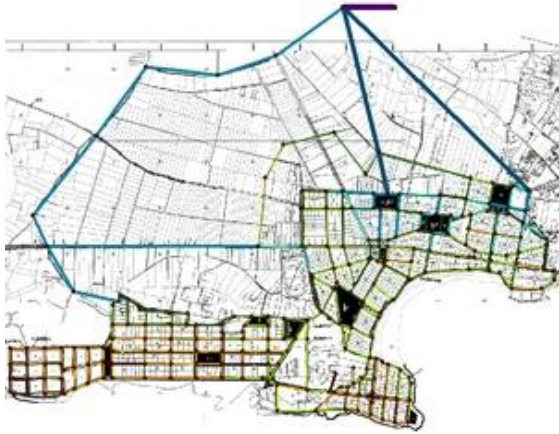
Εικόνα 106: PGV=10cm/s



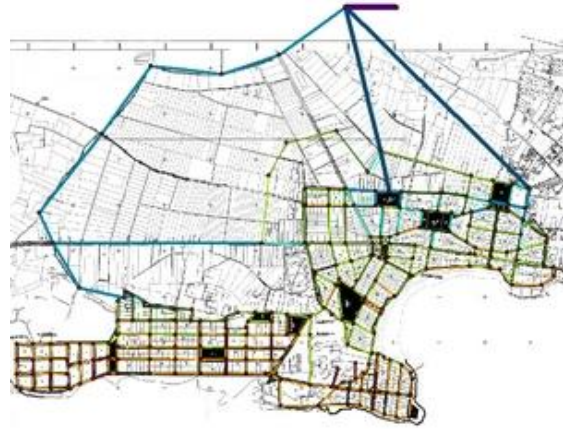
Εικόνα 107: PGV=20cm/s



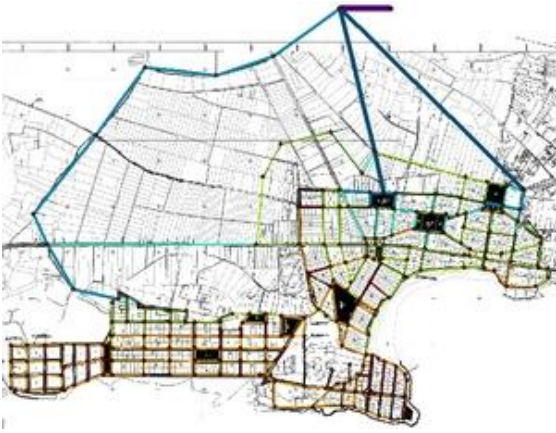
Εικόνα 108: PGV=30cm/s



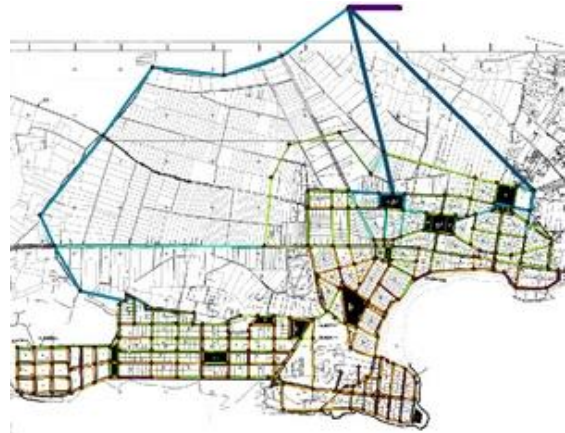
Εικόνα 109: PGV=40cm/s



Εικόνα 110: PGV=50cm/s

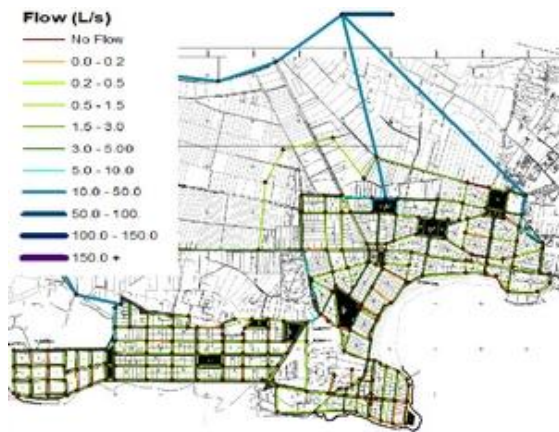


Εικόνα 111: PGV=60cm/s

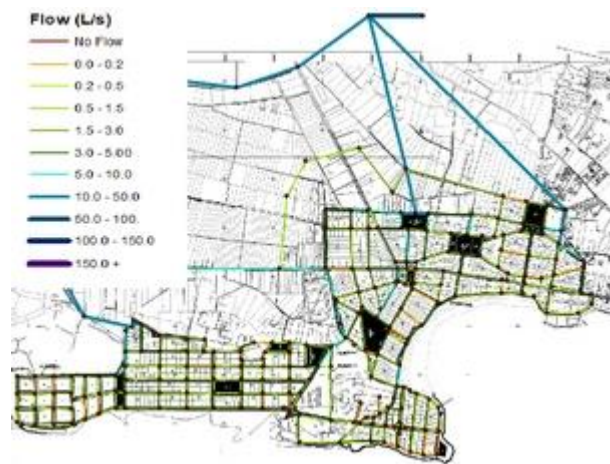


Εικόνα 112: PGV=70cm/s

#### 6.4.2 Μέση παροχή για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.



Εικόνα 113: Κανονική λειτουργία δικτύου



Εικόνα 114: PGV=10cm/s

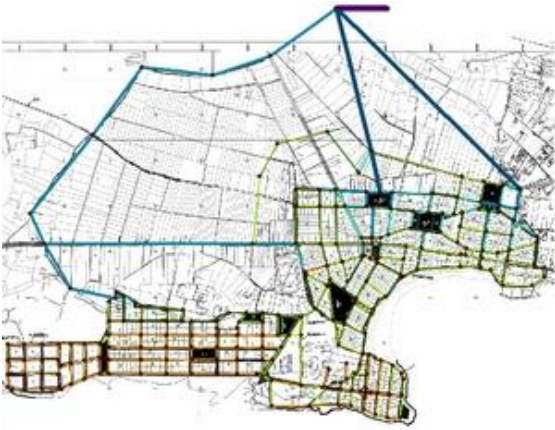


Εικόνα 115: PGV=20cm/s

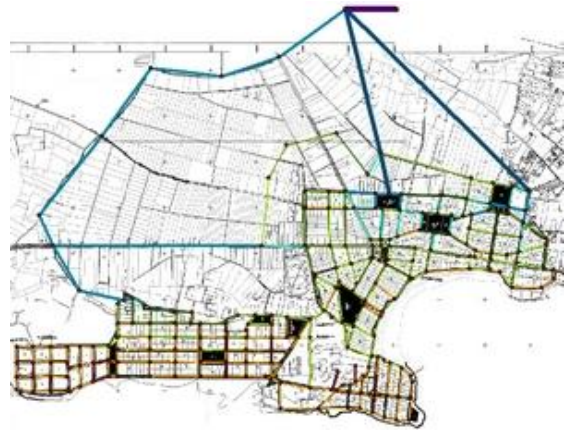


Εικόνα 116: PGV=30cm/s

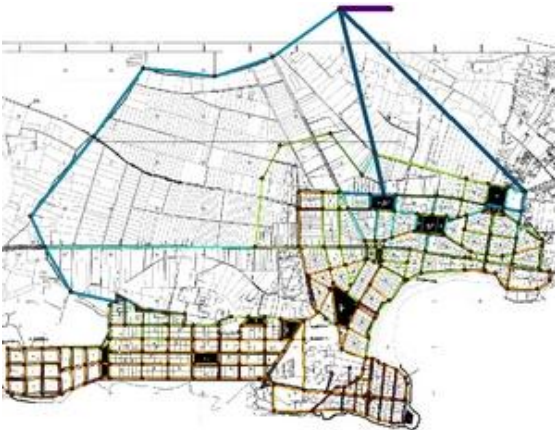




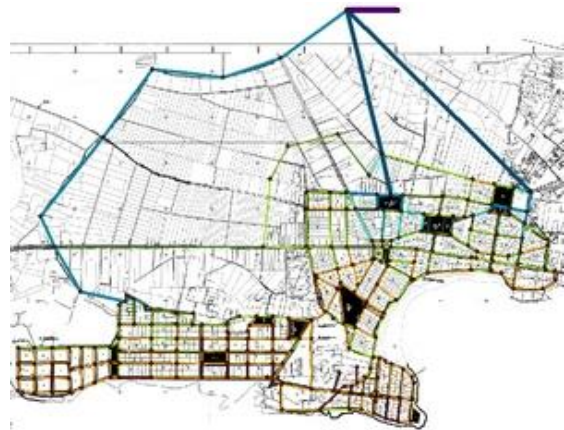
Εικόνα 117: PGV=40cm/s



Εικόνα 118: PGV=50cm/s

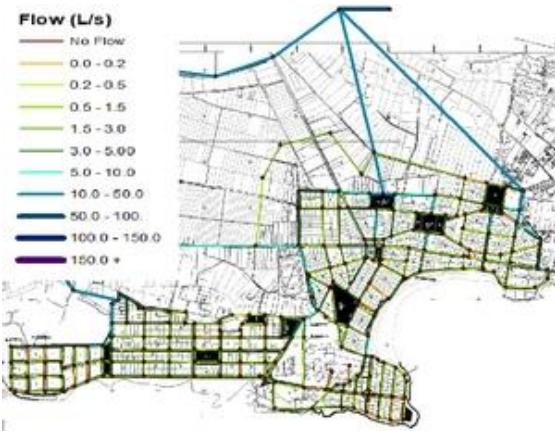


Εικόνα 119: PGV=60cm/s

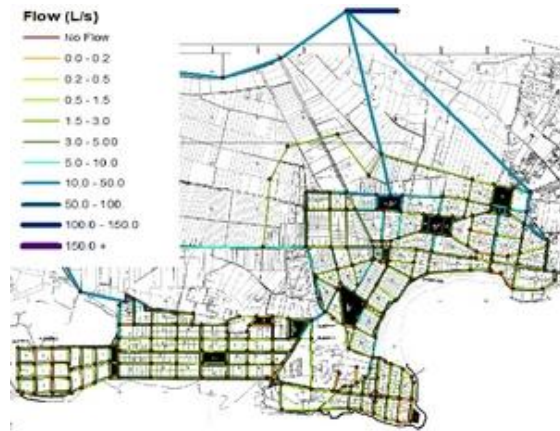


Εικόνα 120: PGV=70cm/s

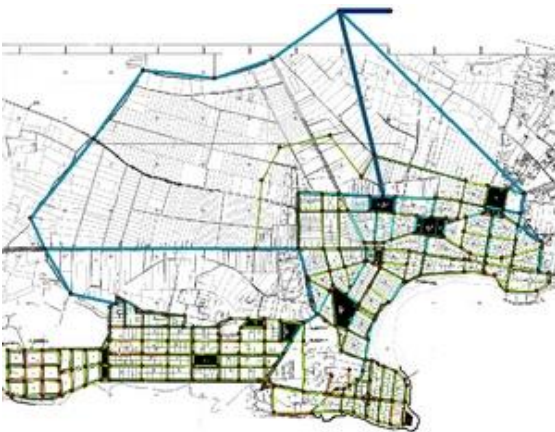
### 6.4.3 Παροχή για μέγιστη ωριαία ζήτηση.



