



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Ανάλυση υδραυλικού δικτύου υπό πίεση με χρήση τεχνολογίας ψηφιακών διδύμων

Διπλωματική Εργασία

Διονυσία Μπόβολου

Τριμελής Επιτροπή

Γεώργιος Σταυρουλάκης, Καθηγητής(Επιβλέπων)

Γεώργιος Αραμπατζής, Αναπλ. Καθηγητής

Παναγιώτης Αλευράς, Επίκ. Καθηγητής

Χανιά, Νοέμβριος 2022

Copyright © Μπόβολου Διονυσία, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της προπτυχιακής αυτής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του καθηγητή μου Κου Γεωργίου Σταυρουλάκη τον οποίο ευχαριστώ για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια του πονήματός μου. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Παναγιώτη Κουτσιανίτη για τις ιδέες του που υπήρξαν έναυσμα για την εύρεση του θέματος και την υλοποίηση της εργασίας. Ένα ευχαριστώ οφείλω και στους μηχανικούς της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Νερού Αποσελέμη κ. Στέλιο Γυπαράκη και κ. Μιχαήλ Μανιό τόσο για τα δεδομένα του δικτύου που χρησιμοποίησα για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, όσο και για τη βοήθειά τους σε όποιες απορίες είχα σχετικά με το δίκτυο. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την οικονομική και ηθική τους υποστήριξη, καθώς και τους συγγενείς και τους φίλους για την εμπύχυσή τους σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Περίληψη

Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα ψηφιακό αντίγραφο ενός φυσικού αντικειμένου ή συστήματος. Το εικονικό μοντέλο ενός συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του στον πραγματικό κόσμο, τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του και την δημιουργία νέων δυνατοτήτων. Τα ψηφιακά δίδυμα βρίσκουν εφαρμογή σε ποικιλία βιομηχανιών για τη δημιουργία εξυπνότερων, πιο αποδοτικών συστημάτων. Στη βιομηχανία παροχής νερού, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται ψηφιακά δίδυμα για την ανάλυση των συστημάτων διανομής και τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων πριν αυτά εμφανιστούν. Αυτό βοηθά τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να αποφεύγουν δαπανηρές επισκευές και να βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών τους. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων σε τέτοιους κλάδους μπορεί να οδηγήσει σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον και βελτιωμένη διαχείριση των πόρων.

Στην παρούσα εργασία δημιουργείται το ψηφιακό δίδυμο για το δίκτυο υδροδότησης από το φράγμα Αποσελέμη προς το Ηράκλειο. Συγκεκριμένα, για την ψηφιακή απεικόνιση χρησιμοποιείται το EPANET, ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα ελεύθερα διαθέσιμο. Στο πρόγραμμα αυτό γίνεται και η ανάλυση με την βοήθεια μετρήσεων που έχουν αντληθεί από το πραγματικό δίκτυο. Στόχος της μελέτης είναι να αποτυπωθεί το δίκτυο στο EPANET και το εικονικό δίκτυο να λειτουργεί όπως το πραγματικό. Πραγματοποιούνται, επίσης, ορισμένα παραδείγματα αναλύσεων για να γίνει κατανοητή η αποτύπωση των αποτελεσμάτων. Μέσα από τα παραδείγματα διερευνάται εάν είναι εφικτό να εντοπιστούν σημεία με μεγάλη πίεση ή έντονες μεταβολές της πίεσης στο δίκτυο. Κατ' επέκταση σκοπός είναι να γίνεται πρόβλεψη των πιέσεων σε μη προσβάσιμα σημεία, της κόπωσης του υλικού και να υποστηρίζεται η προληπτική συντήρηση.

Abstract

A digital twin is a digital replica of a physical object or system. The virtual model of a system can be used to simulate its real-world behavior, optimize performance and enable new capabilities. Digital twins apply in a variety of industries to create smarter, more efficient systems. In the water supply industry, for example, digital twins are being utilized in order to analyze distribution systems and identify potential problems before they occur. This helps utilities avoid costly repairs and improve the efficiency of their operations. The inclusion of digital twins technology in these fields may result in a more sustainable future and improved management of resources.

In this thesis, the digital twin for the water distribution network from the Aposelemi dam to Heraklion is created. In particular, EPANET, a freely available open source software, is used for digital modeling. The analysis is also conducted in this program using data taken from the actual network. The goal of the study is to model the network on EPANET and make the virtual network function like the original. Analysis examples are also conducted to make the results clear. Through the examples, it is investigated whether it is possible to identify parts with high pressure or intense pressure changes in the network. By extension, the purpose is to predict the pressures in inaccessible places, the fatigue of the material and to support preventive maintenance.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	2
Abstract.....	3
Περιεχόμενα.....	4
Περιεχόμενα Εικόνων	5
Περιεχόμενα Πινάκων	6
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων.....	6
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	7
1.1 Industry 4.0 - Ψηφιακά Δίδυμα	7
1.2 Δίκτυο Ύδρευσης Ηρακλείου από το Φράγμα Αποσελέμη	10
1.3 Λογισμικό EPANET	13
Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση	15
2.1 Σχέδια του δικτύου	15
2.2 Δομικά και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά του Δικτύου	18
2.3 Αποτύπωση Αγωγού στο EPANET.....	20
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση Δικτύου	23
3.1 Δεδομένα Μετρήσεων στα ΣΜΕ.....	23
3.2 Βάσεις του Υπολογισμού, Αλγόριθμοι και Παραδοχές	24
3.2.1 Μοντέλο Σταθερής Ζήτησης.....	25
3.2.2 Επίλυση γραμμικών εξισώσεων.....	28
3.3.3 Αρχικές Ροές.....	29
3.3.4 Συντελεστής Μικρών Απωλειών	29
3.3.5 Ανάλυση Εκτεταμένης Χρονικής Περιόδου	29
3.3 Δημιουργία και Ανάθεση Pattern.....	30
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Ανάλυσης.....	34
4.1 Αποτελέσματα για έναν κόμβο.....	34
4.2 Αποτελέσματα για όλο το δίκτυο	36
4.3 Αποτελέσματα για περισσότερους κόμβους σε κοινό διάγραμμα	39
Κεφάλαιο 5: Σύνοψη και Συμπεράσματα	44
Πηγές εικόνων	46
Βιβλιογραφία-Δικτυογραφία	48

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Ψηφιακό δίδυμο κινητήρα[1]	8
Εικόνα 2: Digital twin βιομηχανικής μονάδας[2].....	9
Εικόνα 3: Χάρτης Δικτύου Ύδρευσης από το Φράγμα Αποσελέμη προς το Ηράκλειο[3]	10
Εικόνα 4: Φράγμα Αποσελέμη[4].....	10
Εικόνα 5: Δεξαμενές Κροκίδωσης - Καθίζησης του νερού[5]	11
Εικόνα 6: Δύλιση με φίλτρα χαλαζιακής άμμου[5].....	11
Εικόνα 7: Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού[6]	12
Εικόνα 8: Κτήρια ΕΕΝ Αποσελέμη[7]	12
Εικόνα 9: Εργαλεία Σχεδίασης στο EPANET[8]	13
Εικόνα 10: Αποτύπωση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης στο EPANET με χρωματικά κωδικοποιημένους χάρτες δικτύου[9].....	14
Εικόνα 11: Σχέδιο Αγωγού του Δικτύου σε pdf (pdf 7_21)[10].....	15
Εικόνα 12: Οριζοντιογραφία του Αγωγού[10]	15
Εικόνα 13: Υπόμνημα Οριζοντιογραφίας[10]	16
Εικόνα 14: Διάγραμμα Μηκοτομής[10]	16
Εικόνα 15: Πληροφορίες Μηκοτομής[10].....	17
Εικόνα 16: Υπόμνημα Μηκοτομής[10]	17
Εικόνα 17: Δίκτυο με σημειώσεις για διακλαδώσεις και διαμέτρους[11].....	20
Εικόνα 18: Κύριος Αγωγός στο AutoCAD.....	20
Εικόνα 19: Κύριος Αγωγός και Διακλαδώσεις στο WaterCAD	21
Εικόνα 20: Αναπαράσταση κόμβων στο WaterCAD	21
Εικόνα 21: Τελικό δίκτυο υπό μελέτη στο EPANET	22
Εικόνα 22: Δεδομένα του SCADA, μετρήσεις παροχής στα Σ.Μ.Ε.[10]	23
Εικόνα 23: Παράδειγμα Pattern Σ.Μ.Ε.1 αρχείο SME 1.pat	30
Εικόνα 24: Pattern για όλους τους κόμβους στο excel	31

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Αντιστοιχία Κόμβων με την θέση τους στο δίκτυο	24
Πίνακας 3: Τύποι για τον υπολογισμό του Headloss.....	26
Πίνακας 2: Αντιστοιχία αρχείων PAT με Σ.Μ.Ε. και pattern στο EPANET.....	31

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Ζήτηση (m^3/h) ως προς τον χρόνο (min) με βάση τα δεδομένα του excel.....	32
Διάγραμμα 2: Ζήτηση (L/s) ως προς τον χρόνο (min) με βάση τα δεδομένα του excel	32
Διάγραμμα 3: Ζήτηση (L/s) ως προς τον χρόνο (min) με βάση την ανάλυση του δικτύου στο EPANET	33
Διάγραμμα 4: Πίεση στον κόμβο M2A ως προς τον χρόνο, ανάλυση 24 ωρών	34
Διάγραμμα 5: Πίεση στον κόμβο M2A ως προς τον χρόνο, ανάλυση από τις 24 έως τις 48 ώρες.....	35
Διάγραμμα 6: Πίεση στον κόμβο M2A ως προς τον χρόνο, ανάλυση από τις 12 έως τις 36 ώρες.....	35
Διάγραμμα 7: Πίεση σε όλο το δίκτυο για την χρονική στιγμή 0:00	36
Διάγραμμα 8: Πίεση για όλο το δίκτυο την χρονική στιγμή 12:00 Hrs	37
Διάγραμμα 9: Πίεση για όλο το δίκτυο την χρονική στιγμή 48:00 Hrs	37
Διάγραμμα 10: Πίεση για όλο το δίκτυο την χρονική στιγμή 415:00 Hrs	38
Διάγραμμα 11: Πίεση για όλο το δίκτυο την χρονική στιγμή 720:00 Hrs	38
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M1,M2,M2A ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 720 ωρών (ενός μήνα)	39
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M1,M2,M2A ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 24 ωρών	40
Διάγραμμα 14: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M3,M4,M5 ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 720 ωρών.....	40
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M3,M4,M5 ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 24 ωρών.....	41
Διάγραμμα 16: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M7,M8,M10 και M11 ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 24 ωρών.....	42
Διάγραμμα 17: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M7,M8,M10 και M11 ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 24 ωρών.....	42

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Industry 4.0 - Ψηφιακά Δίδυμα

Η 4^η Βιομηχανική Επανάσταση (Industry 4.0) είναι η τρέχουσα τάση για αυτοματοποίηση και ανταλλαγή δεδομένων στις τεχνολογίες παραγωγής. Σκοπός της είναι η αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο οι εταιρείες κατασκευάζουν, βελτιώνουν και διανέμουν τα προϊόντα τους. Οι τεχνολογίες από τις οποίες απαρτίζεται είναι:

- Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things)

Είναι πολύ σημαντικό για την λειτουργία των έξυπνων εργοστασίων, όπου τα μηχανήματα φέρουν αισθητήρες. Οι αισθητήρες διαθέτουν μια διεύθυνση IP η οποία επιτρέπει στα μηχανήματα να συνδέονται με άλλες συσκευές με δυνατότητα web. Με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτή η μαζική συλλογή, ανάλυση και ανταλλαγή πολύτιμων δεδομένων.

- Cloud computing

Η στρατηγική της Industry 4.0 βασίζεται στο cloud computing. Συγκεκριμένα, για να πραγματοποιηθεί μία «έξυπνη κατασκευή» χρειάζεται να συνεργαστούν και να ενοποιηθούν οι κλάδοι της μηχανικής, της αλυσίδας εφοδιασμού, της παραγωγής, των πωλήσεων, της διανομής και των υπηρεσιών. Η παραπάνω συνεργασία επιτυγχάνεται μέσω cloud, όπου αποθηκεύονται και επεξεργάζονται τα δεδομένα.

- Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) και μηχανική μάθηση

Μέσω της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης οι εταιρείες αξιοποιούν στο έπακρο τον όγκο των πληροφοριών που παράγονται στο εργοστάσιο, στις επιχειρηματικές μονάδες των εταιρειών, από συνεργάτες και άλλες πηγές. Για παράδειγμα, στην βιομηχανία οι μηχανές φθείρονται και χαλαρώνουν κατά τη διαδικασία παραγωγής. Από τις πληροφορίες που παρέχουν η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση είναι δυνατή η έγκαιρη και εκ των προτέρων συντήρηση των μηχανημάτων που οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο ζωής και καλύτερη απόδοση.

- Edge Computing

Πολλές φορές χρειάζεται οι αναλύσεις των δεδομένων να γίνονται «on edge», δηλαδή εκεί που δημιουργούνται τα δεδομένα, προκειμένου οι εργασίες παραγωγής να ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο. Με το edge computing μειώνονται οι κίνδυνοι

ασφάλειας, όπως στην περίπτωση που πρέπει να ανιχνευθεί ένα ζήτημα ασφάλειας ή ποιότητας σε μία γραμμή παραγωγής.

- Κυβερνοασφάλεια (Cybersecurity)

Η συνδεσιμότητα του λειτουργικού εξοπλισμού σε ένα εργοστάσιο ή τομέα (OT) επιφέρει αποδοτικότερες διαδικασίες παραγωγής, αλλά αφήνει το σύστημα εκτεθειμένο σε κακόβουλες επιθέσεις και κακόβουλο λογισμικό. Για τον λόγο αυτό μία εταιρία που βρίσκεται σε μετάβαση προς Industry 4.0, είναι απαραίτητο να αξιοποιεί τεχνολογία cybersecurity

- Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin, DT)

Το ψηφιακό δίδυμο (ομοιότυπο) ορίζεται ως ένα εικονικό αντίγραφο μιας διαδικασίας, γραμμής παραγωγής, εργοστασίου ή αλυσίδας εφοδιασμού. Χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει ένα αρχικό σύστημα σε πραγματικό χρόνο και συνδέεται με αυτό μέσω αληθινών δεδομένων που λαμβάνονται από αισθητήρες. [16][17]



Εικόνα 1: Ψηφιακό δίδυμο κινητήρα[1]

Σύμφωνα με έναν πρόσφατο ορισμό του ψηφιακού δίδυμου: «Ως ψηφιακό δίδυμο μπορεί να οριστεί η αναπαράσταση ενός φυσικού μοντέλου σε ψηφιακή μορφή και έχει την δυνατότητα να είναι προσαρμοστικό και κατ' επέκταση να παρέχει αξιόπιστες λύσεις σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για να βοηθήσει τους μηχανικούς να καταλάβουν τι συμβαίνει στο φυσικό μοντέλο το οποίο μπορεί να είναι μία κατασκευή, ένας Η/Μ εξοπλισμός ή ακόμα και μία ολόκληρη υποδομή. Η συγκέντρωση όλων των δεδομένων που αφορούν τον σχεδιασμό και την λειτουργία μίας κατασκευής αποτελούν ένα ψηφιακό δίδυμο. Σύμφωνα με την αρχή Gemini το ψηφιακό δίδυμο είναι η ψηφιακή αναπαράσταση ενός στοιχείου, μίας διαδικασίας ή ενός συστήματος στο φυσικό του περιβάλλον.» Centre of Digital Built Britain, The Gemini Principles, 2018 [18][19]



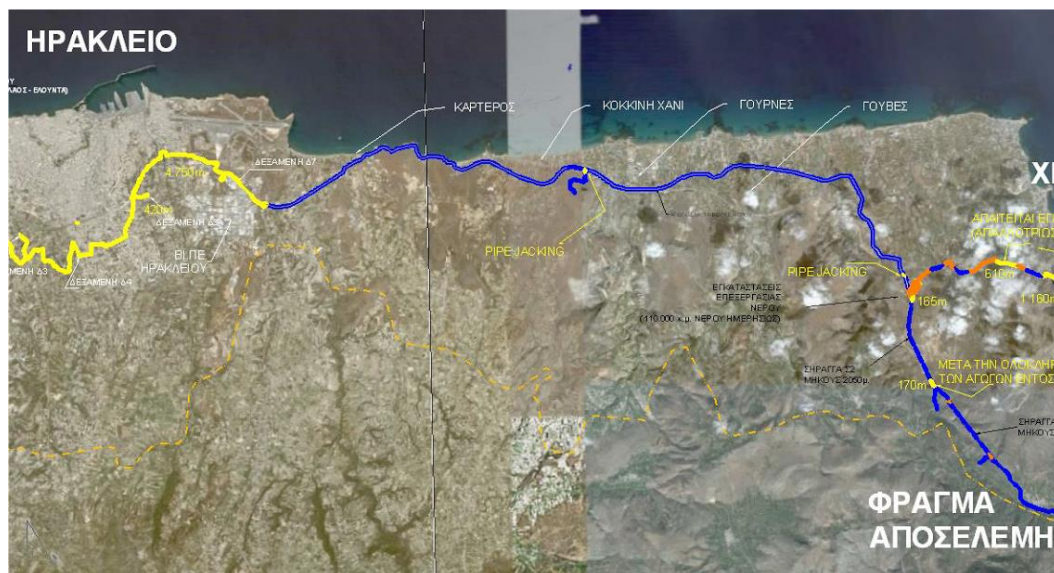
Εικόνα 2: Digital twin βιομηχανικής μονάδας[2]

Σκοπός των ψηφιακών διδύμων είναι η προσομοίωση, πρόβλεψη και βελτιστοποίηση ενός προϊόντος ή συστήματος παραγωγής. Βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων είναι ότι επιταχύνει την αξιολόγηση κινδύνων και τον χρόνο παραγωγής. Επίσης, μέσω της χρήσης ψηφιακών διδύμων γίνεται απομακρυσμένος έλεγχος σε πραγματικό χρόνο και πρόβλεψη της συντήρησης για τον προϊόν ή το σύστημα. Σαν απόρροια των παραπάνω προωθείται η καλύτερη συνεργασία μεταξύ των μελών που συμμετέχουν για την παραγωγή ή την λειτουργία του συστήματος και λαμβάνονται αποδοτικότερες οικονομικές αποφάσεις με βάση πραγματικά δεδομένα και σενάρια που υλοποιούνται και δοκιμάζονται πάνω στο ψηφιακό μοντέλο.

Γενικά τα ψηφιακά δίδυμα βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα τομέων όπως η μηχανολογία και οι υποδομές. Η εφαρμογή ψηφιακών διδύμων σε υδραυλικά δίκτυα οδηγεί στον σχεδιασμό, την κατασκευή και την λειτουργία εξυπνότερων δικτύων ύδρευσης. Ακόμη, παρέχει ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα που βοηθούν στην πρόβλεψη φθορών και την δρομολόγηση έγκαιρης συντήρησης. Για παράδειγμα, η εταιρεία Bentley Systems αξιοποίησε τα προγράμματά της OpenFlows και OpenUtilities για να φτιάξει το ψηφιακό δίδυμο του δικτύου ύδρευσης του Ζάγκρεμπ στην Κροατία, ένα από τα παλιότερα δίκτυα ύδρευσης στον κόσμο. Το αποτέλεσμα ήταν καλύτερη διαχείριση του δικτύου και μείωση των απωλειών του που είχαν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, ειδικά μετά τους σεισμούς το 2020. [22] Η παρούσα εργασία αξιοποιεί την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ενός υδραυλικού δικτύου υπό πίεση. Το προς ανάλυση δίκτυο είναι κομμάτι του δικτύου το οποίο ξεκινά από το φράγμα Αποσελέμη και καταλήγει στην πόλη του Ηρακλείου.

1.2 Δίκτυο Ύδρευσης Ηρακλείου από το Φράγμα Αποσελέμη

Είναι γνωστό πως πριν κάποια χρόνια παρουσιάστηκε η ανάγκη να φτιαχτεί ένα φράγμα στα ανατολικά της Κρήτης για να καλύψει τις ανάγκες σε νερό του Ηρακλείου και του Αγίου Νικολάου. Για τον σκοπό αυτό στις 24.10.2006 υπογράφηκε μία σύμβαση με τίτλο έργου «Ύδρευση Ηρακλείου – Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη – Εργασίες εκτροπής μεταφοράς υδάτων και κατασκευής αγωγών και διωλιστηρίων». Η κατασκευή του φράγματος Αποσελέμη ολοκληρώθηκε το 2012 και βρίσκεται 1.2km νοτιοδυτικά από τις Ποταμιές Ηρακλείου, συνολικά 30km ανατολικά του Ηρακλείου. Το δίκτυο άρχισε να λειτουργεί το 2015 και από τότε το φράγμα καλύπτει μέρος των αναγκών ύδρευσης των υδροδοτούμενων πόλεων του Ηρακλείου, της Χερσονήσου και του Αγ. Νικολάου.



Εικόνα 3: Χάρτης Δικτύου Ύδρευσης από το Φράγμα Αποσελέμη προς το Ηράκλειο[3]



Εικόνα 4: Φράγμα Αποσελέμη[4]

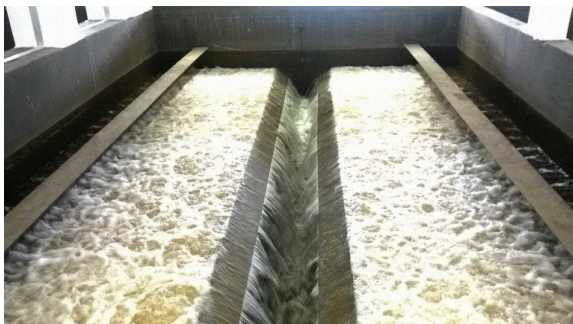
Το έργο περιλαμβάνει:

- Αγωγό μεταφοράς νερού από το Φράγμα έως την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού (EEN)
- Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού (EEN)
- Υδραγωγείο από την EEN μέχρι το Ηράκλειο
- Υδραγωγείο από την EEN μέχρι τον Άγιο Νικόλαο

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετάται και αναλύεται το κομμάτι του δικτύου από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού (EEN) προς το Ηράκλειο. Αρχικά, η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού (EEN) βρίσκεται νότια του Βορείου Οδικού Άξονα Κρήτης (ΒΟΑΚ), σε υψόμετρο 160m και τροφοδοτείται με νερό από το Φράγμα Αποσελέμη. Η εγκατάσταση έχει δυναμικότητα 110.600 m³ νερό την ημέρα, στεγάζει ένα σύγχρονο εργαστήριο φυσικοχημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων για τον έλεγχο ποιότητας του παραγόμενου νερού σε όλα τα στάδια επεξεργασίας του και πραγματοποιεί εργασίες όπως η οζόνωση, κροκιδοκαθίζηση, διήθηση μέσω κλινών άμμου και χλωρίωση του νερού. [24][26]



Εικόνα 5: Δεξαμενές Κροκίδωσης - Καθίζησης του νερού[5]



Εικόνα 6: Διύλιση με φίλτρα χαλαζιακής άμμου[5]

Περιλαμβάνει δύο υδραγωγεία που ξεκινούν από τη δεξαμενή καθαρού νερού χωρητικότητας 22.500 m^3 που υπάρχει δίπλα στην εγκατάσταση. Επίσης, από το Υδραγωγείο ξεκινά ο κύριος αγωγός που καταλήγει σε δεξαμενές της ΔΕΥΑ Ηρακλείου στον Αγ. Ιωάννη και τις Μεσαμπελίες. Το νερό εισάγεται από την τελική δεξαμενή καθαρού νερού των διυλιστηρίων σε υψόμετρο 165 m και η ροή μέσα στον αγωγό εξασφαλίζεται από την υδροστατική πίεση που έχει το νερό από τις υψομετρικές διαφορές του δικτύου. [26][27]



Εικόνα 7: Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού[6]



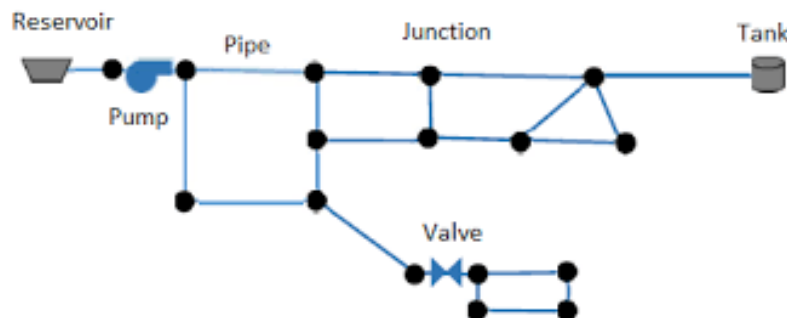
Εικόνα 8: Κτήρια ΕΕΝ Αποσελέμη[7]

1.3 Λογισμικό EPANET



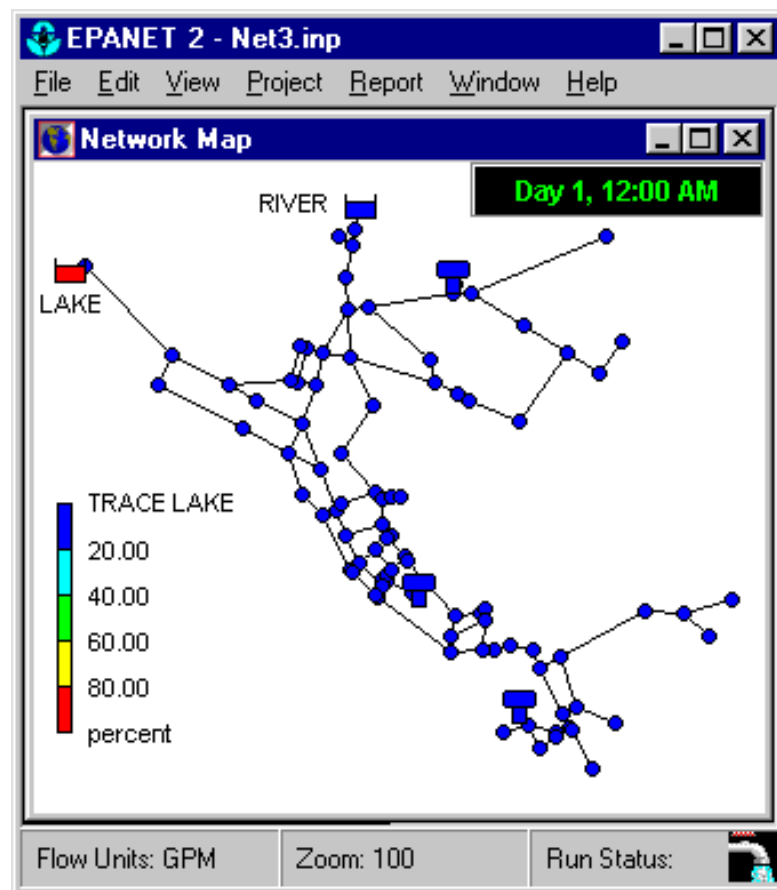
Το EPANET είναι το πρόγραμμα που επιλέχθηκε για να γίνει η μοντελοποίηση και ανάλυση του δικτύου. Αποτελεί ένα διαδεδωμένο λογισμικό ανοιχτού κώδικα που μπορεί να αντιγραφεί και να διανεμηθεί ελεύθερα. Η ανάπτυξή του είναι διαρκής όπως και οι διορθώσεις σφαλμάτων, ενώ πληροφορίες για την χρήση του είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο. Πολλοί μηχανικοί και οι σύμβουλοι χρησιμοποιούν το EPANET για να σχεδιάσουν πιθανά καινούρια υδραυλικά δίκτυα, να βελτιώσουν υπάρχουσες παλιές υποδομές, να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία δεξαμενών και αντλιών, να μειώσουν τη χρήση ενέργειας, να διερευνήσουν προβλήματα ποιότητας ή μόλυνσης του νερού και να προετοιμαστούν για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης από απειλές ασφαλείας μέχρι φυσικές καταστροφές.

Ανάμεσα στις δυνατότητες του προγράμματος είναι η προσομοίωση της υδραυλικής συμπεριφοράς και της ποιότητας του νερού σε δίκτυα σωλήνων υπό πίεση στιγμιαία ή και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Τα δίκτυα μπορεί να περιλαμβάνουν σωλήνες, κόμβους (διασταυρώσεις), αντλίες, βάνες, δεξαμενές και άλλες δομές όπως φαίνεται στην εικόνα 9.



Εικόνα 9: Εργαλεία Σχεδίασης στο EPANET[8]

Οι αναλύσεις προσφέρουν δεδομένα για την παρακολούθηση της ροής του νερού στους σωλήνες, της πίεσης στους κόμβους και του ύψους του νερού σε κάθε δεξαμενή. Μάλιστα, τα αποτελέσματα αποτυπώνονται με χρωματικά κωδικοποιημένους χάρτες δικτύου όπως στην εικόνα 10, πίνακες δεδομένων και γραφήματα για την καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία τους.