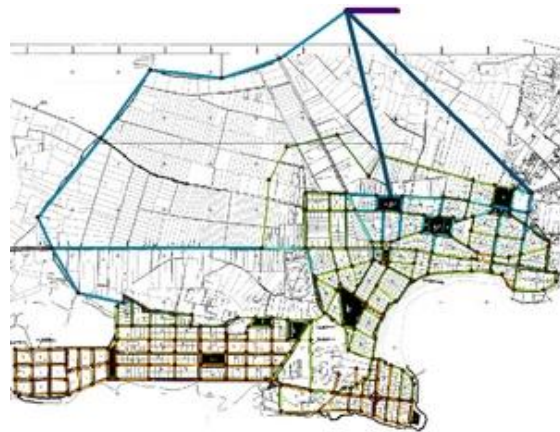
Εικόνα 121: Κανονική Λειτουργία δικτύου



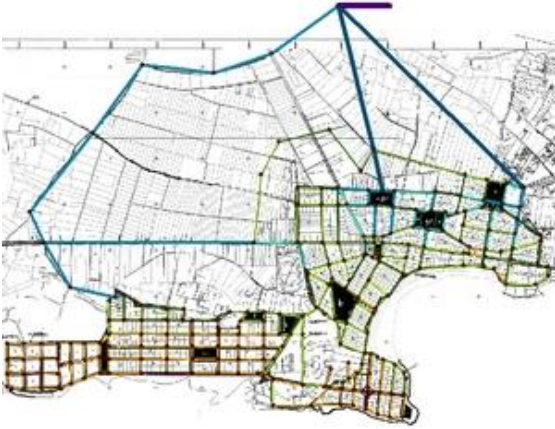
Εικόνα 122: PGV=10cm/s



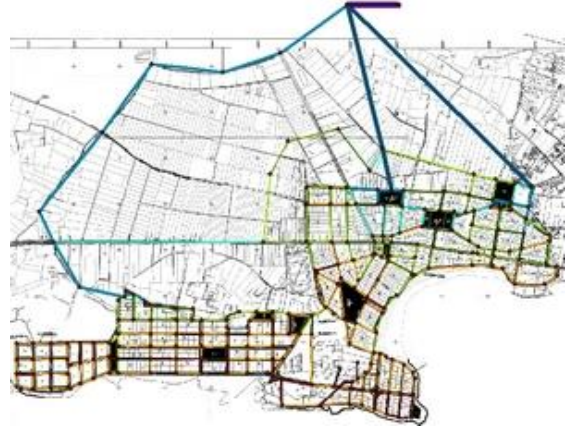
Εικόνα 123: PGV=20cm/s



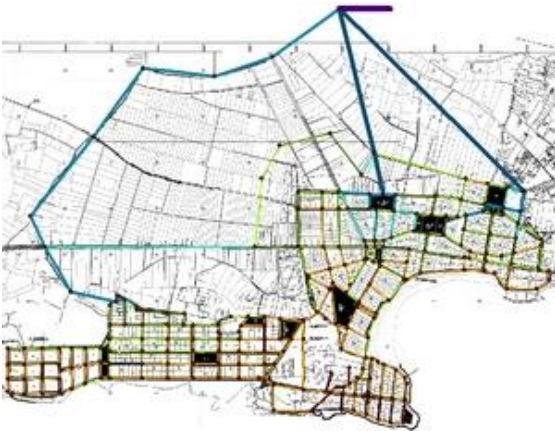
Εικόνα 124: PGV=30cm/s



Εικόνα 125: PGV=40cm/s



Εικόνα 126: PGV=60cm/s

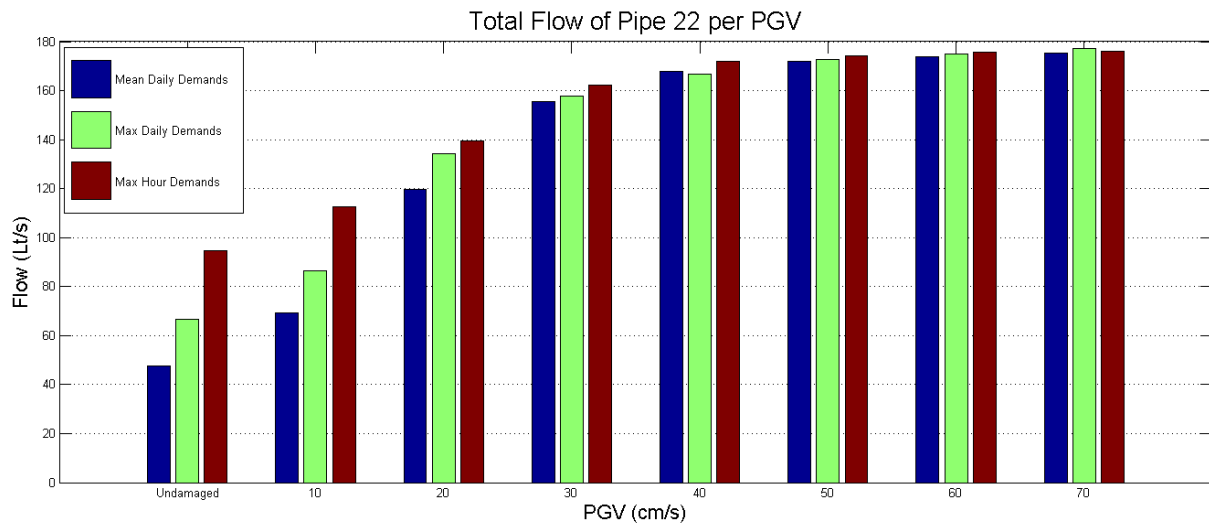


Εικόνα 127: PGV=70cm/s

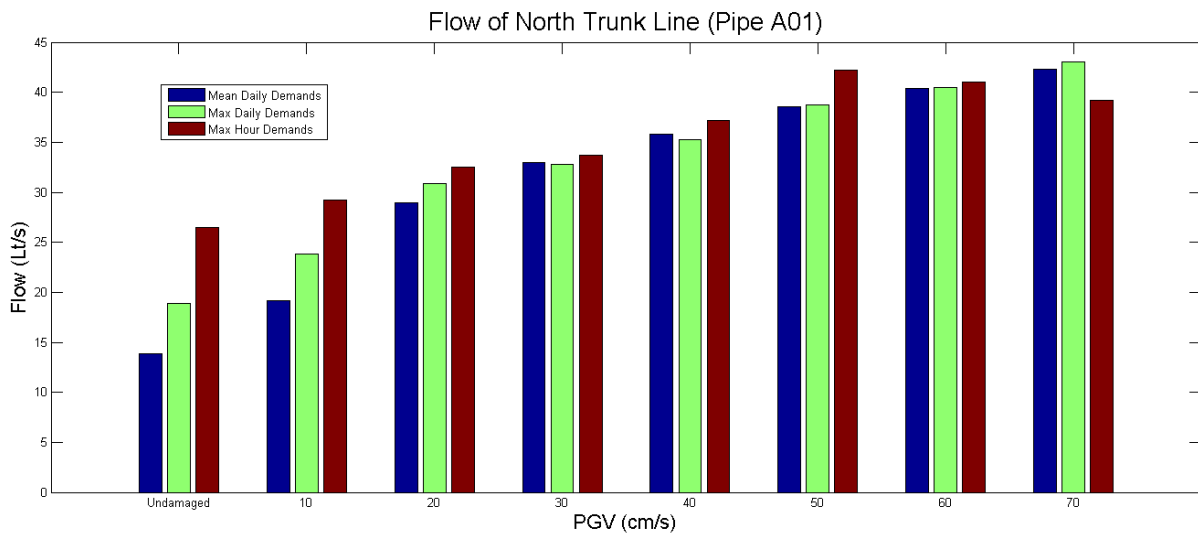
#### 6.4.4 Μεταβολή συνολική παροχής.

Η διαδικασία εξάλειψης και των κόμβων μερικής παροχής κατά την διαχείριση των αρνητικών πιέσεων του δικτύου δεν επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό των παροχών του δικτύου διανομής. Με την παραδοχή της άθραυστης