Εικόνα 10: Αποτύπωση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης στο EPANET με χρωματικά κωδικοποιημένους χάρτες δικτύου[9]

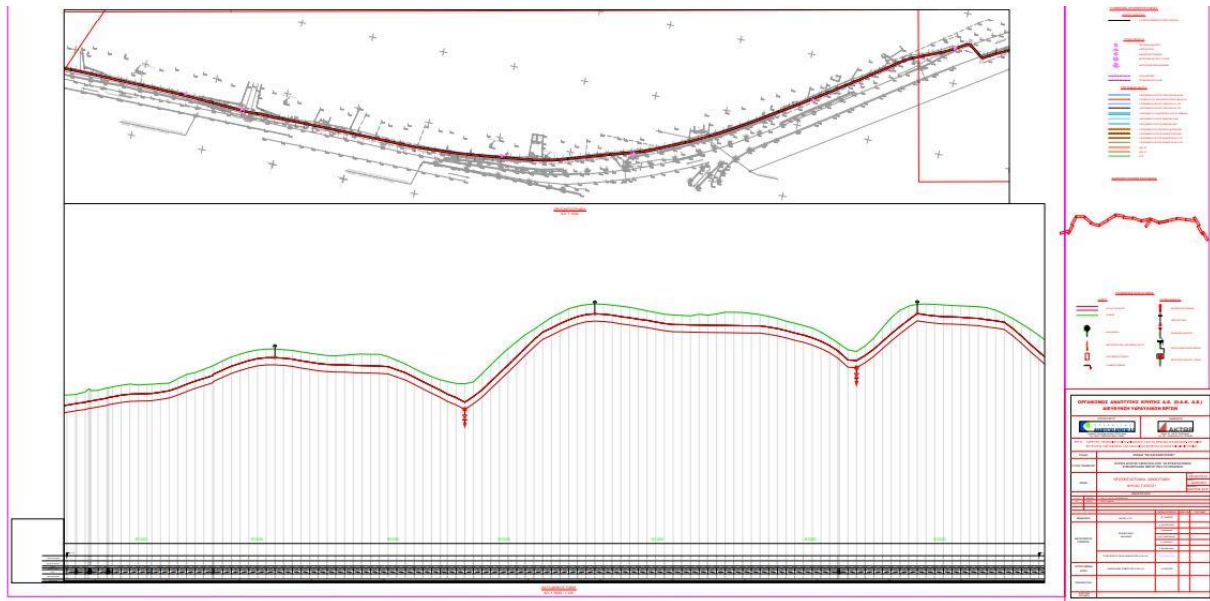
Ως προς την Υδραυλική Ανάλυση μέσω του EPANET ισχύουν τα παρακάτω:

- Δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος του δικτύου που μπορεί να αναλυθεί.
- Η απώλεια πίεσης (head loss) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας έναν από τους τύπους Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ή Chezy-Manning.
- Περιλαμβάνει μικρές απώλειες πίεσης που οφείλονται σε αντλίες, βάνες κ.λπ.
- Μοντελοποιεί διάφορους τύπους βανών (διακοπής, ελέγχου, ρύθμισης πίεσης και ελέγχου ροής).
- Επιτρέπει στον χρήστη να σχεδιάζει όπως εκείνος επιθυμεί τις δεξαμενές αποθήκευσης νερού όσον αφορά το μέγεθος και τη διάμετρο, καθώς και το ύψος όπου θα βρίσκεται η δεξαμενή.
- Λαμβάνει υπόψη πολλαπλές τιμές ζήτησης σε κόμβους χρησιμοποιώντας το μοτίβο χρονικής διακύμανσης της καθεμίας.
- Παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για υδραυλική σύγκλιση και συνθήκες χαμηλής/μηδενικής ροής.
- Υπολογίζει την συνολική πίεση σε κάθε κόμβο και μετά αφαιρεί το γεωμετρικό ύψος (elevation) για να δώσει την πίεση, την οποία στη συνέχεια μετατρέπει στις απαιτούμενες μονάδες πίεσης.[28][29]

Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση

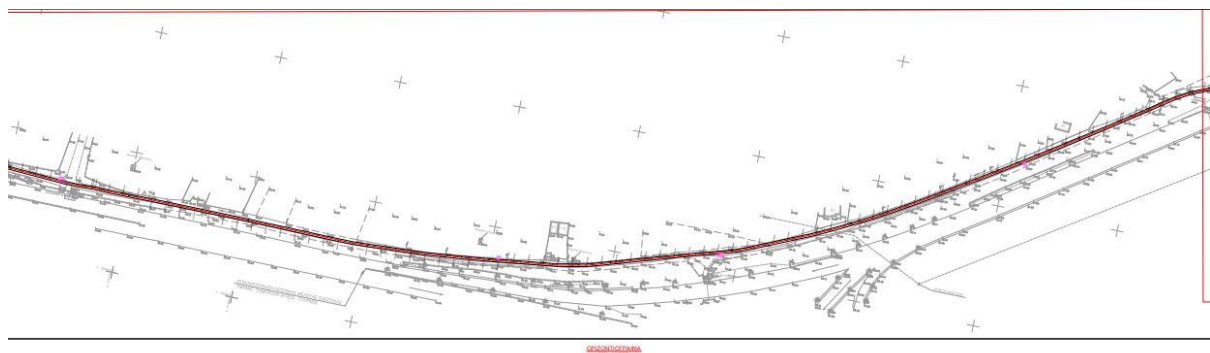
2.1 Σχέδια του δικτύου

Μετά από επικοινωνία με τους μηχανικούς του δικτύου, αποκτήθηκαν τα σχέδια από την ΕΕΝ Αποσελέμη μέχρι το Ηράκλειο. Τα σχέδια δόθηκαν σε 21 αρχεία μορφής pdf, από τα οποία το καθένα περιέχει ένα κομμάτι του αγωγού και στα οποία υπάρχουν πολύτιμα δεδομένα για την σχεδίαση και ακριβή αποτύπωση του δικτύου, όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα από το pdf 7.



Εικόνα 11: Σχέδιο Αγωγού του Δικτύου σε pdf (pdf 7_21)[10]

Αναλύοντας ένα τέτοιο pdf, στο επάνω μέρος φαίνεται η οριζοντιογραφία, δηλαδή μία κάτοψη του έργου στο συγκεκριμένο τμήμα. Ακόμη φαίνονται τα τοπογραφικά σχέδια γύρω από τον αγωγό σαν «external references» στην οριζοντιογραφία.



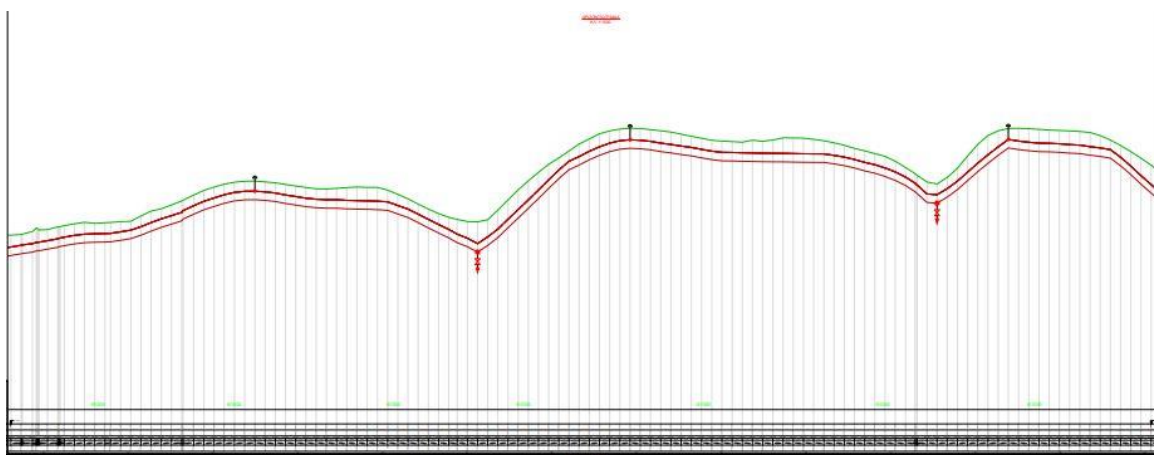
Εικόνα 12: Οριζοντιογραφία του Αγωγού[10]

Στο υπόμνημα της ενότητας επεξηγείται ο κατασκευασμένος αγωγός ύδρευσης, τα υφιστάμενα δίκτυα και τα τυπικά φρεάτια που βρίσκονται στην οριζοντιογραφία.



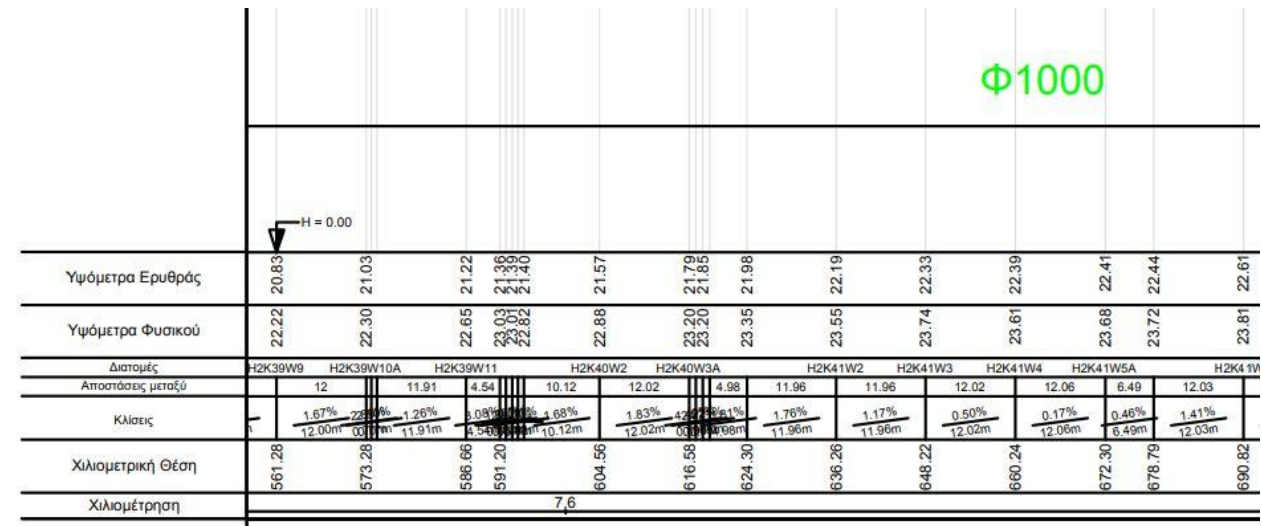
Εικόνα 13: Υπόμνημα Οριζοντιογραφίας[10]

Στο κάτω μέρος του pdf φαίνεται η μηκοτομή, δηλαδή η τομή του εδάφους κατά μήκος του άξονα του έργου.



Εικόνα 14: Διάγραμμα Μηκοτομής[10]

Από την μηκοτομή αντλήθηκαν στοιχεία για το υψόμετρο του εδάφους (φυσικού) και το υψόμετρο του αγωγού (υψόμετρο ερυθράς) σε διάφορα σημεία. Άλλα στοιχεία που περιλαμβάνει είναι οι ονομασίες των διατομών, οι αποστάσεις μεταξύ των διατομών, οι κλίσεις και η χιλιομετρική τους θέση.



Εικόνα 15: Πληροφορίες Μηκοτομής[10]

Στο αντίστοιχο υπόμνημα υπάρχει ο συμβολισμός για τους αγωγούς και τα τυπικά φρεάτια.



Εικόνα 16: Υπόμνημα Μηκοτομής[10]

Συμπληρωματικά με τα παραπάνω αρχεία, τα σχέδια της οριζοντιογραφίας, η μηκοτομή του αγωγού από ΕΕΝ Αποσελέμη έως Ηράκλειο και τα τοπογραφικά σχέδια υπάρχουν και σε μορφή .dwg (αρχεία AutoCAD).

2.2 Δομικά και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά του Δικτύου

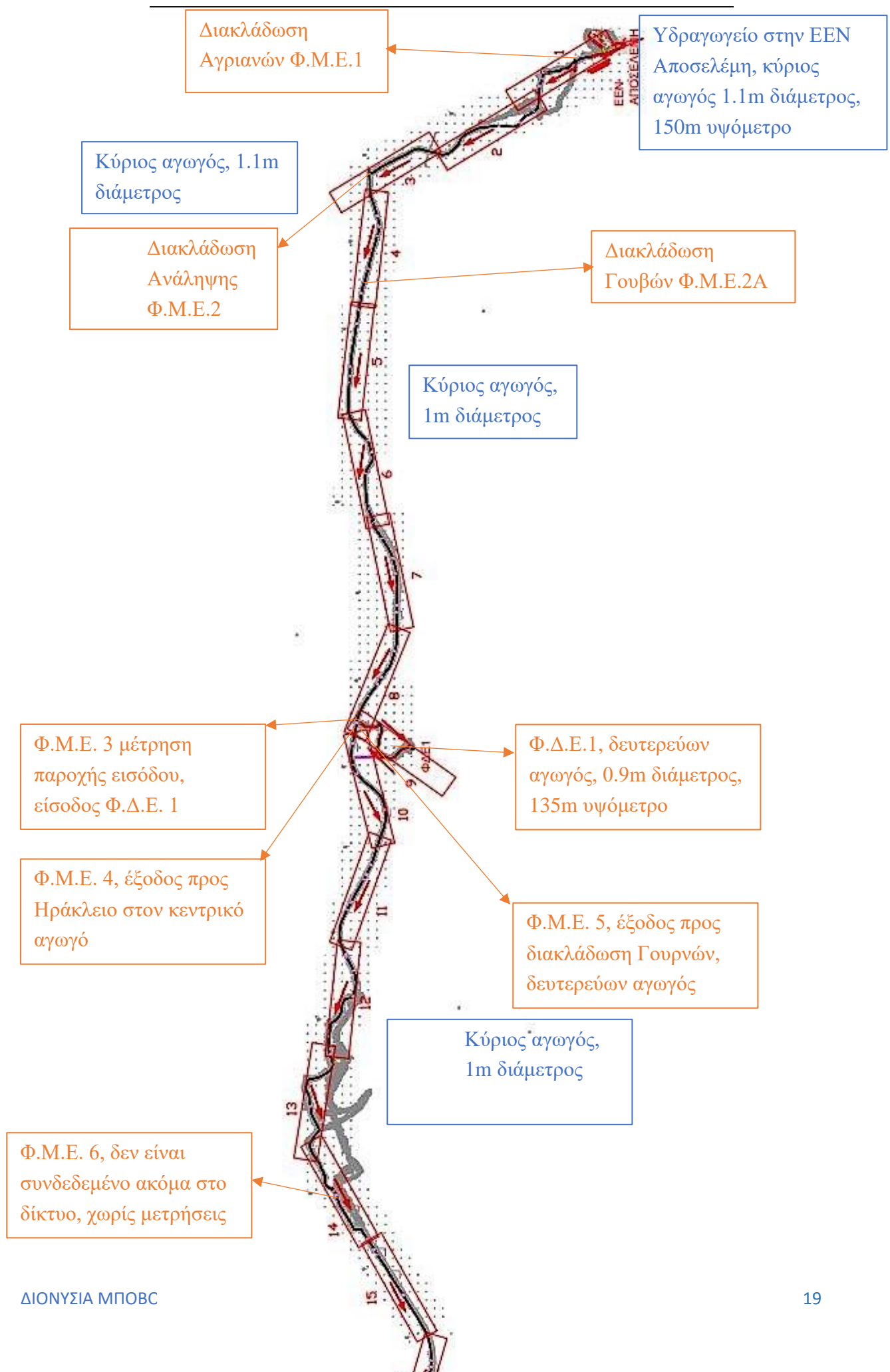
Για να σχεδιαστεί σωστά το δίκτυο πρέπει να γίνουν κατανοητά η δομή και ο τρόπος λειτουργίας του αγωγού. Στο υδραγωγείο Αποσελέμη υπάρχει ένας κύριος αγωγός από τον οποίο ξεκινούν οι δευτερεύοντες αγωγοί (διακλαδώσεις) που υδροδοτούν κοντινές περιοχές. Ο κεντρικός άξονας του αγωγού κινείται στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής του κάτω από την παλαιά ή τη νέα εθνική οδό. Είναι φτιαγμένος από χάλυβα και η διάμετρός του κινείται στις τιμές 0.9m έως 1.1 m. Συγκεκριμένα, οι διακλαδώσεις διέρχονται από τις περιοχές Αγριανά, Ανάληψη, Γούβες και Γούρνες. Στα πρώτα μέτρα κάθε διακλάδωσης υπάρχουν βάνες διακοπής και φρεάτια μέτρησης και ελέγχου (ΦΜΕ) στα οποία λαμβάνονται μετρήσεις για την παροχή. Σε οποιοδήποτε αγωγό του υδραγωγείου Αποσελέμη η ροή είναι από τον αγωγό προς τις καταναλώσεις που λειτουργούν (ΦΜΕ1, ΦΜΕ2, ΦΜΕ2Α, ΦΜΕ5, ΦΜΕ10, ΦΜΕ11).