κατάστασης των αγωγών τροφοδοσίας όμως δύναται να γίνει μια κατατοπιστική προσέγγιση των παροχών στο κορμό του δικτύου. Ιδιαίτερα ο αγωγός 22 που συνδέει τη δεξαμενή με το πιεζοθραυστικό φρεάτιο, μπορεί να παρέχει την πληροφορία για την

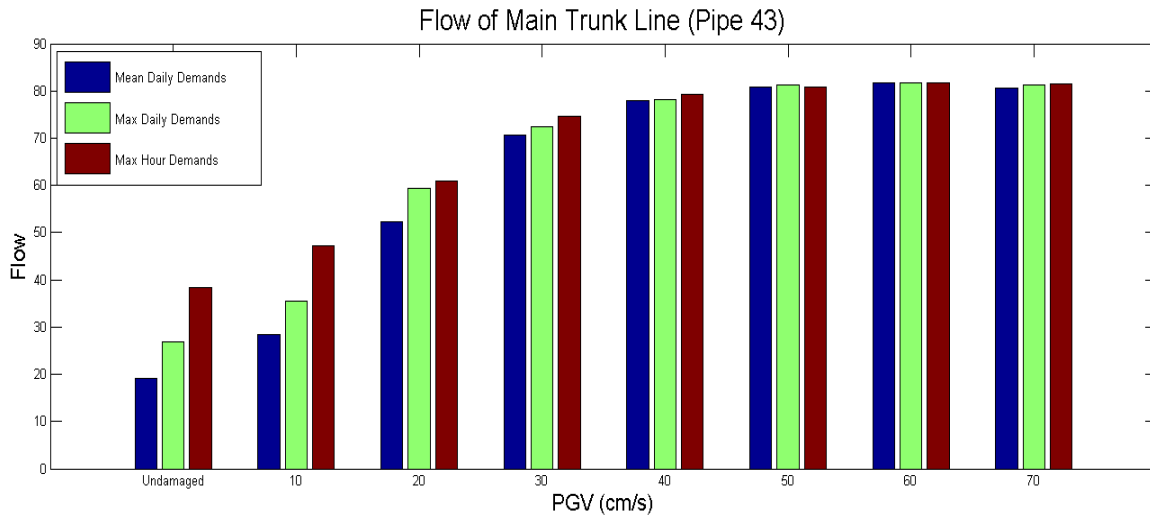
μεταβολή της συνολικής ποσότητας νερού που καταναλώνεται συγκριτικά με την αρχική παροχή σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.



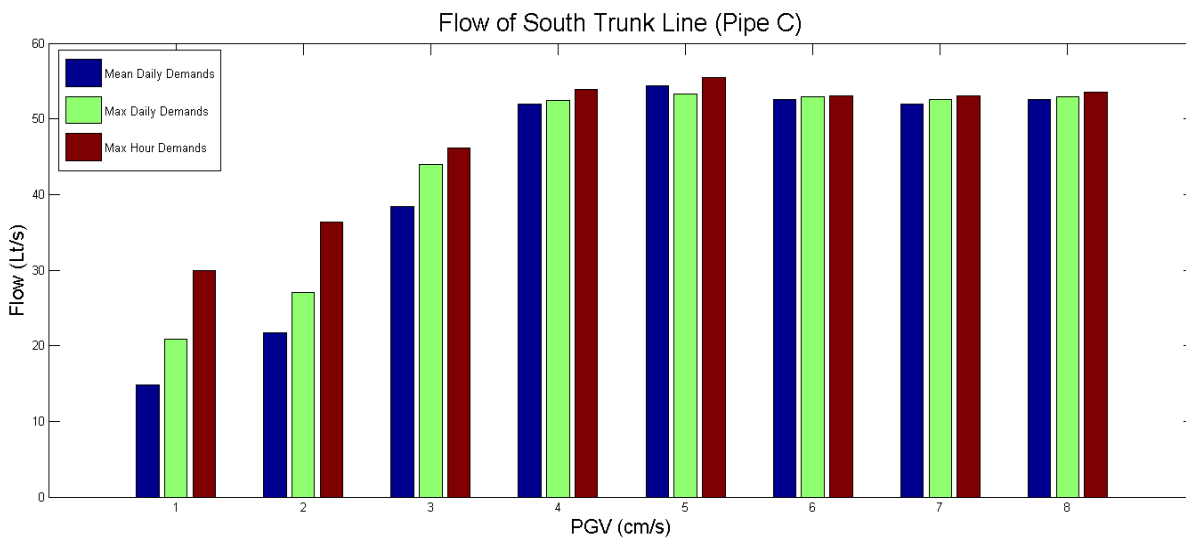
Εικόνα 128: Συνολική παροχή προς το δίκτυο.



Εικόνα 129: Μεταβολή παροχής βόρειου τροφοδοτικού αγωγού (A01).



Εικόνα 130: Μεταβολή παροχής κεντρικού τροφοδοτικού αγωγού (Αγωγός 43).



Εικόνα 131: Μεταβολή παροχής νότιου τροφοδοτικού αγωγού (Αγωγός C).

## 6.5 Λειτουργικότητα Δικτύου.

Κριτήριο για την λειτουργικότητα του δικτύου αποτελεί η πιεζομετρική γραμμή καταμήκος του δικτύου. Στην ενότητα 6.1 παρουσιάστηκαν τα ύψη πίεσης που αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο ενώ οι πιθανότητες αστοχίας στην ενότητα 6.2 αφορούν τη μεμονωμένη πιθανότητα αστοχίας για

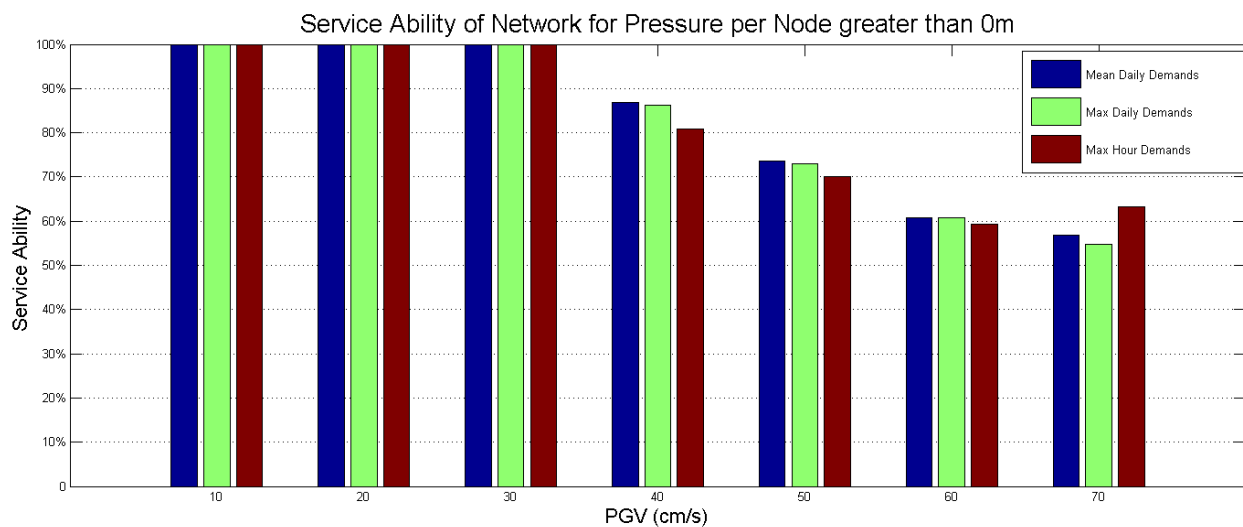
κάθε κόμβο. Προκειμένου να γίνει περιγραφή της λειτουργικότητας συνολικά του δικτύου και όχι των κόμβων μεμονωμένα εισάγεται η έννοια του όρου service ability (SA), ο οποίος ισούται με το λόγο του πλήθους των κόμβων του δικτύου που ικανοποιούν ένα όριο πίεσης προς το συνολικό πλήθος των κόμβων.

$$SA = \frac{N(P_i > x_0)}{N(P_{i0})} \quad (37)$$

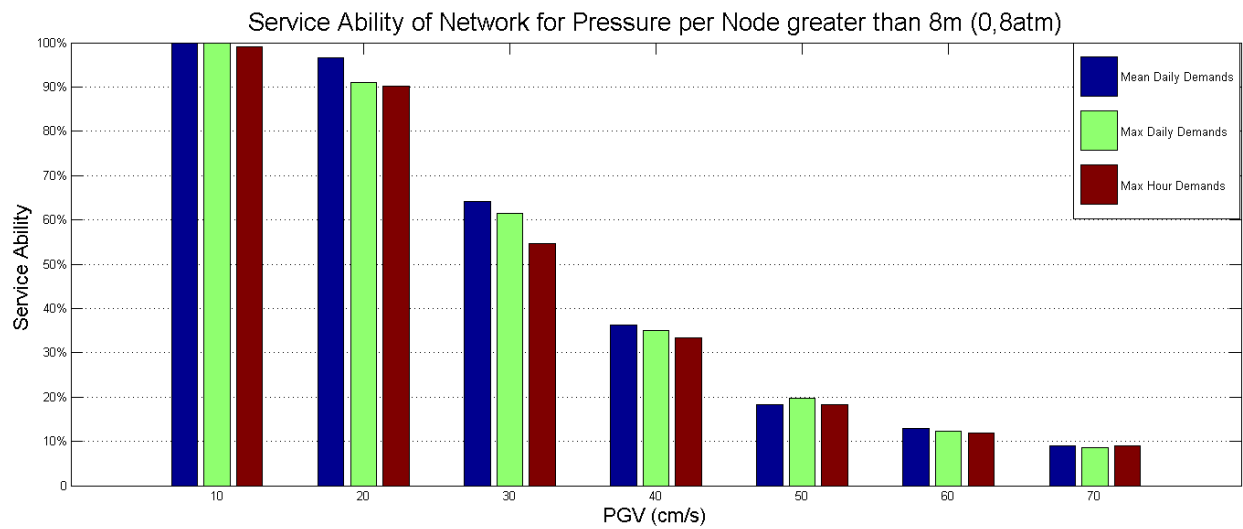
όπου  $N(P_i > x_0)$  το πλήθος των κόμβων που υπερβαίνουν μια τιμή πίεσης και  $N(P_{i0})$  ο συνολικός αριθμός κόμβων. Σε ακολουθία με τις προηγούμενες ενότητες θεωρήθηκαν τρεις τιμές ορίου, δηλαδή 0m , 8m και 15m για να διαπιστωθεί η λειτουργικότητα του δικτύου για κάθε διαβάθμιση μέγιστης εδαφικής ταχύτητας. Η ανάρτηση των διαγραμμάτων θα γίνει με δύο τρόπους, αρχικά με κριτήριο το όριο πίεσης για όλα τα σενάρια ζήτηση και στη συνέχεια με κριτήριο το σενάριο ζήτησης για όλα τα μεγέθη σεισμού προκειμένου να γίνει ευδιάκριτη η αλληλουχία και ο βαθμός επιρροής των μεγεθών.

### 6.5.1 Service Ability ανά όριο πίεσης.

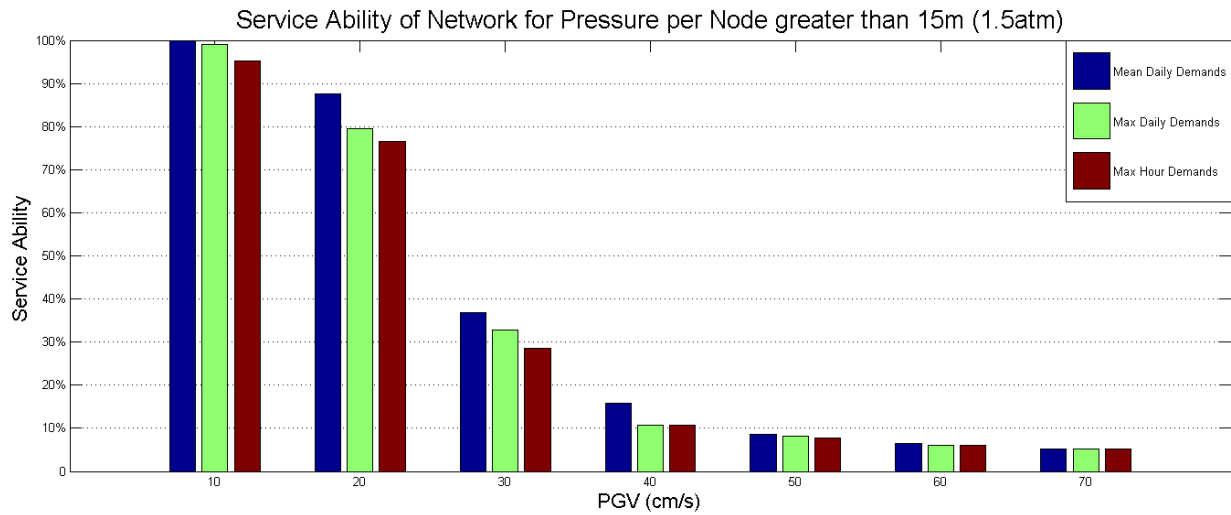
Τα παρακάτω διαγράμματα περιγράφουν το βαθμό λειτουργικότητας του δικτύου.



Εικόνα 132: Service Ability δικτύου για μηδενικό όριο πίεσης.