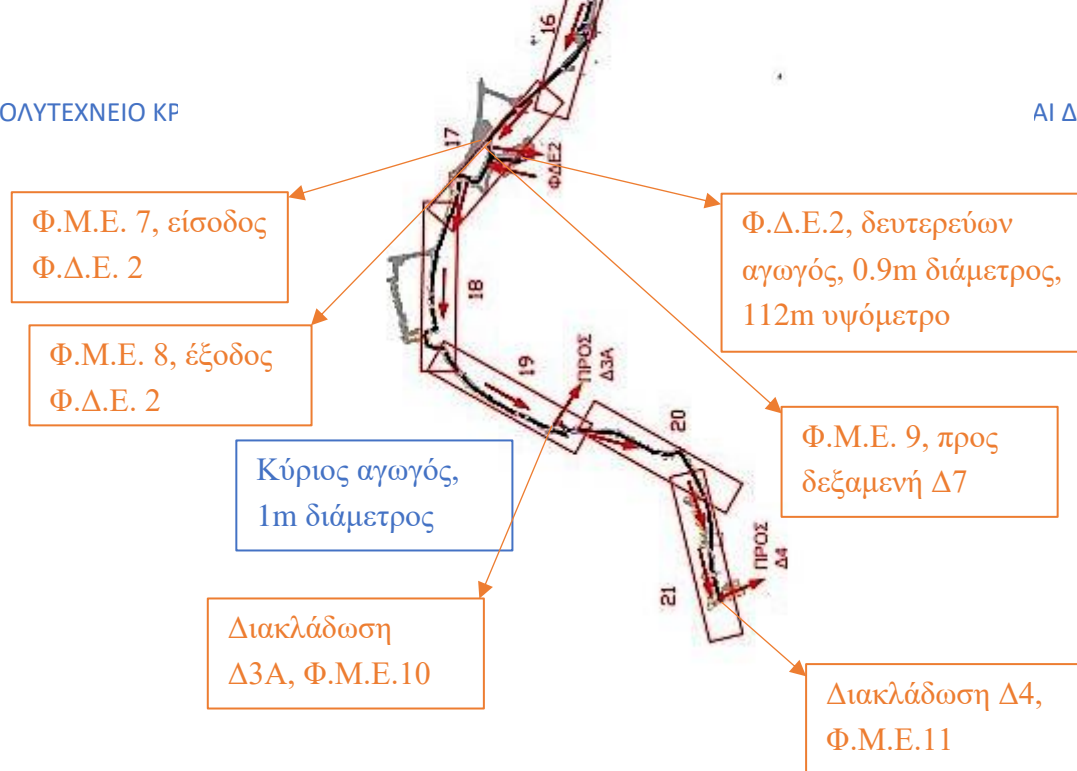
Επιπρόσθετα, υπάρχουν διακλαδώσεις που οδηγούν στα δύο Φρεάτια Διακοπής και Ελέγχου (Φ.Δ.Ε.) του δικτύου. Εκεί ο κύριος αγωγός εισέρχεται και εξέρχεται από ενδιάμεσες ανοιχτές δεξαμενές (μία δεξαμενή σε κάθε Φ.Δ.Ε.), η είσοδος και έξοδος των οποίων βρίσκεται σε ψηλότερο σημείο. Σκοπός τους είναι η διακοπή της συνέχειας του δικτύου και η αντίστοιχη πτώση της στατικής πίεσής του. Δηλαδή η στατική πίεση στο τμήμα ΦΔΕ 1 - ΦΔΕ 2 είναι μικρότερη σε σχέση με την αρχική του τμήματος ΕΕΝ – ΦΔΕ 1 και στο τμήμα ΦΔΕ2 – Ηράκλειο είναι μικρότερη από το ΦΔΕ 1 – ΦΔΕ 2.

Γενικά, όλες οι δεξαμενές της Εγκατάστασης και του Υδραγωγείου είναι ανοικτές δεξαμενές και η πίεση στο τμήμα του αγωγού κατάντη των δεξαμενών εξαρτάται μόνο από την υψομετρική διαφορά με τη στάθμη του νερού των δεξαμενών ανάντη.

Σύμφωνα με τα σχέδια του δικτύου σε διάφορα σημεία περιλαμβάνονται αερεξαγωγοί και εκκενωτές πυθμένα. Οι μεν αερεξαγωγοί εισάγουν και εξάγουν αέρα σε σημεία τοπικού μεγίστου του υψομέτρου. Στα σημεία αυτά εγκλωβίζεται αέρας κατά την πλήρωση και εκκένωση του δικτύου, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει υποπίεση και να διαταράξει την ομαλή λειτουργία του. Οι δε εκκενωτές πυθμένα εκκενώνουν το δίκτυο σε σημεία τοπικού ελαχίστου του υψομέτρου, όταν γίνονται αλλαγές στον εξοπλισμό ή εργασίες συντήρησης.

Η λειτουργία του αγωγού εάν χωριστεί σε επιμέρους τμήματα συνοψίζεται στα εξής:

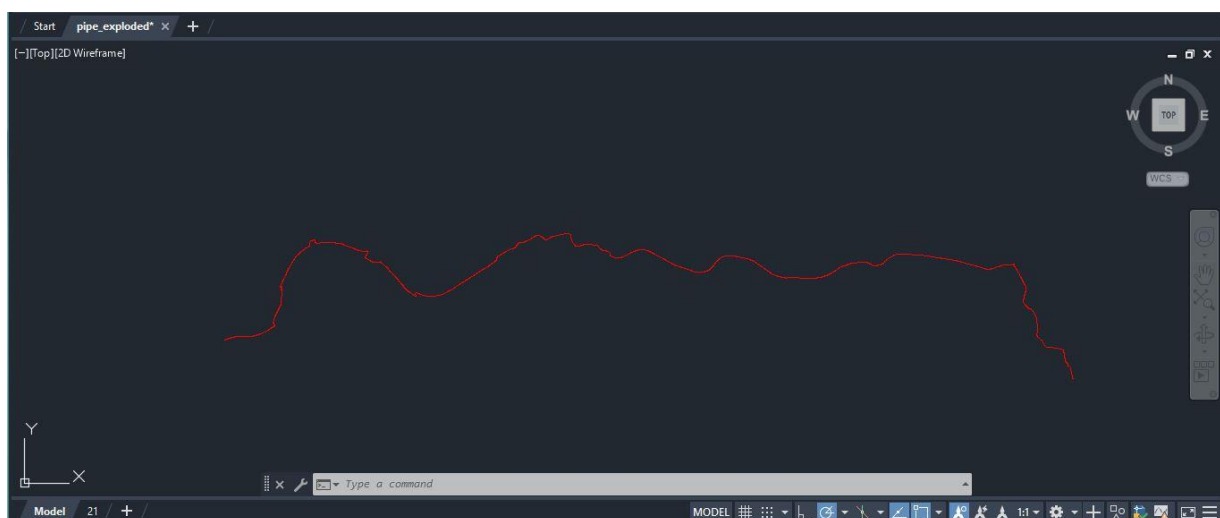




Εικόνα 17: Δίκτυο με σημειώσεις για διακλαδώσεις και διαμέτρους[11]

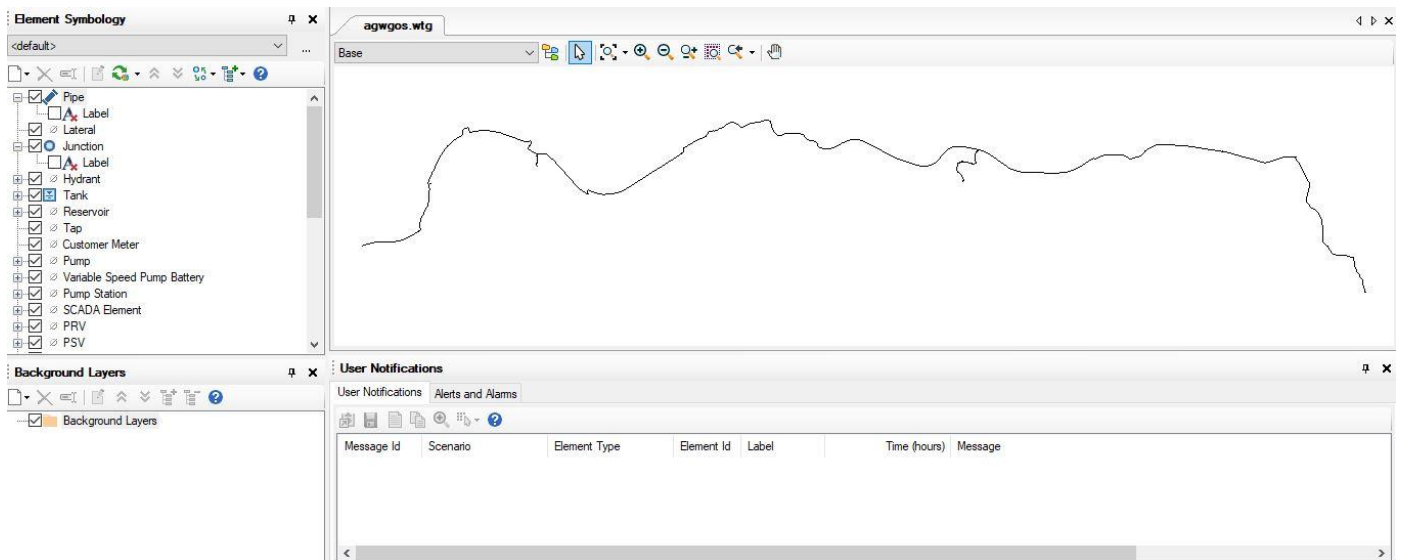
2.3 Αποτύπωση Αγωγού στο EPANET

Προκειμένου να αποτυπωθεί ο αγωγός στο EPANET χρειάστηκε να γίνει μετατροπή του από αρχείο .dwg σε .net. Αρχικά, απομονώθηκε ο αγωγός από το υπόλοιπο σχέδιο στο AutoCAD και με την εντολή exploded view έσπασε στα επιμέρους part από τα οποία αποτελείται για να οριστούν οι θέσεις των κόμβων στα αρχεία «pipe_exploded.dxf» και «9.dxf», όπου το πρώτο περιέχει τον κύριο αγωγό, ενώ το δεύτερο τις διακλαδώσεις.

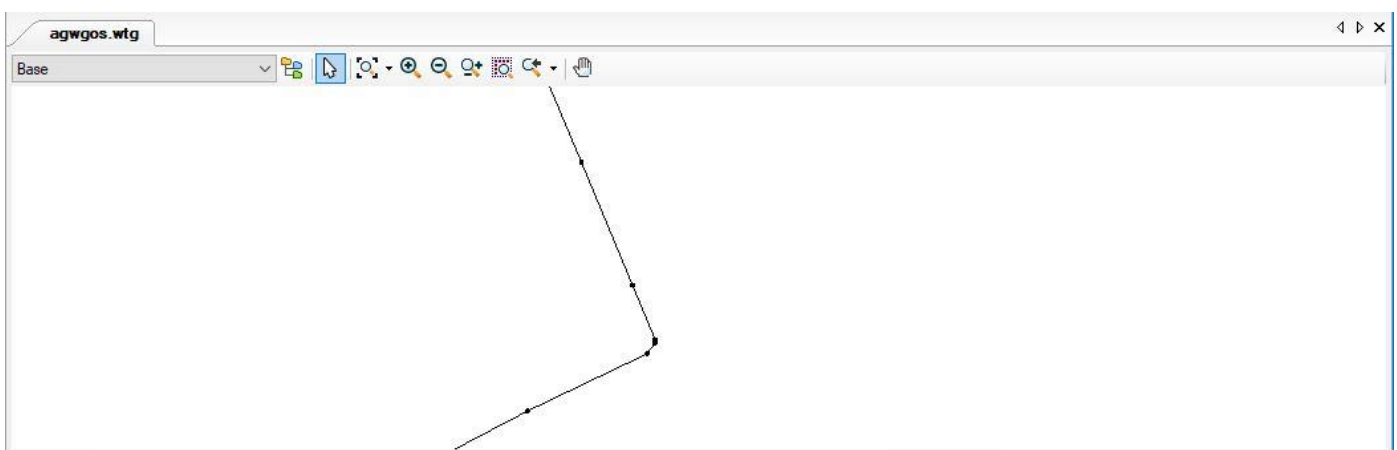


Εικόνα 18: Κύριος Αγωγός στο AutoCAD

Στην συνέχεια, με την μορφή .dxf το αρχείο ανοίχτηκε στο πρόγραμμα WaterCAD της Bentley με την εντολή ModelBuilder. Στο πρόγραμμα αυτό προστέθηκαν οι κόμβοι αυτόματα και εισήχθησαν χειροκίνητα τα ύψη (elevations) για όλους τους κόμβους και οι διάμετροι για όλους τους αγωγούς με βάση τα δεδομένα από τον πίνακα της μηκοτομής (υψόμετρα ερυθράς). Το αρχείο αποθηκεύτηκε ως «agwgos.wtg» και μετά έγινε export σε μορφή αρχείου EPANET «agwgos_xwris_vanes.inp».

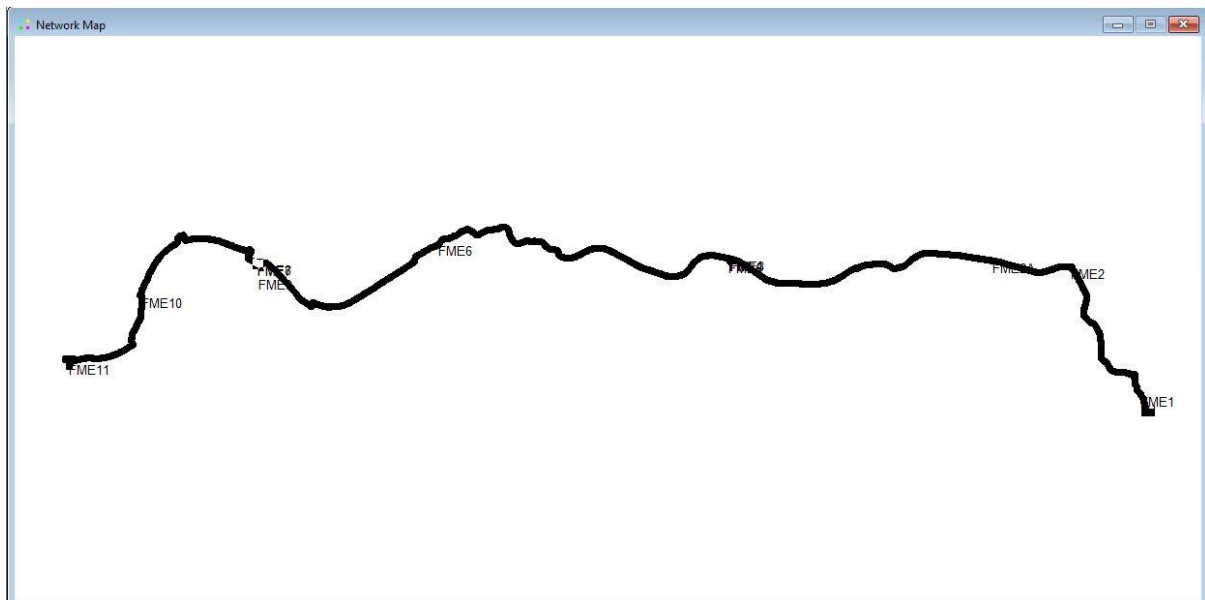


Εικόνα 19: Κύριος Αγωγός και Διακλαδώσεις στο WaterCAD



Εικόνα 20: Αναπαράσταση κόμβων στο WaterCAD

Τα ΦΜΕ 1, 2, 2α, 5, 10, 11 (δηλαδή τα φρεάτια μετρητών της παροχής υδροδοτήσεων) βρίσκονται σε δευτερεύοντες αγωγούς, επειδή όμως δεν υπάρχει σε όλα η ακριβής θέση και το μήκος του δευτερεύοντος αγωγού αυτά μεταφέρθηκαν στους αντίστοιχους κόμβους που συνδέονται οι αγωγοί υδροδοτήσεων στον κύριο αγωγό. Τα ΦΜΕ 3, 4, 7, 8 είναι πάνω στον κύριο αγωγό. Εξαιρέση αποτελεί το ΦΜΕ 5 το οποίο δεν μπορεί να αντιστοιχηθεί σε κάποιο σημείο πάνω στον αγωγό, παρόλα αυτά έχει ξεχωριστά δεδομένα μετρήσεων, οπότε διατηρείται εκτός αγωγού. Τα ΦΜΕ 6 και 9 δεν ήταν συνδεδεμένα στο δίκτυο με βάση τα δεδομένα εκείνης της περιόδου.