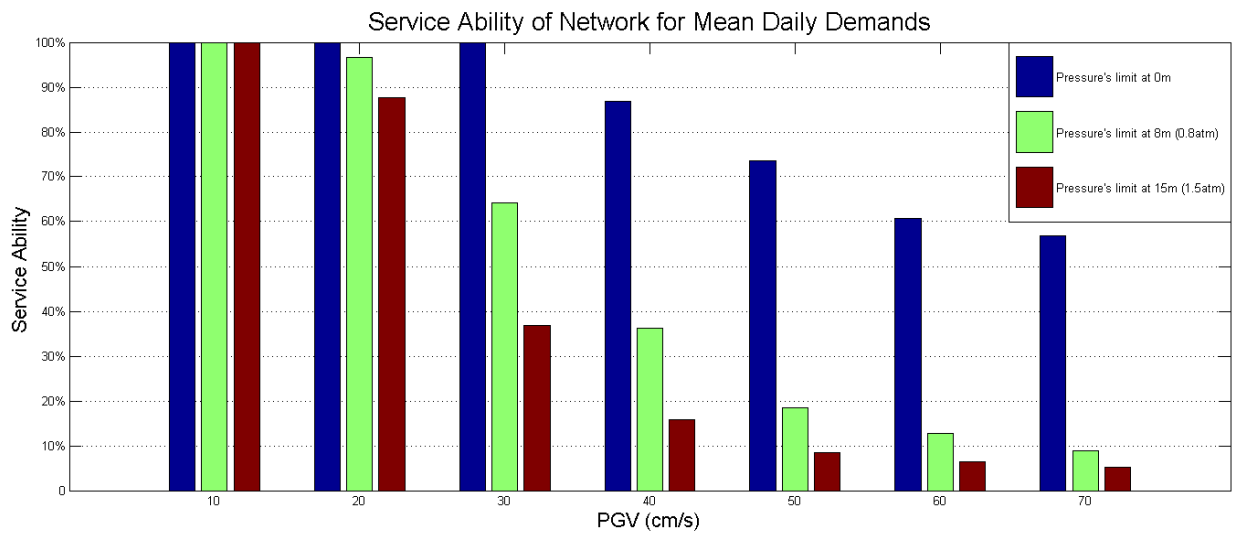


Εικόνα 133: Service Ability δικτύου για όριο πίεσης στις 0.8atm.



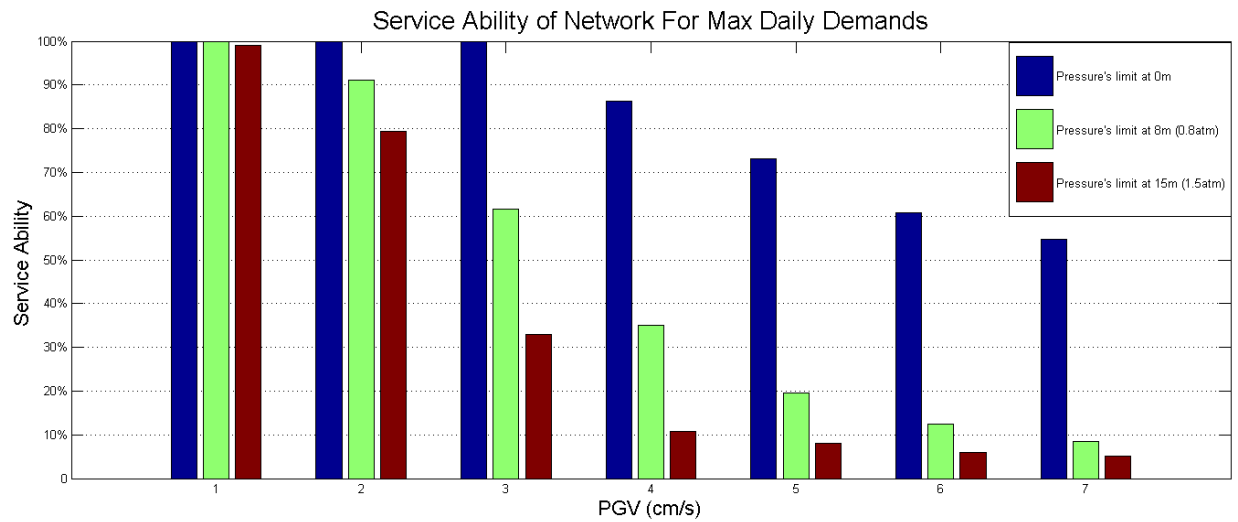
Εικόνα 134: Service Ability δικτύου για όριο πίεσης στις 1.5atm.

### 6.5.2 Service Ability ανά σενάριο ζήτησης.

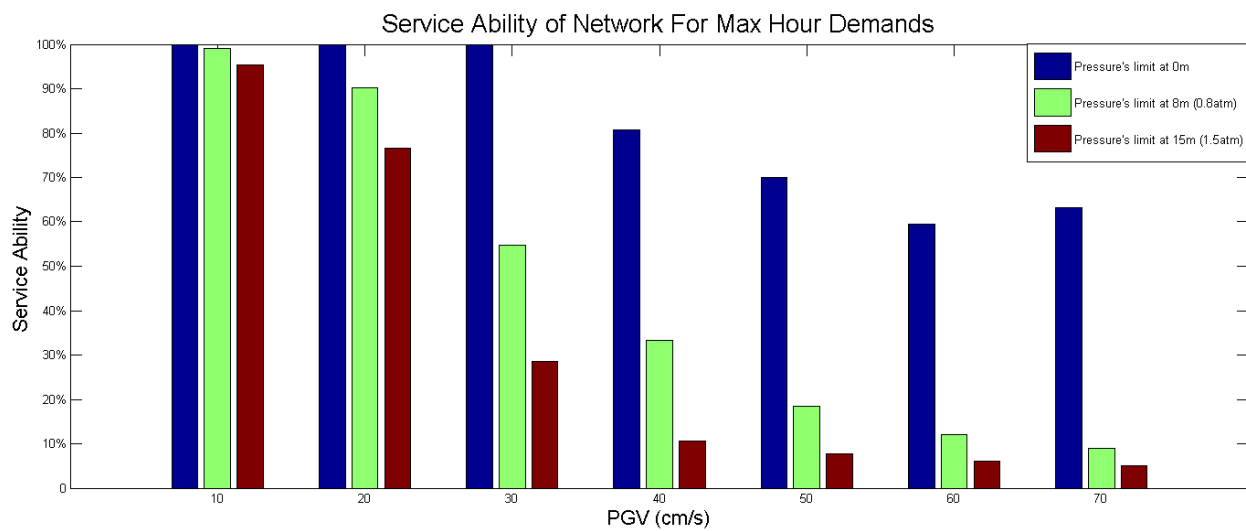


Εικόνα 135: Service Ability δικτύου για μέση ημερήσια ζήτηση.





*Εικόνα 136: Service Ability του δικτύου για μέγιστη ημερήσια ζήτηση.*



*Εικόνα 137: Service Ability του δικτύου για μέγιστη ωριαία ζήτηση.*



## 7 Συμπεράσματα

### 7.1 Αξιοπιστία δικτύου συναρτήσει πιέσεων.

Καταλυτικός παράγοντας για την άρτια λειτουργία δικτύου διανομής είναι το μέγεθος του ύψους πίεσης προκειμένου να καλύπτεται η ζήτηση για όλα τα είδη καταναλωτών σε κατάλληλη πίεση για όλα τα ύψη (πίεση 0.5-1 atm για τα υψηλότερα στόμια). Σε έκτακτες περιπτώσεις όπως η μετά-σεισμική κατάσταση του δικτύου εύλογα τα όρια που χαρακτηρίζουν την λειτουργικότητα μειώνονται. Στην περίπτωση του δικτύου της Ν. Αρτάκης θεωρήθηκε ως αποδεκτό όριο τα 8μ ύψους πίεσης δηλαδή λίγο υψηλότερο από το μισό της τιμής που ορίζεται ως αποδεκτή από τους κανονισμούς σε κανονική λειτουργία.

Οι χάρτες κατανομής πίεσης για μέση ημερήσια ζήτηση (ενότητα 6.1.1) καθιστούν φανερή την απόκριση του δικτύου για κάθε ένταση σεισμού. Η Εικόνα 38 παρουσιάζει τα ύψη πίεσης στους κόμβους του δικτύου σε κανονική λειτουργία. Η ορθή διαστασιολόγηση αποτυπώνεται στο γεγονός κάλυψης της ζήτησης για όλους τους κόμβους πληρώντας τις λειτουργικές απαιτήσεις, ενώ ταυτόχρονα διαγράφεται και η πλέον ευάλωτη περιοχή του δικτύου στο ανατολικό τμήμα της ζώνης Α και στο βόρειο τμήμα της ζώνης Β.