Εικόνα 21: Τελικό δίκτυο υπό μελέτη στο EPANET

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα στην αρχή του δικτύου υπάρχει μία δεξαμενή (reservoir) στην οποία έχει δοθεί μία ενδεικτική τιμή για το Total Head (συνολική πίεση, άθροισμα μανομετρικής πίεσης/ύψους και πίεσης λόγω υψομετρικής διαφοράς) 150m, ώστε να είναι τουλάχιστον ίσο με το γεωμετρικό ύψος του επόμενου κόμβου και να μην δημιουργείται αρνητική πίεση.

Ταυτόχρονα, στο τέλος του δικτύου υπάρχει μία δεξαμενή (tank) στην οποία έχουν δοθεί προσεγγιστικά δεδομένα, καθώς δεν ήταν γνωστή κάποια πραγματική τιμή. Το ύψος (elevation) έχει οριστεί 100m, η αρχική και ελάχιστη στάθμη 0, το ύψος μέγιστης στάθμης 20m και η διάμετρος 50m. Μέχρι αυτό το σημείο είναι ασφαλής ο ισχυρισμός ότι το δίκτυο γεωμετρικά και δομικά προσομοιάζει στο πραγματικό.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση Δικτύου

3.1 Δεδομένα Μετρήσεων στα ΣΜΕ

Από τους μηχανικούς του δικτύου δόθηκαν μαζί με τα σχέδια και μετρήσεις παροχής από τα Σ.Μ.Ε. σε αρχείο excel και οι οποίες συνδέουν το εικονικό με το πραγματικό δίκτυο. Το SCADA είναι το χρησιμοποιούμενο σύστημα ελέγχου – εποπτείας και μεταφοράς δεδομένων λειτουργίας από απόσταση για το δίκτυο. Γενικά το SCADA αποτελείται από έναν κεντρικό διακομιστή ή έναν κύριο σταθμό, μια κύρια τελική μονάδα ή MTU , ένα ή περισσότερα στοιχεία συλλογής τομέων και μονάδες ελέγχου ή remotes (συνήθως αποκαλούμενοι ως σταθμοί απομακρυσμένης λειτουργίας, ή RTU) και μια συλλογή του λογισμικού προτύπων ή/και συνήθειας που χρησιμοποιήθηκε στο όργανο ελέγχου και τον έλεγχο για τον εντοπισμό και την καταγραφή στοιχείων σε μακρινή απόσταση.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του SCADA όπως γίνεται αντιληπτό στην εικόνα 22 στην πρώτη στήλη αναγράφονται η ημερομηνία και η ώρα για την εκάστοτε μέτρηση. Στην δεύτερη στήλη του excel φαίνονται οι στιγμιαίες τιμές της παροχής στο Σ.Μ.Ε 1. Στις υπόλοιπες στήλες αντίστοιχα υπάρχουν οι τιμές της παροχής για τα υπόλοιπα σημεία ελέγχου. Οι στιγμιαίες μετρήσεις λαμβάνονται ανά πέντε λεπτά και κάθε αρχείο excel περιέχει δεδομένα ενός μήνα παρόμοια με την παρακάτω εικόνα για τον Μάιο 2021 (05.2021). Συνολικά στα αρχεία καλύπτονται στιγμιαίες μετρήσεις της παροχής ανά πέντε λεπτά ανά μήνα για έναν χρόνο.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Ημερομηνία - Ώρα	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 1 HR	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 2 HR	ΠΑΡΟΧΗ ΦΩΜΕ 2α HR	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 3 HR	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 4 HR	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 5 HR	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 6 HR	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 7 HR	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 8 HR	ΠΑΡ. ΦΩΜΕ 9 HR	ΠΑΡΟΧΗ ΦΩΜΕ 10 HR	ΠΑΡΟΧΗ ΦΩΜΕ 11 HR
2	01.05.2021 20:04:00	14.00	51.80	72.50	1194.00	972.00	80.80	0.00	1016.00	1063.00	0.00	410.00	645.38
3	01.05.2021 20:09:00	11.10	52.20	73.40	1128.00	1156.00	83.00	0.00	1149.00	1064.00	0.00	410.40	647.63
4	01.05.2021 20:14:00	11.90	51.20	72.30	1149.00	997.00	81.00	0.00	1004.00	1063.00	0.00	409.40	648.38
5	01.05.2021 20:19:00	10.00	52.20	72.20	1045.00	1123.00	80.40	0.00	1146.00	1063.00	0.00	411.40	645.75
6	01.05.2021 20:24:00	9.30	51.40	70.40	1228.00	1098.00	81.00	0.00	1113.00	1064.00	0.00	410.60	648.75
7	01.05.2021 20:29:00	10.00	51.60	71.30	1093.00	998.00	79.80	0.00	1031.00	1068.00	0.00	411.00	647.63
8	01.05.2021 20:34:00	11.00	50.20	70.10	1100.00	1135.00	78.20	0.00	1151.00	1058.00	0.00	410.00	647.63
9	01.05.2021 20:39:00	11.30	48.40	67.90	1268.00	1003.00	77.20	0.00	1018.00	1058.00	0.00	410.00	648.38
10	01.05.2021 20:44:00	11.70	47.60	64.90	1007.00	1113.00	75.20	0.00	1127.00	1069.00	0.00	409.00	652.13
11	01.05.2021 20:49:00	12.70	45.00	63.20	1269.00	1090.00	74.40	0.00	1075.00	1071.00	0.00	410.80	650.25
12	01.05.2021 20:54:00	14.40	43.80	61.40	1051.00	996.00	73.40	0.00	1024.00	1072.00	0.00	408.20	649.88
13	01.05.2021 20:59:00	10.40	41.80	60.30	1089.00	1046.00	72.00	0.00	1069.00	1074.00	0.00	409.20	649.50
14	01.05.2021 21:04:00	10.40	42.00	58.60	1233.00	1044.00	71.20	0.00	1057.00	1066.00	0.00	410.20	649.13
15	01.05.2021 21:09:00	10.30	39.60	57.90	1052.00	1005.00	70.80	0.00	1049.00	1066.00	0.00	409.20	651.38
16	01.05.2021 21:14:00	10.00	37.20	57.00	997.00	1107.00	69.60	0.00	1066.00	1063.00	0.00	409.60	649.13
17	01.05.2021 21:19:00	10.50	36.00	57.30	1178.00	1097.00	68.40	0.00	1108.00	1067.00	0.00	411.60	648.75
18	01.05.2021 21:24:00	10.00	33.40	56.30	1060.00	1016.00	66.40	0.00	1041.00	1064.00	0.00	409.20	651.75
19	01.05.2021 21:29:00	10.30	31.20	54.70	1014.00	1126.00	67.00	0.00	1115.00	1066.00	0.00	410.40	648.38
20	01.05.2021 21:34:00	9.30	30.00	54.00	1261.00	1074.00	65.20	0.00	1109.00	1065.00	0.00	410.00	646.88
21	01.05.2021 21:39:00	8.60	29.40	53.10	1084.00	992.00	63.60	0.00	1007.00	1068.00	0.00	409.80	646.88
22	01.05.2021 21:44:00	8.70	28.80	52.50	1051.00	1146.00	62.80	0.00	1148.00	1053.00	0.00	410.40	649.50
23	01.05.2021 21:49:00	9.00	28.80	51.40	1194.00	999.00	62.60	0.00	1022.00	1057.00	0.00	410.20	648.00
24	01.05.2021 21:54:00	7.90	27.00	48.80	1067.00	1119.00	62.00	0.00	1127.00	1058.00	0.00	410.60	647.25
25	01.05.2021 21:59:00	9.10	26.60	49.00	1186.00	1004.00	60.80	0.00	1019.00	1055.00	0.00	408.60	648.75
26	01.05.2021 22:04:00	8.20	26.40	48.40	1039.00	1093.00	61.00	0.00	1109.00	1059.00	0.00	410.40	648.38

Εικόνα 22: Δεδομένα του SCADA, μετρήσεις παροχής στα Σ.Μ.Ε.[10]

Παρατίθεται ένα σχετικό υπόμνημα για τις ονομασίες των κόμβων όπου υπάρχουν μετρήσεις (κάθε στήλη), ώστε να είναι κατανοητή η θέση τους.

Ονομασία Κόμβου	Επεξήγηση
ΠΑΡ. ΦΜΕ1 HP	ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ ΑΓΡΙΑΝΩΝ
ΠΑΡ. ΦΜΕ2 HP	ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ ΑΝΑΛΗΨΗΣ
ΠΑΡ. ΦΜΕ2Α HP	ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ ΓΟΥΒΩΝ
ΠΑΡ. ΦΜΕ3 HP	ΕΙΣΟΔΟΣ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΦΔΕ1 HP
ΠΑΡ. ΦΜΕ4 HP	ΕΞΟΔΟΣ ΑΠΟ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΦΔΕ1 HP
ΠΑΡ. ΦΜΕ5 HP	ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ ΓΟΥΡΝΩΝ
ΠΑΡ. ΦΜΕ6 HP	ΑΝΕΝΕΡΓΗ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ
ΠΑΡ. ΦΜΕ7 HP	ΕΙΣΟΔΟΣ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΦΔΕ2 HP
ΠΑΡ. ΦΜΕ8 HP	ΕΞΟΔΟΣ ΑΠΟ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΦΔΕ2HP
ΠΑΡ. ΦΜΕ9 HP	ΑΝΕΝΕΡΓΗ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ
ΠΑΡ. ΦΜΕ10HP	ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ Δ3Α
ΠΑΡ. ΦΜΕ11HP	ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ Δ4

Πίνακας 1: Αντιστοιχία Κόμβων με την θέση τους στο δίκτυο

Οι παραπάνω υδροδοτήσεις αναφέρονται με τον κωδικό ΦΜΕXXHP στα αρχεία καταγραφών και μπορούν να εντοπιστούν στα σχέδια με την περιγραφή της θέσης υδροδότησης. Σε ορισμένες τιμές υπάρχει δίπλα η ένδειξη [u.] Αυτό σημαίνει ότι μπορεί την δεδομένη στιγμή να υπάρχει δυσλειτουργία στη διάταξη PLC - μετρητή παροχής ή σφάλμα στην επικοινωνία μέσω του δικτύου. Ακόμη σε κάποιες καταγραφές παρουσιάζονται κενά μεταξύ των γραμμών για αδιευκρίνιστο λόγο και εξάγονται έτσι από το SCADA.

3.2 Βάσεις του Υπολογισμού, Αλγόριθμοι και Παραδοχές

Το μοντέλο υδραυλικής προσομοίωσης του EPANET υπολογίζει το μέτρο της υδραυλικής πίεσης στους κόμβους και τους ρυθμούς παροχής των αγωγών. Τα παραπάνω υπολογίζονται όταν έχουν οριστεί από τον χρήστη οι στάθμες δεξαμενών (tanks, reservoirs) και η ζήτηση νερού σε διαδοχικά σημεία στον χρόνο. Από ένα χρονικό βήμα στο επόμενο τα επίπεδα των δεξαμενών (reservoirs) και η ζήτηση των κόμβων ενημερώνονται σύμφωνα με τα καθορισμένα time patterns, ενώ ενημερώνονται και τα επίπεδα των δεξαμενών(tanks) με βάση την ροή. Οι υπολογισμοί για τις πιέσεις και τις ροές σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή γίνονται με την ταυτόχρονη επίλυση της εξίσωσης διατήρησης της ροής για κάθε κόμβο και της εξίσωσης απώλειας πίεσης(head loss equation) σε κάθε αγωγό του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η υδραυλική «εξισορρόπηση του δικτύου», καθώς λύνονται

επαναληπτικά οι μη γραμμικές εξισώσεις που το περιγράφουν. Το EPANET χρησιμοποιεί τον «Global Gradient Algorithm» για αυτόν τον σκοπό όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Στην προσομοίωση εκτεταμένης περιόδου (Extended Period Simulation) το χρονικό βήμα (hydraulic time step) ορίζεται από τον χρήστη. Ενδεικτική τιμή είναι η 1 ώρα αλλά το χρονικό βήμα μειώνεται εάν λήξει μία χρονική περίοδος όπου έχει οριστεί ότι δημιουργείται report, εμφανιστεί καινούρια περίοδος μοτίβου (pattern) , μία δεξαμενή αδειάσει ή γεμίσει και εάν ενεργοποιηθεί κάποιος απλός ή βάσει κανονισμών έλεγχος.

Η υδραυλική ανάλυση του EPANET επιτρέπει δύο διαφορετικούς τρόπους μοντελοποίησης για την ζήτηση νερού στους κόμβους του δικτύου. Η Ανάλυση βάσει Ζήτησης (DDA) απαιτεί οι ζητήσεις των κόμβων σε κάθε χρονική στιγμή να είναι σταθερές τιμές που πρέπει να αποδίδονται στους κόμβους ανεξάρτητα από τις πιέσεις και τις παροχές που παράγονται κατά την ανάλυση. Η μέθοδος αυτή αποτελεί κλασική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της ζήτησης, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις όπου η ζήτηση καλύπτεται σε κόμβους με αρνητική πίεση που είναι φυσικά αδύνατο. Εναλλακτικά, η Ανάλυση βάσει Πίεσης (PDA) επιτρέπει στην πραγματική ζήτηση που παρέχεται σε έναν κόμβο να εξαρτάται από την πίεση του κόμβου. Συγκεκριμένα κάτω από μία ορισμένη ελάχιστη πίεση η ζήτηση είναι μηδέν, πάνω από κάποια τιμή πίεσης παρέχεται πλήρως η απαιτούμενη ζήτηση και ενδιάμεσα η ζήτηση ποικίλλει συναρτήσει της εξίσωσης κατανομής της πίεσης. Η χρήση της ανάλυσης PDA είναι ένας τρόπος για να αποφευχθεί η θετική ζήτηση σε κόμβους με αρνητικές πιέσεις. Παρόλα αυτά για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η DDA, καθώς στο δίκτυο δεν παρατηρήθηκαν αρνητικές πιέσεις.

3.2.1 Μοντέλο Σταθερής Ζήτησης

Έστω ότι εξετάζεται ένα δίκτυο σωληνώσεων με N κόμβους και NF δεξαμενές (tanks και reservoirs). Επίσης, έστω q_{ij} η ροή στον σωλήνα ανάμεσα στους κόμβους i και j , που είναι θετική αν το νερό ρέει από τον κόμβο i στον κόμβο j και αρνητική εάν ρέει στην αντίθετη κατεύθυνση. Η σχέση μεταξύ της απώλειας πίεσης λόγω τριβών και της ροής στον σωλήνα μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο:

$$h_{Lij} = r q_{ij} |q_{ij}|^{n-1} + m q_{ij} |q_{ij}|$$

όπου h_{Lij} είναι απώλεια πίεσης (head loss), r είναι ο συντελεστής αντίστασης, n είναι ο εκθέτης ροής και m είναι ο συντελεστής ελάχιστης απώλειας. Η τιμή του συντελεστή αντίστασης εξαρτάται από τον τύπο υπολογισμού head loss που χρησιμοποιείται.

Το EPANET μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε από τις τρεις δημοφιλείς μεθόδους για τον υπολογισμό της απώλειας πίεσης (head loss):

τον τύπο Hazen-Williams

τον τύπο Darcy-Weisbach

τον τύπο Chezy-Manning

Μέσα στο πρόγραμμα στις ρυθμίσεις(Options) της ανάλυσης επιτρέπεται στον χρήστη να επιλέξει τον τύπο που θα χρησιμοποιήσει. Ο τύπος Hazen-Williams είναι ίσως η πιο δημοφιλής εξίσωση υπολογισμού head loss για συστήματα διανομής νερού, η φόρμουλα Darcy-Weisbach είναι πιο εφαρμόσιμη για στρωτή ροή και σε υγρά εκτός από το νερό, και η φόρμουλα Chezy-Manning χρησιμοποιείται συνήθως για ροή ανοιχτού αγωγού.

Γενικά παρότι ο τύπος Darcy-Weisbach είναι πιο ακριβής μαθηματικά για ροή σε κλειστό αγωγό σε σχέση με τον Hazen-Williams, τα δεδομένα πεδίου για τις τιμές ϵ που απαιτούνται για την εξίσωση Darcy-Weisbach δεν είναι τόσο άμεσα διαθέσιμα όσο είναι οι τιμές C για τον συντελεστή τραχύτητας τοιχώματος σωλήνα στην εξίσωση Hazen-Williams.

Μέθοδος	Συντελεστής Αντίστασης (a)	Δείκτης ροής(b)
Hazen-Williams	$4.72 C^{-1.85} d^{-4.87} L$	1.85
Darcy-Weisbach	$0.0252 f(\epsilon, d, q) d^{-5} L$	2
Chezy-Manning (full pipe flow)	$4.66 n^2 d^{-5.33} L$	2

Πίνακας 2: Τύποι για τον υπολογισμό του Headloss

Όπου C = συντελεστής τραχύτητας Hazen-Williams

ϵ = Συντελεστής τραχύτητας Darcy-Weisbach, ft

f = συντελεστής τριβής (εξαρτάται από τα ϵ , d και q)

d = διάμετρος σωλήνα, ft

L = μήκος σωλήνα, ft

Για τους τύπους Hazen-Williams και Chezy-Manning ο συντελεστής αντίστασης (r) εξαρτάται μόνο από τη διάμετρο, το μήκος και τον σταθερό συντελεστή τραχύτητας του σωλήνα. Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε ο τύπος Hazen-Williams ως πιο κατάλληλος για την ανάλυση.

Συνεχίζοντας στο μοντέλο σταθερής ζήτησης για μια αντλία μεταξύ των κόμβων i και j , η απώλεια πίεσης μπορεί να αναπαρασταθεί από μία εξίσωση κατανομής της μορφής:

$$h_{Lij} = -\omega^2 (h_0 - r (q_{ij} / \omega)^n)$$

όπου h_0 είναι η πίεση απενεργοποίησης για την αντλία, ω είναι μια ρύθμιση σχετικής ταχύτητας, r και n είναι οι συντελεστές καμπύλης αντλίας και η παροχή q_{ij} απαιτείται να είναι θετική.

Η διατήρηση της ενέργειας σε μια σύνδεση μεταξύ κόμβων i και j απαιτεί ότι

$$h_i - h_j = h_{Lij} (q_{ij})$$

όπου h_i και h_j είναι η μέτρηση της υδραυλικής πίεσης σε κάθε κόμβο αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας σε έναν κόμβο i η συνολική εισροή πρέπει να είναι ίση με τη συνολική εκροή:

$$\sum_j q_{ij} - D_i = 0$$

όπου το άθροισμα γίνεται για όλους τους κόμβους j που συνδέονται με τον κόμβο i , κατά σύμβαση η ροή σε έναν κόμβο είναι θετική και το D_i είναι γνωστή ζήτηση που απαιτείται να παραδοθεί στον κόμβο i .

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις αναζητείται λύση ως προς h σε κάθε κόμβο και q σε κάθε σωλήνα. Το EPANET χρησιμοποιεί τον Global Gradient Algorithm (GGA) του Todini (Todini and Pilati, 1988) για να λύσει το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει. Το GGA χρησιμοποιεί μια γραμμικοποίηση των εξισώσεων διατήρησης μέσα σε μία επαναληπτική

διαδικασία Newton-Raphson. Αυτή καταλήγει σε μια διαδικασία λύσης δύο σταδίων σε κάθε επανάληψη.

Ο αλγόριθμος ξεκινά με μια αρχική εκτίμηση της ροής σε κάθε κομμάτι αγωγού που μπορεί να μην ικανοποιεί απαραίτητα τη συνέχεια της ροής. Σε κάθε επανάληψη, λύνεται ένα καινούριο σύνολο γραμμικών εξισώσεων για να βρεθούν καινούριες τιμές για το h :

$$Ah = F$$

όπου A είναι ένας $(N \times N)$ τετραγωνικός συμμετρικός πίνακας συντελεστών, h είναι ένα $(N \times 1)$ διάνυσμα των άγνωστων πιέσεων των κόμβων και F είναι ένα $(N \times 1)$ διάνυσμα, το δεξί μέλος της εξίσωσης.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του αλγόριθμου GGA είναι ότι ο τύπος ενημέρωσης της ροής διατηρεί πάντα τη συνέχεια ροής γύρω από κάθε κόμβο μετά την πρώτη επανάληψη. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται όσο ισχύουν ορισμένα κατάλληλα κριτήρια σύγκλισης με βάση τα υπολειπόμενα σφάλματα που σχετίζονται με τη μάζα και εφόσον οι εξισώσεις εξοικονόμησης ενέργειας πληρούνται ή μέχρις ότου οι αλλαγές στις ροές γίνονται αμελητέες.

3.2.2 Επίλυση γραμμικών εξισώσεων

Το σύστημα γραμμικών εξισώσεων $Ah = F$ λύνεται χρησιμοποιώντας την παραγοντοποίηση Cholesky που εφαρμόζεται σε μια σποραδική αναπαράσταση του συμμετρικού πίνακα συντελεστών A (George and Liu, 1981). Σε αυτήν κατασκευάζεται ένας κατώτερος τριγωνικός πίνακας L έτσι ώστε:

$$L L^T = A$$

Έπειτα γίνεται η επίλυση:

$$\begin{aligned} L y &= F \\ L^T h &= y \end{aligned}$$

όπου το y είναι ένα ενδιάμεσο $(N \times 1)$ διάνυσμα. Λόγω της κάτω τριγωνικής δομής του L αυτό το σύνολο εξισώσεων μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά με χρήση αντικατάστασης.

Πριν από την έναρξη του GGA, με την μέθοδο Multiple Minimum-Degree (Liu 1985) αναδιατάσσονται οι σειρές του πίνακα A (που αντιστοιχούν στους κόμβους του δικτύου) για να πάρει σωστή μορφή μετά την παραγοντοποίηση του πίνακα. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι θέσεις των μη μηδενικών στοιχείων του L που πρέπει να αποθηκευτούν στη μνήμη. Αυτά τα βήματα εκτελούνται μόνο μία φορά πριν από την έναρξη του αλγόριθμου GGA. Σε κάθε επανάληψη του GGA υπολογίζονται οι αριθμητικές τιμές των στοιχείων του L (καθώς τα στοιχεία του A έχουν αλλάξει) και στη συνέχεια προσδιορίζονται νέες τιμές για το διάνυσμα head.

3.3.3 Αρχικές Ροές

Κατά την πρώτη επανάληψη του αλγόριθμου GGA, η ροή σε έναν σωλήνα ορίζεται ως η ροή που αντιστοιχεί σε ταχύτητα 1 ft/sec, ενώ η ροή σε μια αντλία ισούται με το σχέδιο ροής που έχει καθοριστεί για την αντλία. Για κλειστούς αγωγούς, η ροή έχει οριστεί να είναι 10^{-6} cfs. Όταν πραγματοποιείται μια ανάλυση ζήτησης βάσει πίεσης, η αρχική τιμή της ζήτησης q_D ισούται με την πλήρη ζήτηση D .

3.3.4 Συντελεστής Μικρών Απωλειών

Ο συντελεστής τοπικών απωλειών για έναν σωλήνα ή μια βάνα που βασίζεται στην πίεση λόγω κινητικής ενέργειας (K) μετατρέπεται σε συντελεστή με βάση την ροή (m) με την εξής σχέση:

$$m = \frac{0,02517 K}{d^4}$$

3.3.5 Ανάλυση Εκτεταμένης Χρονικής Περιόδου

Η ανάλυση της συμπεριφοράς ενός δικτύου διανομής για εκτεταμένη χρονική περίοδο είναι γνωστή ως Extended Period Simulation (EPS). Μπορεί να αποτυπώσει την επίδραση στην απόδοση του συστήματος των αλλαγών της ζήτησης των καταναλωτών, των επιπέδων των δεξαμενών, των στοιχείων λειτουργίας των αντλιών και των ρυθμίσεων των βαλβίδων. Η EPS μπορεί να προστεθεί σε ένα στατικό υδραυλικό μοντέλο δικτύου συμπεριλαμβάνοντας μια εξίσωση για κάθε κόμβο-δεξαμενή που παίζει ρόλο για τη μεταβολή του όγκου ως προς τον χρόνο λόγω της καθαρής ροής που λαμβάνει:

$$\frac{dVs}{dt} = Q_{s,net}$$

όπου Vs είναι ο όγκος που αποθηκεύεται στη δεξαμενή s , t είναι ο χρόνος και $Q_{s,net}$ είναι η καθαρή εισροή προς ή εκροή από τη δεξαμενή. Μία δεύτερη εξίσωση συσχετίζει το ύψος στάθμης νερού της δεξαμενής H_s με τον όγκο της:

$$H_s = E_s + Y(V_s)$$

όπου E_s είναι το ύψος του πυθμένα της δεξαμενής και $Y(V)$ είναι η συνάρτηση βάθους έναντι όγκου της δεξαμενής.

Αυτές οι εξισώσεις, μαζί με την αρχή διατήρησης της ενέργειας και την αρχή διατήρησης της μάζας αποτελούν ένα σύστημα διαφορικών/αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο επιλύεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Euler και αντικαθιστώντας το dVs/dt με την προσέγγιση:

$$\begin{aligned} V_s(t + \Delta t) &= V_s(t) + Q_{s,net}(t) \Delta t \\ H_s(t + \Delta t) &= E_s + Y(V_s(t + \Delta t)) \end{aligned}$$

Τα επίπεδα των δεξαμενών $H(t)$ και οι ζητήσεις των κόμβων που υπάρχουν κατά τον χρόνο t χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο GGA για την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης του στατικού δικτύου. Από την επίλυση προκύπτει ένα νέο σύνολο τιμών για τις ροές σε κάθε δεξαμενή $Q_{net}(t)$. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι παραπάνω εξισώσεις για να καθοριστούν νέα επίπεδα δεξαμενών μετά από ένα χρονικό διάστημα Δt . Κατόπιν, εκτελείται μια νέα στατική ανάλυση για το χρονικό διάστημα $t + \Delta t$, χρησιμοποιώντας τα νέα επίπεδα δεξαμενών, καθώς και οποιαδήποτε νέα ζήτηση ή συνθήκη λειτουργίας ισχύει για αυτή τη νέα χρονική περίοδο. Η προσομοίωση προχωρά με αυτόν τον τρόπο από τη μια χρονική περίοδο στην άλλη.

3.3 Δημιουργία και Ανάθεση Pattern

Η ανάλυση επιλέχθηκε να γίνει με βάση το excel για τον Μάιο του 2021 με την λογική ότι το excel έχει λίγα σφάλματα και κενά, άρα μπορεί να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη αποτύπωση και πρόβλεψη για τον μήνα αυτό. Προκειμένου να συνδεθεί το πραγματικό με το σχεδιασμένο δίκτυο πρέπει να εισαχθούν κάποια pattern στους κόμβους όπου έχουμε μετρήσεις, τα οποία θα δείχνουν το μοτίβο που ακολουθεί η τιμή της παροχής στον εκάστοτε κόμβο. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν κάποια αρχεία .pat. Καθένα από αυτά περιέχει το pattern για έναν κόμβο.