Για την μικρότερη κλίμακα σεισμού που μελετήθηκε, δηλαδή για μέγιστη εδαφική ταχύτητα ίση με 10cm/s, η λειτουργικότητα του δικτύου παραμένει ακέραια καθώς οι κανονισμοί τηρούνται στο έπακρον. Στα ανατολικά της περιοχής Α (κόμβοι Φ27, Φ28) παρατηρείται το μικρότερο ύψος πίεσης με διακύμανση μεταξύ των τιμών 16-20μ. Η συγκεκριμένη περιοχή όπως προαναφέρθηκε, είναι η πλέον ευαίσθητη σε βλάβες του δικτύου λόγω υψομέτρου (40μ) επομένως οι τιμές του ύψους πίεσης γίνονται απόλυτα αποδεκτές.

Προβλήματα παροχέτευσης λόγω θραύσεων των αγωγών σημειώνονται για αύξηση της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας σε 20cm/s. Το μεγαλύτερο τμήμα της ζώνης Α, πλην του παραλιακού μετώπου που τηρεί πλήρως τα όρια λειτουργίας, υποβάλλεται σε πτώση του ύψους πίεσης που οδηγεί σε προβλήματα υδροδότησης στην εν λόγω περιοχή. Ο χαμηλός συντελεστής

δόμησης της ζώνης Α (ύπαρξη κτηρίων έως δύο ορόφους) και η κυρίαρχα εποχιακή χρήση των κατοικιών δύναται να χαρακτηρίσει τα χαμηλά ύψη πίεσης στα όρια του αποδεκτού. Η αδυναμία υδροδότησης εστιάζεται κυρίως στα κεντρικά και βορειοανατολικά τμήματα της ζώνης Β όπου παρότι τα ύψη πίεσης είναι υψηλότερα συγκριτικά με τα ύψη της ζώνης Α, η παρουσία μόνιμων κατοικιών τεσσάρων ορόφων οδηγεί σε αδυναμία υδροδότησης των καταναλωτών στους υψηλούς ορόφους. Παρόλα αυτά η λειτουργία στις υπόλοιπες περιοχές του δικτύου καλύπτει τις προδιαγραφές των κανονισμών οπότε η υδραυλική συμπεριφορά για  $PGV=20\text{cm/s}$  κρίνεται ικανοποιητική.

Στέρξη της ικανότητας τροφοδότησης νερού σε μεγάλο τμήμα του οικισμού σημειώνεται για μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $30\text{cm/s}$ . Για την εν λόγω τιμή  $PGV$  η ζώνη Α σημειώνει απόλυτη αστοχία με πλήρη αδυναμία υδροδότησης. Ίδια κατάσταση επικρατεί και στο σύνολο σχεδόν της ζώνης Β με εξαίρεση τους καταναλωτές χαμηλών ορόφων στο ανατολικό τμήμα της περιοχής. Η «ζώνη αστοχίας» επεκτείνεται και στο νοτιοδυτικό τμήμα του δικτύου, ζώνη Γ, όπου πραγματοποιείται μεγάλη πτώση των υψών πίεσης που οδηγεί σε αναξιόπιστη παροχή προς τους καταναλωτές. Αδυναμία παροχέτευσης παρουσιάζεται και στην περιοχή Δ, στην οποία βρίσκονται κατοικίες τεσσάρων ορόφων όπου το ύψος πίεσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 12μ έως 16μ, χαμηλότερη δηλαδή από την προβλεπόμενη πίεση. Τέλος, η περιοχή Ε κρίνεται ότι παρουσιάζει ικανοποιητική λειτουργία εξαιτίας του προβλεπόμενου εύρους τιμών πίεσης στην πλειονότητα της ζώνης με εξαίρεση το βορειοανατολικό οικοδομικό τετράγωνο που η ύπαρξη χαμηλών κτισμάτων καθιστά το ύψος πίεσης ανεκτό.

Η λειτουργικότητα του δικτύου μειώνεται σε σημαντικό βαθμό για  $PGV=40\text{cm/s}$ , με σχεδόν κανένα τμήμα του δικτύου να παρουσιάζει ομαλή λειτουργία. Οι ζώνες Α, Β, Γ αστοχούν πλήρως ενώ η περιοχή Δ έχει την ικανότητα παροχέτευσης μόνο σε χαμηλά επίπεδα προς το έδαφος για ορισμένο τμήμα της. Η ζώνη Ε εμφανίζει ικανότητα περιορισμένης υδροδότησης για κτίσματα σε χαμηλά υψόμετρα μόνο για τους πρώτους ορόφους, ενώ αστοχούν πλήρως τα τμήματα της εν λόγω ζώνης που βρίσκονται σε ψηλότερα υψόμετρα.

Η υδραυλική ανάλυση του δικτύου για μέγιστες εδαφικές ταχύτητες 50cm/s, 60cm/s και 70cm/s φανερώνει την σταδιακή γενικευμένη αστοχία του δικτύου που καταλήγει στην πλήρη αδυναμία παροχέτευσης ακόμα και των χαμηλών ορόφων των κτισμάτων που βρίσκονται σε ευνοϊκές ζώνες ως προς την ικανότητα διατήρησης ικανοποιητικού ύψους πίεσης.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της απόκρισης του δικτύου για σταδιακή αύξηση του PGV σε συνδυασμό με το σενάριο φόρτισης μέσης ημερήσιας παροχής διαπιστώνει ότι το δίκτυο παρουσιάζει ικανοποιητική λειτουργικότητα μέχρι την εκδήλωση σεισμού με μέγιστη εδαφική ταχύτητα 30cm/s για την οποία σημαντικό τμήμα του οικισμού παροχετεύεται ομαλά. Οι περιοχές με τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις βλάβες του δικτύου είναι το κεντρικό τμήμα της ζώνης E και το ανατολικό τμήμα της ζώνης B λόγω της μορφολογίας του εδάφους και τις κοντινής σχετικής απόστασης από τους κόμβους εισροής νερού από τους τροφοδοτικούς αγωγούς προς το δίκτυο διανομής.

Η ικανοποιητική λειτουργικότητα του δικτύου μέχρι μια ορισμένη τιμή PGV διαπιστώνεται και από την υδραυλική ανάλυση των τριών σεναρίων ζήτησης για συγκεκριμένη τιμή εδαφικής ταχύτητας. Η αναμενόμενη απόκριση ενός δικτύου διανομής για υδραυλική προσομοίωση με σενάρια ζήτησης της μέσης ημερήσιας, της μέγιστης ημερήσιας και της μέγιστης ωριαίας ζήτησης παρουσιάζει σταδιακή μείωση της πιεζομετρικής γραμμής. Στο δίκτυο της N. Αρτάκης αναλύοντας τα αποτελέσματα πιέσεων των τριών σεναρίων για κάθε βήμα της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας διαπιστώνεται ότι η αναμενόμενη σημαντική μείωση των υψών πίεσης στις ευαίσθητες περιοχές αλλά και η επέκταση των ζωνών μη ομαλής υδροδότησης προς τον πληθυσμό παρουσιάζουν μεταβλητότητα ανά σενάριο μέχρι τις τιμές  $PGV=30-40\text{cm/s}$ .

Για κανονική κατάσταση λειτουργίας και για χαμηλή τιμή  $PGV=10\text{cm/s}$ , μεγάλη μεταβλητότητα των πιέσεων εντοπίζεται στην περιοχή πέριξ του δυσμενέστερου κόμβου Φ27, όπου για παράδειγμα ο κόμβος παρουσιάζει πτώση πίεσης από τα 18μ στο σενάριο μέσης ημερήσιας ζήτησης στα 6μ για την μέγιστη ωριαία ζήτηση ενώ υπάρχει και παράλληλη αύξηση της ζώνης αστοχίας. Ανάλογη μεταβλητότητα παρατηρείται ανάμεσα στα σενάρια ζήτησης για  $PGV=20$  και  $30\text{cm/s}$  όπου υπάρχει έντονη διαφοροποίηση των τιμών πιέσεων γύρω από τις περιοχές B και

Γ. Η συγκεκριμένη εύλογη υδραυλική ιδιότητα του δικτύου αμβλύνεται για τιμή  $PGV=40\text{cm/s}$  ενώ για τις μεγαλύτερες τιμές μέγιστης εδαφικής ταχύτητας που μελετήθηκαν δεν παρουσιάζεται διαφοροποίηση των πιέσεων ανά ζήτηση, στοιχείο που σηματοδοτεί και την πλήρη αδυναμία του δικτύου να παροχετεύσει τους καταναλωτές.