SME 1.pat - Σημειωματάριο

ΑρχείοΕπεξεργασίαΜορφή

1

0.792857143

0.85

0.714285714

0.664285714

0.714285714

0.785714286

0.807142857

0.835714286

0.907142857

1.028571429

0.742857143

0.742857143

0.735714286

0.714285714

0.75

0.714285714

0.735714286

0.664285714

0.614285714

0.621428571

0.642857143

0.564285714

Εικόνα 23: Παράδειγμα Pattern Σ.Μ.Ε.1 αρχείο SME 1.pat

Η τιμή ενός pattern για μια χρονική στιγμή σε έναν κόμβο προκύπτει διαιρώντας την τιμή της παροχής την δεδομένη χρονική στιγμή διά την πρώτη τιμή της παροχής σε αυτόν τον κόμβο. Έτσι φτιάχτηκαν 12 αρχεία pattern, ένα για κάθε κόμβο Σ.Μ.Ε.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Ημερομηνία - Ώρα	Multiplier 1	Multiplier 2	Multiplier 3	Multiplier 4	Multiplier 5	Multiplier 6	Multiplier 7	Multiplier 8	Multiplier 9	Multiplier 10	Multiplier 11	Multiplier 12
2	01.05.2021 20:04:00	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
3	01.05.2021 20:09:00	0.79285714	1.00772201	1.01241379	0.94472362	1.18930041	1.02722772	0	1.13090551	1.00094073	0	1.00097561	1.003486318
4	01.05.2021 20:14:00	0.85	0.98841699	0.99724138	0.96231156	1.02572016	1.00247525	0	0.98818898	1	0	0.998536585	1.004648424
5	01.05.2021 20:19:00	0.71428571	1.00772201	0.99586207	0.87520938	1.15534979	0.9950495	0	1.12795276	1	0	1.003414634	1.000573306
6	01.05.2021 20:24:00	0.66428571	0.99227799	0.97103448	1.02847571	1.12962963	1.00247525	0	1.09547244	1.00094073	0	1.001463415	1.00522173
7	01.05.2021 20:29:00	0.71428571	0.996139	0.98344828	0.91541039	1.02674897	0.98762376	0	1.01476378	1.00470367	0	1.002439024	1.003486318
8	01.05.2021 20:34:00	0.78571429	0.96911197	0.96689655	0.92127303	1.16769547	0.96782178	0	1.13287402	0.99529633	0	1	1.003486318
9	01.05.2021 20:39:00	0.80714286	0.93436293	0.93655172	1.06197655	1.031893	0.95544554	0	1.0019685	0.99529633	0	1	1.004648424
10	01.05.2021 20:44:00	0.83571429	0.91891892	0.89517241	0.84338358	1.14506173	0.93069307	0	1.10925197	1.0056444	0	0.997560976	1.010458954
11	01.05.2021 20:49:00	0.90714286	0.86872587	0.87172414	1.06281407	1.12139918	0.92079208	0	1.05807087	1.00752587	0	1.00195122	1.007545942
12	01.05.2021 20:54:00	1.02857143	0.84555985	0.84689655	0.88023451	1.02469136	0.90841584	0	1.00787402	1.0084666	0	0.995609756	1.006972636
13	01.05.2021 20:59:00	0.74285714	0.80694981	0.83172414	0.9120603	1.07613169	0.89108911	0	1.05216535	1.01034807	0	0.99804878	1.006383836
14	01.05.2021 21:04:00	0.74285714	0.81081081	0.80827586	1.03266332	1.07407407	0.88118812	0	1.04035433	1.0028222	0	1.000487805	1.00581053
15	01.05.2021 21:09:00	0.73571429	0.76447876	0.79862069	0.88107203	1.03395062	0.87623762	0	1.03248031	1.0028222	0	0.99804878	1.009296848
16	01.05.2021 21:14:00	0.71428571	0.71814672	0.7862069	0.83500838	1.13888889	0.86138614	0	1.0492126	1	0	0.99902439	1.00581053
17	01.05.2021 21:19:00	0.75	0.69498069	0.79034483	0.98659966	1.12860082	0.84653465	0	1.09055118	1.00376294	0	1.003902439	1.00522173
18	01.05.2021 21:24:00	0.71428571	0.64478764	0.77655172	0.88777219	1.04526749	0.82178218	0	1.0246063	1.00094073	0	0.99804878	1.009870154
19	01.05.2021 21:29:00	0.73571429	0.6023166	0.75448276	0.84924623	1.15843621	0.82920792	0	1.09744094	1.0028222	0	1.00097561	1.004648424
20	01.05.2021 21:34:00	0.66428571	0.57915058	0.74482759	1.0561139	1.10493827	0.80693069	0	1.09153543	1.00188147	0	1	1.002324212
21	01.05.2021 21:39:00	0.61428571	0.56756757	0.73241379	0.9078727	1.02057613	0.78712871	0	0.99114173	1.00470367	0	0.999512195	1.002324212
22	01.05.2021 21:44:00	0.62142857	0.55598456	0.72413793	0.88023451	1.17901235	0.77722772	0	1.12992126	0.99059266	0	1.00097561	1.006383836
23	01.05.2021 21:49:00	0.64285714	0.55598456	0.70896552	1	1.02777778	0.77475248	0	1.00590551	0.9943556	0	1.000487805	1.004059624

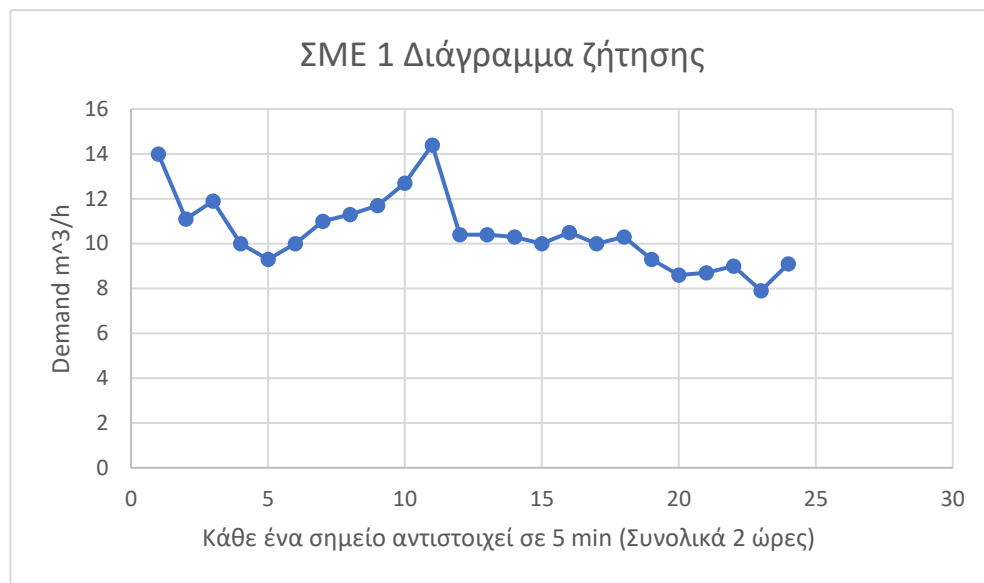
Εικόνα 24: Pattern για όλους τους κόμβους στο excel

Στον πίνακα φαίνεται η αντιστοιχία των αρχείων .PAT σε σχέση με τα Σημεία Μέτρησης κι Ελέγχου.

Όνομα Αρχείου	Σημείο Μέτρησης κι Ελέγχου	Pattern
SME 1	ΣΜΕ1	1
SME 2	ΣΜΕ2	2
SME 3	ΣΜΕ2Α	3
SME 4	ΣΜΕ3	4
SME 5	ΣΜΕ4	5
SME 6	ΣΜΕ5	6
SME 7	ΣΜΕ6	7
SME 8	ΣΜΕ7	8
SME 9	ΣΜΕ8	9
SME 10	ΣΜΕ9	10
SME 11	ΣΜΕ10	11
SME 12	ΣΜΕ11	12

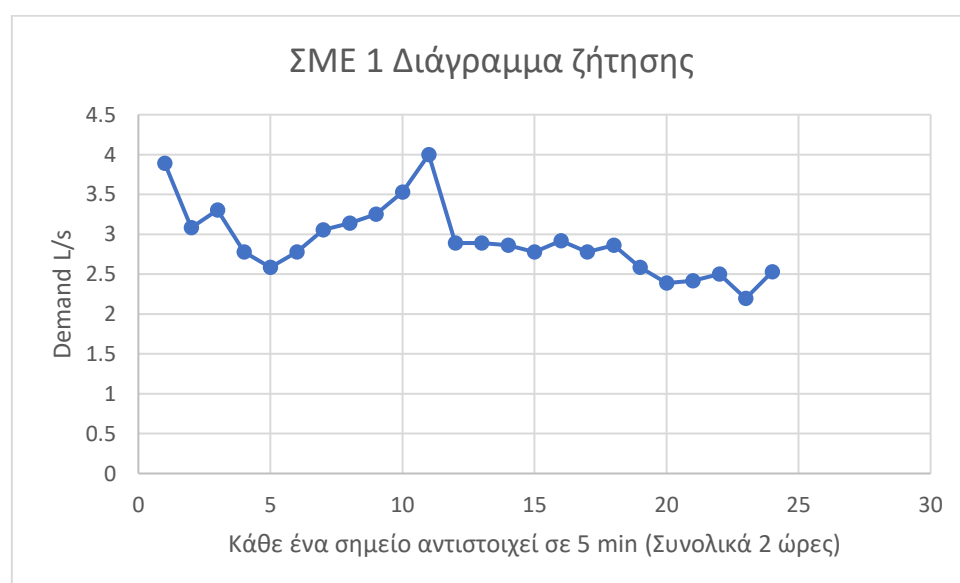
Πίνακας 3: Αντιστοιχία αρχείων PAT με Σ.Μ.Ε. και pattern στο EPANET

Μετά την δημιουργία των pattern αυτά εισήχθησαν στο EPANET και το καθένα ανατέθηκε στον κατάλληλο κόμβο. Συνεπώς οι κόμβοι στο σχεδιασμένο δίκτυο έχουν ίδιο μοτίβο παροχής με το κανονικό δίκτυο. Αυτό γίνεται αντιληπτό κατά την ανάλυση όπως φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα. Το πρώτο διάγραμμα δημιουργήθηκε στο excel με βάση τα δεδομένα της ζήτησης που δόθηκαν για το Σ.Μ.Ε 1. Κάθε σημείο δείχνει την παροχή σε m^3/h σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και η κλίμακα του χρόνου στον οριζόντιο άξονα είναι ανά πέντε λεπτά για συνολικά δύο ώρες.



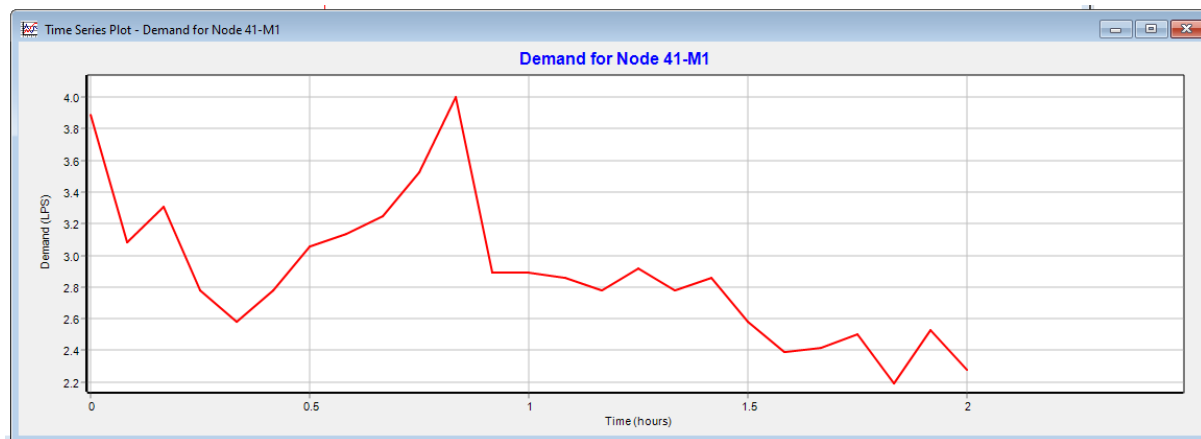
Διάγραμμα 1: Ζήτηση (m^3/h) ως προς τον χρόνο (min) με βάση τα δεδομένα του excel

Το πρόγραμμα όμως έχει Base Demand το οποίο μετράται σε L/s . Για να μετατραπούν τα m^3/h σε L/s πολλαπλασιάστηκαν οι τιμές με $1000/3600$. Το δεύτερο διάγραμμα είναι ίδιο με το πρώτο, αλλά με ζήτηση μετρούμενη σε L/s .



Διάγραμμα 2: Ζήτηση (L/s) ως προς τον χρόνο (min) με βάση τα δεδομένα του excel

Το τρίτο διάγραμμα δημιουργήθηκε στο EPANET και πάλι αναφέρεται στο Σ.Μ.Ε.1. Προέκυψε μετά από ανάλυση του δικτύου για 2h (ώρες) με hydraulic time step 5 λεπτά και pattern time step 5 λεπτά. Ομοίως με το προηγούμενο είναι ένα διάγραμμα της ζήτησης ως προς την παροχή. Παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των δύο διαγραμμάτων που προέκυψαν το ένα από το excel και το άλλο από το EPANET (Διαγράμματα 2 και 3) , η οποία σημαίνει ότι η ζήτηση στο πραγματικό δίκτυο είναι παρόμοια με την ζήτηση στο εικονικό δίκτυο που σχεδιάστηκε.



Διάγραμμα 3: Ζήτηση (L/s) ως προς τον χρόνο (min) με βάση την ανάλυση του δικτύου στο EPANET

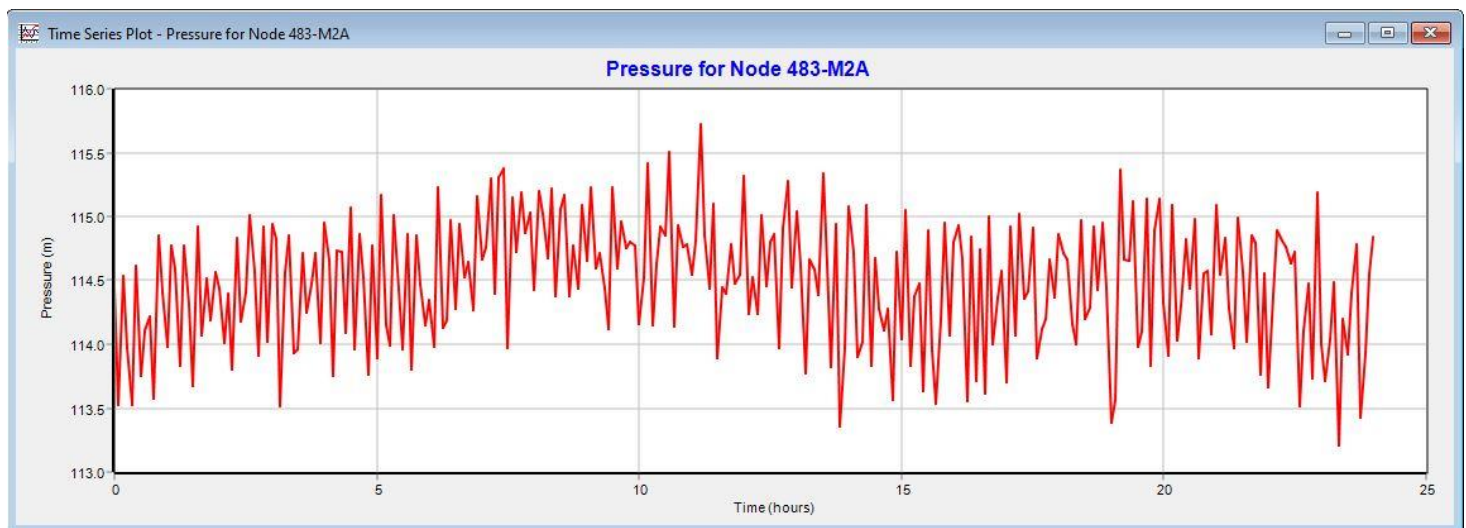
Ανακεφαλαιώνοντας, έχει σχεδιαστεί ένα ψηφιακό δίκτυο με όμοια δομή και γεωμετρία με το πραγματικό και το οποίο κατά την ανάλυση παρουσιάζει την ίδια ζήτηση με το μελετώμενο δίκτυο. Εάν σε αυτό ήταν γνωστή και η τιμή της πίεσης σε έναν τουλάχιστον κόμβο, εκτιμάται πως το σχεδιασμένο αποτελεί το ψηφιακό δίδυμο του υδραυλικού δικτύου που ξεκινά από το φράγμα Αποσελέμη και καταλήγει στην πόλη του Ηρακλείου υπό τις συνθήκες που έχουν οριστεί.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Ανάλυσης

Πραγματοποιήθηκαν, λοιπόν, ενδεικτικά κάποιες αναλύσεις πάνω στο δίκτυο, μία για 24 και κατόπιν 48 ώρες και μία δεύτερη για 720 ώρες ώστε να υπολογιστούν οι πιέσεις σε διάφορα σημεία και να παρακολουθηθεί η συμπεριφορά του δικτύου με βάση τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί. Στην συνέχεια παρατίθενται οι αναλύσεις με τα αποτελέσματά τους. Η πίεση στο Epanet υπολογίζεται σε m(H₂O).