Τα παραπάνω συμπεράσματα για τον εντοπισμό των δυσμενέστερων περιοχών και την μεταβλητότητα του δικτύου συγκεφαλαιώνονται και επαληθεύονται από τα ιστογράμματα των κόμβων (ενότητα 6.3) και τα διαγράμματα λειτουργικότητας της μεταβλητής service ability (ενότητα 6.5)

Τα ιστογράμματα είναι γραφική απεικόνιση στατιστικών συχνοτήτων περιοχών τιμών ενός μεγέθους. Στον οριζόντιο άξονα παριστάνονται οι διακυμάνσεις του εύρους των τιμών, ενώ στον κάθετο ορίζονται οι αντίστοιχη συχνότητα εμφάνισης. Επιλέχθηκαν οι κόμβοι Φ21, Φ55, Φ106 και Φ147 που βρίσκονται περίπου στα μέσα των περιοχών Α, Β, Γ και Δ-Ε.

Το ιστογράμματα του κόμβου Φ21 και Φ55 σηματοδοτούν την ευαισθησία των περιοχών Α,Β καθώς από την τιμή  $PGV=30\text{cm/s}$  η συχνότητα των πολύ χαμηλών τιμών πίεσης (εύρος 0-5μ είναι συντριπτική. Αντίθετα ο κόμβος Φ106 που «αντιπροσωπεύει» τη ζώνη Γ, εμφανίζει μια μικρή ανθεκτικότητα για τιμές  $PGV$  έως και  $30\text{cm/s}$  ενώ η αστοχία του πραγματοποιείται για τιμές  $PGV=40\text{cm/s}$  με την εμφάνιση τιμών πίεσης μικρότερες των 5μ με συχνότητα 90%. Σε επαλήθευση των προηγούμενων συμπερασμάτων για την ανθεκτικότητα της περιοχής Δ-Ε, η αστοχία του κόμβου Φ147 εμφανίζεται για τιμές  $PGV$  μεγαλύτερες των  $40\text{cm/s}$ , όπου για  $PGV=40\text{cm/s}$  η συχνότητα εμφάνισης πιέσεων άνω των 10μ είναι κοντά στο 40%.

Έχοντας ορίσει τη λειτουργικότητα του δικτύου με την μεταβλητή Service Ability (ενότητα 6.5), τα διαγράμματα της μεταβλητής SA συμβαδίζουν με τα συμπεράσματα από τους χάρτες απεικόνισης της πίεσης. Εκτιμώντας αποδεκτό όριο τα 8μ (0,8 atm) για την έκτακτη περίπτωση σεισμού το δίκτυο εμφανίζει ικανοποιητική λειτουργικότητα μέχρι την εκδήλωση μέγιστης εδαφικής ταχύτητας  $30\text{cm/s}$  όπου  $SA=0.65$ , όπου για την ίδια  $PGV$  με το πολύ αυστηρό όριο της κανονικής λειτουργίας το service ability ισούται με 0.35 δηλαδή το 1/3 του δικτύου παροχετεύεται ομαλά. Παρατηρείται επίσης για τιμές μέγιστης εδαφικής ταχύτητας  $40\text{cm/s}$  και

άνω, η λειτουργικότητα του δικτύου και για τα τρία σενάρια ζήτησης παραμένει σχεδόν ίδια. Σε αυτή τη βάση δεν είναι παράλογο να θεωρηθεί ότι η απόκριση του δικτύου για  $PGV=40\text{cm/s}$  μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική διότι για το δυσμενέστερο σενάριο σεισμού, εκδήλωση πυρκαγιάς και μέγιστης ωριαίας αιχμής η λειτουργικότητα του δικτύου είναι 0,32 δηλαδή στο 1/3 περίπου του οικισμού υπάρχει δυνατότητα παροχέτευσης σε χαμηλά επίπεδα προς το έδαφος ενώ το 1/10 του δικτύου λειτουργεί ομαλά αφού η αντίστοιχη τιμή λειτουργικότητας για όριο στις 1,5atm ισούται με 0,10.

## 7.2 Παροχετευτικότητα αγωγών.

Η διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης της κατάστασης βλάβης του δικτύου λόγω σεισμικής δραστηριότητας είναι ένας αλγόριθμος μετατροπής του ζημιωμένου δικτύου σε ένα δίκτυο με ανεκτή παροχετευτικότητα προς τους κόμβους, εξαλείφοντας τα τμήματα εκείνα που εμφανίζουν αναξιόπιστη παροχή προς τους καταναλωτές. Η αδυναμία του λογισμικού EPANET να περιγράψει με ακρίβεια τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια στους αγωγούς οδηγεί τον αλγόριθμο στην εξάλειψη σωλήνων οι οποίοι εμφανίζουν μη ανεκτές ροές αλλά όχι μηδενικές. Εξαιτίας της συγκεκριμένης λειτουργίας, τα αποτελέσματα για την μέση παροχή των αγωγών σε κάθε διαδικασία Monte Carlo αποτελούν μια χονδρική εκτίμηση της υδραυλικής λειτουργίας αλλά όχι ένα ακριβή μέγεθος. Από την άλλη η παραδοχή για την μη-αστοχία των αγωγών τροφοδοσίας δύναται να δώσει ένα ασφαλή υπολογισμό για την συνολική παροχή από την δεξαμενή προς τον οικισμό και για την υδραυλική συμπεριφορά των κλάδων αγωγών τροφοδοσίας.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των μέσων παροχών ανά σεισμό και ανά σενάριο ζήτησης προσδίδει μια ακόμα εικόνα για την συμπεριφορά των επιμέρους τμημάτων-ζωνών του δικτύου ως προς την αξιοπιστία τους. Παρατηρείται ότι στην ομαλή λειτουργία του δικτύου, δηλαδή στην κατάσταση κανονικής λειτουργίας και για μέγιστη ταχύτητα εδάφους  $10\text{cm/s}$ , οι αγωγοί διανομής εμφανίζουν μια ομοιομορφία ως προς την ποσότητα παροχής σε όλη την έκταση του οικισμού, με τα μεγέθη να κυμαίνονται κυρίως από 0.2 μέχρι 3L/s. Η αύξηση της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας σε  $20\text{cm/s}$  όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 7.1 οδηγεί στην εμφάνιση αναξιόπιστων ροών στις περιοχές Α και Β. Η αναξιόπιστία αυτή, για το μέγεθος της παροχής

αποτυπώνεται στο γεγονός της εκκίνησης μιας σταδιακής μείωσης των παροχών στο βορειοδυτικό τμήμα του οικισμού (δηλαδή στις ζώνες Α και Β) με παράλληλη αύξηση για το τμήμα στα ανατολικά του οικισμού (ζώνες Δ και Ε) όπου εμφανίζονται ποσότητες παροχής ανώτερες των 5L/s σε τμήματα του δικτύου διανομής. Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται και στη δυσανάλογη ποσότητα παροχής που ρέει ανάμεσα στο βόρειο και στον κεντρικό κλάδο του συστήματος τροφοδοσίας.

Η τάση για τις αυξομειώσεις των παροχών ανά ζώνη γίνεται εντονότερη με την περαιτέρω αύξηση της PGV. Συγκεκριμένα για μέγιστη εδαφική ταχύτητα 30cm/s η πλειοψηφία των αγωγών στη ζώνη Α και στο βόρειο τμήμα της ζώνης Β εμφανίζουν παροχή χαμηλότερη των 2L/s ενώ την ίδια στιγμή το δίκτυο στην περιοχή Ε παρουσιάζει σε πολλούς αγωγούς παροχή μεγαλύτερη των 3L/s με ταυτόχρονη αύξηση και για τα μεγέθη του κεντρικού τροφοδοτικού αγωγού. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται και για τις μεγαλύτερες εδαφικές ταχύτητες και συμβαδίζει όπως αναμενόταν με τα συμπεράσματα της ενότητα 7.1, δηλαδή ότι οι ζώνες που εμφανίζουν αναξιόπιστη ροή ανά PGV εμφανίζουν και παράλληλη μείωση της μέσης παροχής των αγωγών μέχρι την γενικευμένη αστοχία του δικτύου για υψηλές τιμές μέγιστης εδαφικής ταχύτητας. Η συγκεκριμένη υδραυλική απόκριση του δικτύου δεν διαφοροποιείται για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και για τα υπόλοιπα σενάρια ζήτησης, όπου η αρχική ομοιομορφία στις παροχές των αγωγών, αντικαθίσταται σταδιακά με την μείωση των παροχών στα βορειοδυτικά και αύξηση στα ανατολικά μέχρι να σημειωθεί η ολική αστοχία για όλες τις ζώνες.

Η θραύση των αγωγών και η επακόλουθη απώλεια νερού προς το έδαφος οδηγεί στην αύξηση της συνολικής παροχής από τη δεξαμενή προς το δίκτυο. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν στον αγωγό «22» δηλαδή τον σύνδεσμο μεταξύ της δεξαμενής και του πιεζοθραυστικού φρεατίου παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.4.4. Παρατηρείται ότι αμέσως μετά την εκδήλωση του σεισμού και τη θραύση των αγωγών σημειώνεται αύξηση της παροχής προς το δίκτυο, η οποία μάλιστα για μεγάλες τιμές PGV είναι σχεδόν διπλάσια από το δυσμενέστερο σενάριο σχεδιασμού (μέγιστη ωριαία ζήτηση σε συνδυασμό με πυρκαγιά) οπότε αν δεν πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες απομονώσεις σε τμήματα του δικτύου είναι πιθανόν



να αστοχήσει η γενικότερη μελλοντική στρατηγική διαχείρισης της υδροδότησης λόγω έλλειψης αποθέματος νερού.

Το διάγραμμα της Εικόνα 128 επιβεβαιώνει και το συμπέρασμα για το όριο της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας. Παρατηρείται ότι το δίκτυο λειτουργεί με την αναμενόμενη υδραυλική συμπεριφορά μέχρι  $PGV=30\text{cm/s}$  όπου εύλογα η παροχή για την μέγιστη ωριαία ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παροχή για την μέγιστη ημερήσια, κοκ. Για  $PGV$  μεγαλύτερα των  $30\text{cm/s}$  οι εξερχόμενες παροχές από την δεξαμενή σχεδόν εξισώνονται ενώ δεν παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα για τις τιμές 40, 50, 60 και  $70\text{cm/s}$ .

### 7.3 Αξιολόγηση μεθοδολογίας.

Η μελέτη για την επιρροή της σεισμικής δραστηριότητα στην υδραυλική συμπεριφορά των δικτύων διανομής ύδατος αποτελεί ένα σχετικό νέο πεδίο έρευνας στην κοινότητα των μηχανικών με τις πρώτες ορθολογικές προσεγγίσεις να έχουν επιτευχθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Η έντονη αστικοποιημένη κατανομή του πληθυσμού που μεταφράζεται σε μεγάλα δίκτυα με υψηλές απαιτήσεις δίκτυα σε συνδυασμό με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην ελληνική επικράτεια εντείνουν την αναγκαιότητα μελέτης της μετά-σεισμικής υδραυλικής συμπεριφοράς των δικτύων. Η μεθοδολογία που περιγράφεται στην παρούσα εργασία δύναται να αποτελέσει ένα αρχικό εργαλείο πρόβλεψης και διαχείρισης εκτάκτων καταστάσεων υδροδότησης.

- Ο πιθανοτικός τρόπος ορισμού της κατάστασης αστοχίας των αγωγών και η ορθή ανάγνωση των αποτελεσμάτων μπορεί να αποτελέσουν πυξίδα για τη χάραξη στρατηγικής και την εκτέλεση βοηθητικών έργων προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα ελάχιστο όριο αξιοπιστίας σε κτήρια με σημαντική κοινωνική, οικονομική ή πολιτική σημασία όπως δύναται να είναι νοσοκομεία ή μονάδες παραγωγής ενέργειας, όπου η λειτουργία τους πρέπει να εξασφαλίζεται ανεμπόδιστα ακόμα και στα δυσμενέστερα σενάρια.

- Σε δεύτερο στάδιο, τα αποτελέσματα που παρέχονται αποτυπώνουν ποιες περιοχές του δικτύου παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία ή αντοχή ως προς την αξιοπιστία τους για παροχέτευση. Η συγκεκριμένη γνώση δύναται να αποτελέσει είτε αρχικό κριτήριο ως προς τη δομή του δικτύου για τον αρχικό σχεδιασμό είτε να προβλεφθούν έργα ενίσχυσης για να εξασφαλισθεί κάποια ελάχιστη παροχέτευση προς όλες τις περιοχές του δικτύου. Βοηθητικό εργαλείο για τη διαχείριση της έκτακτης κατάστασης ενδέχεται να φάνει και η ορθή εκτίμηση για τους πιθανότερους και κρισιμότερους αγωγούς που έχουν υποστεί θραύση προκειμένου τα συνεργεία να κινηθούν για άμεση απομόνωση μειώνοντας της απώλειες ύδατος και τις υδραυλικές επιπτώσεις για το δίκτυο.
- Σημαντικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας δύναται να προκύψουν ως προς εναλλακτικούς τρόπους πυρόσβεσης για έκτακτες ανάγκες. Η ενδεχόμενη αδυναμία του δικτύου να υποστηρίξει με αξιόπιστη πίεση πυροσβεστικούς κρουούς σε όλη την έκταση του δικτύου, οξύνει την ανάγκη να υπάρχει σχέδιο Β για την αντιμετώπιση πυρκαγιάς σε στρατηγικά σημεία διαστασιολογώντας π.χ πλωτά μέσα πυρόσβεσης.

Προϋπόθεση για την δημιουργία ενός ορθολογικού τρόπου αντιμετώπισης αστοχίας του δικτύου μετά από σεισμική δραστηριότητα είναι η ορθή μοντελοποίηση και ανάλυση της συγκεκριμένης κατάστασης. Η πραγματοποίηση αυτού απαιτεί και την πλήρη καταγραφή του ιστορικού θραύσεων του δικτύου προκειμένου να γίνει ορθότερη εκτίμηση της συμπεριφοράς μεμονωμένα των αγωγών αλλά και της συνολικής απόκρισης του δικτύου.



## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. GIRAFFE USER'S MANUAL, Version 4.2, Cornell University School of Civil & Environmental Engineering Ithaca, NY , January 2008.
2. Peixin Shi, Thomas D.O'Rourke, Seismic Response Modeling of Water Supply Systems, Technical Report MCEER-08-0016, May 5, 2008
3. Won-Hee Kang, Young-Joo Lee, Chunwei Zhang, Computer-Aided Analysis of Flow in Water Pipe Networks after a Seismic Event,
4. Ευστρατιάδης, Α, Κουτσογιάννης, Δ. «Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος: Τυπικά υδραυλικά έργα». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων. Ακαδημαϊκό έτος 2005-06.
5. Ευστρατιάδης, Α., Σακελλαράκης, Γ, Βλαγκούλης, Β. “Βέλτιστος σχεδιασμός εσωτερικού δικτύου ύδρευσης του δήμου Νέας Αρτάκης”, 2008
6. Κουτσογιάννης, Δ.,Ευστρατιάδης Α., Σημειώσεις Αστικών Υδραυλικών Έργων – Υδρευτικά Έργα, 83 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015
7. Σιδηρόπουλος Π., Σχεδιασμός και ανάλυση δικτύου διανομής- Υδραυλικές αρχές – Υδραυλικός υπολογισμός ακτινωτών δικτύων. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ, ???
8. Παπανικολάου, Π.Ν. «ΤΙΤΛΟΣ» Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Υδραυλικής ΕΜΠ, Αθήνα 2017
9. Παπανικολάου, Π.Ν. Στοιχεία Μόνιμης Ροής Σε Αγωγούς Υπό Πίεση & Αγωγούς Με Ελεύθερη Επιφάνεια, Οκτώβριος 2014
10. Τεχνικές Οδηγίες ΤΕΕ (ΤΟΤΕΕ) 2411/86, Εγκαταστάσεις σε κτίρια και οικόπεδα. Διανομή κρύου – ζεστού νερού. ΦΕΚ 843B/16-11-88. Δ' έκδοση.
11. Τριαντάφυλλος Κατσαρέλης, Εφαρμοσμένη Υδραυλική – Μέθοδοι Και Εφαρμογές Υπολογισμού, Ροή Υπό Πίεση, Αθήνα Φεβρουάριος 2014
12. Τριαντάφυλλος Κατσαρέλης. Μηχανική των ρευστών – Μέθοδοι και Εφαρμογές Υπολογισμού, Αθήνα Μάιος 2011
13. Christodoulou E, Fragiadakis M, Urban Water Distribution Networks Assessing Systems Vulnerabilitites, Failures, and Risks