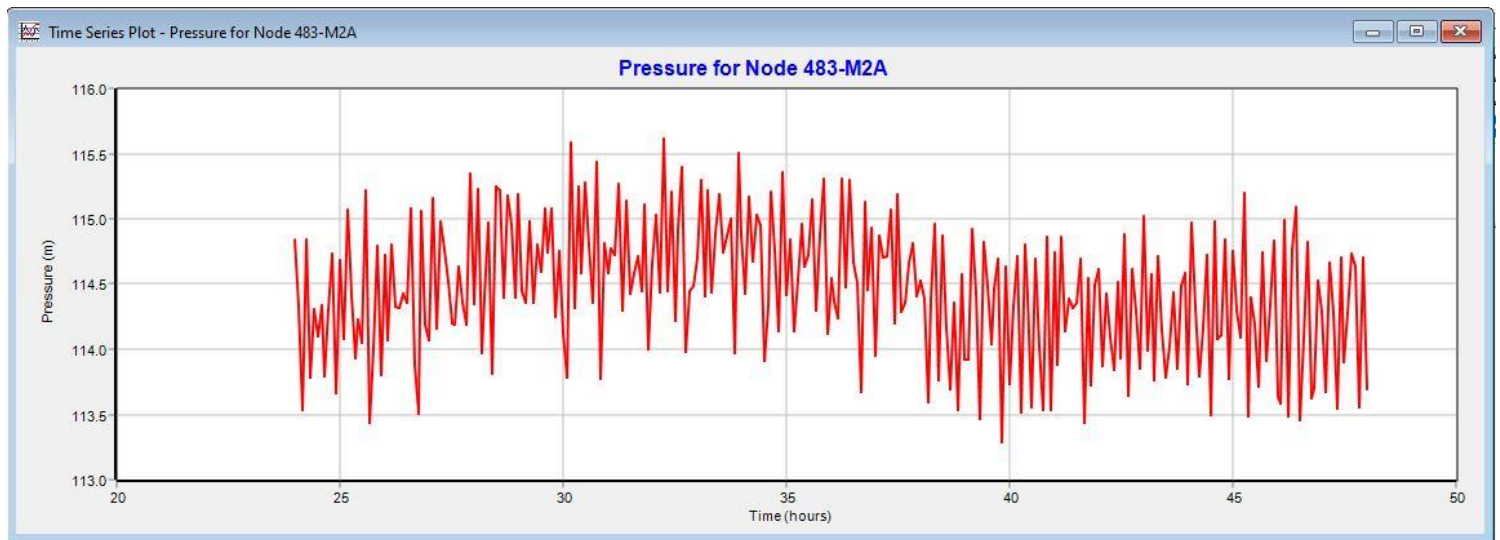
4.1 Αποτελέσματα για έναν κόμβο

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση εικοσιτεσσάρων (24) ωρών ξεκινώντας από τις 01.05.2021 και ώρα 20:04:00 με Hydraulic Time Step, Pattern Time Step και Reporting Time Step πέντε (5) λεπτά. Από αυτήν προέκυψε το επόμενο διάγραμμα σχετικά με την πίεση του Σ.Μ.Ε.2Α.



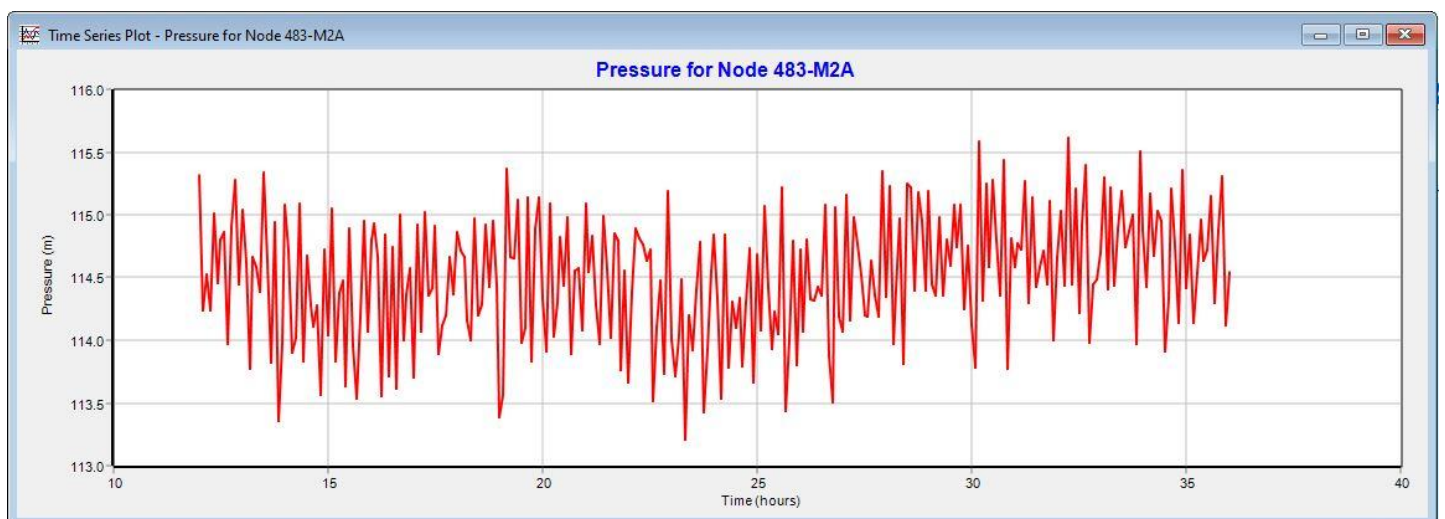
Διάγραμμα 4: Πίεση στον κόμβο M2A ως προς τον χρόνο, ανάλυση 24 ωρών

Στο διάγραμμα 4 φαίνεται η πίεση του κόμβου Σ.Μ.Ε.2Α συναρτήσει του χρόνου για εικοσιτεσσέρις (24) ώρες. Παρατηρείται μία συνεχής μεταβολή της πίεσης, η οποία κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 113 και 116 m(H₂O) περίπου. Η μορφή του διαγράμματος δείχνει ότι στις 8 το απόγευμα που ξεκινά η ανάλυση η πίεση είναι σχετικά χαμηλή στα 113.5 m(H₂O), καθώς υπάρχει μικρότερη ζήτηση. Αντίθετα, στις 12 με 13 ώρες αργότερα (8-9 το πρωί) φαίνεται η ζήτηση να είναι μεγαλύτερη και η πίεση φτάνει στο μέγιστο για τον κόμβο αυτό στα 115.7 m(H₂O). Η ελάχιστη πίεση παρατηρείται στις 14,19 και 23 ώρες μετά την έναρξη της ανάλυσης, δηλαδή στις 10 το πρωί 113.4 m(H₂O), 3 το μεσημέρι 113.4 m(H₂O) και 6 το απόγευμα 113.2 m(H₂O).



Διάγραμμα 5: Πίεση στον κόμβο M2A ως προς τον χρόνο, ανάλυση από τις 24 έως τις 48 ώρες

Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για ένα επιπλέον εικοσιτετράωρο με την συνέχεια του pattern που είναι καταχωρημένο για αυτόν τον κόμβο (συνολικά ανάλυση για 48 ώρες). Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 5 αποτυπώνεται η πίεση για τις ώρες 24-48 της ανάλυσης. Παρατηρείται στις 33 ώρες ανάλυσης μέγιστη πίεση, περίπου ίση με 115.6 m(H₂O), δηλαδή στις 5 το πρωί, ενώ ελάχιστη πίεση παρατηρείται στις 40 ώρες ανάλυσης, στις 12 το μεσημέρι όπου η πίεση είναι περίπου 113.4 m(H₂O).

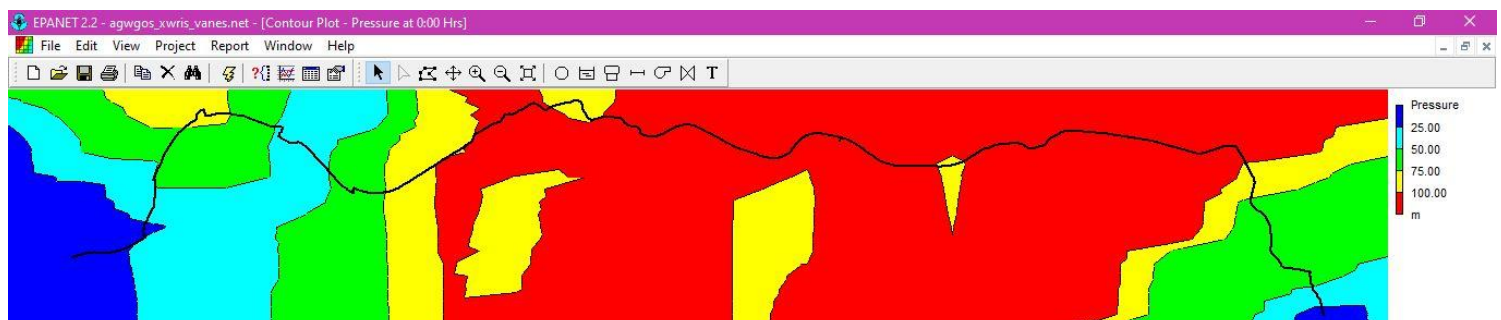


Διάγραμμα 6: Πίεση στον κόμβο M2A ως προς τον χρόνο, ανάλυση από τις 12 έως τις 36 ώρες

Η μελέτη συνεχίστηκε πάνω στην ίδια ανάλυση σαρανταοκτώ (48) ωρών με βάση το pattern που είναι καταχωρημένο για αυτόν τον κόμβο. Στο διάγραμμα 6 φαίνεται η πίεση στον κόμβο M2A από την 12^η μέχρι την 36^η ώρα της ανάλυσης. Μέγιστη πίεση παρατηρείται στις 33 ώρες ανάλυσης όπου η πίεση είναι περίπου 115.6 m(H₂O), δηλαδή στις 5 το πρωί, ενώ ελάχιστη πίεση παρατηρείται στις 23 ώρες ανάλυσης, όπου η πίεση είναι περίπου 113.4 m(H₂O). Το διάγραμμα αυτό μεταξύ άλλων έχει ίδια μορφή και τιμές με τα διαγράμματα 4 και 5 συνενωμένα. Με αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνεται ότι υπάρχει συνέχεια μεταξύ των διαγραμμάτων πιέσεων.

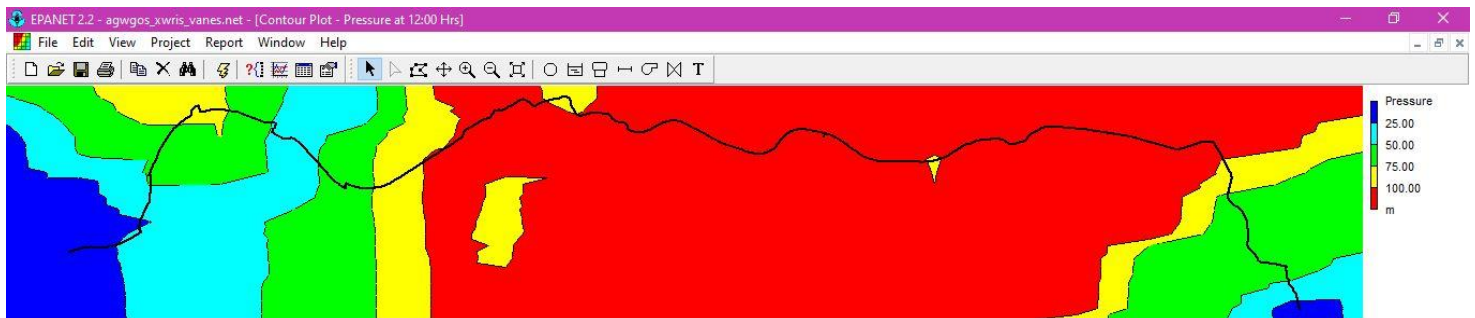
4.2 Αποτελέσματα για όλο το δίκτυο

Στο σενάριο αυτό μελετάται η πίεση για όλο το δίκτυο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, ενώ η ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί για 720 ώρες συνολικά. Οι παρακάτω απεικονίσεις αποτελούν οπτικές παραστάσεις της πίεσης με προεκβολή από την πίεση του δικτύου στις διάφορες θέσεις γύρω από αυτό. Οι πιέσεις φαίνονται με την μορφή χρωμάτων όπως επεξηγείται την κλίμακα. Με μπλε χρωματίζονται οι περιοχές με χαμηλή πίεση από 0 μέχρι 25 m(H₂O), με γαλάζιο οι πιέσεις από 25 m(H₂O) μέχρι 50 m(H₂O) και με πράσινο οι πιέσεις από 50 m(H₂O) μέχρι 75 m(H₂O). Ακόμη, με κίτρινο αποτυπώνονται οι πιέσεις μεταξύ 75 m(H₂O) και 100 m(H₂O), ενώ με κόκκινο οι υψηλές πιέσεις πάνω από 100 m(H₂O).



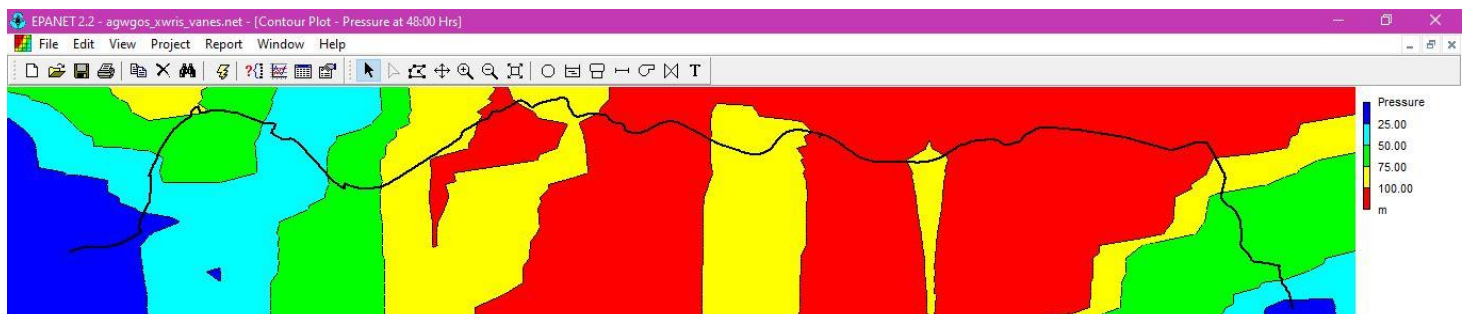
Διάγραμμα 7: Πίεση σε όλο το δίκτυο για την χρονική στιγμή 0:00

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η πίεση σε αυτήν την χρονική στιγμή όπως και στις υπόλοιπες προέρχεται από την διαφορά στατικής (υψομετρικές διαφορές μεταξύ των κόμβων) και δυναμικής πίεσης (ροή και μεταβολές). Το διάγραμμα 7 αφορά την χρονική στιγμή 0:00 της ανάλυσης. Σε αυτό φαίνεται ότι η πίεση είναι χαμηλότερη στα άκρα του δικτύου, δηλαδή πριν το Φ.Μ.Ε.2 και μετά το Φ.Μ.Ε. 6 που είναι χρωματισμένα με μπλε και γαλάζιο. Αντίθετα, τα σημεία με υψηλότερες πιέσεις βρίσκονται στο κέντρο του δικτύου ανάμεσα στα Φ.Μ.Ε.2,2A,3,4,5 και 6 και καταλαμβάνουν μεγάλη περιοχή με κίτρινο και κόκκινο χρώμα.



Διάγραμμα 8: Πίεση για όλο το δίκτυο την χρονική στιγμή 12:00 Hrs

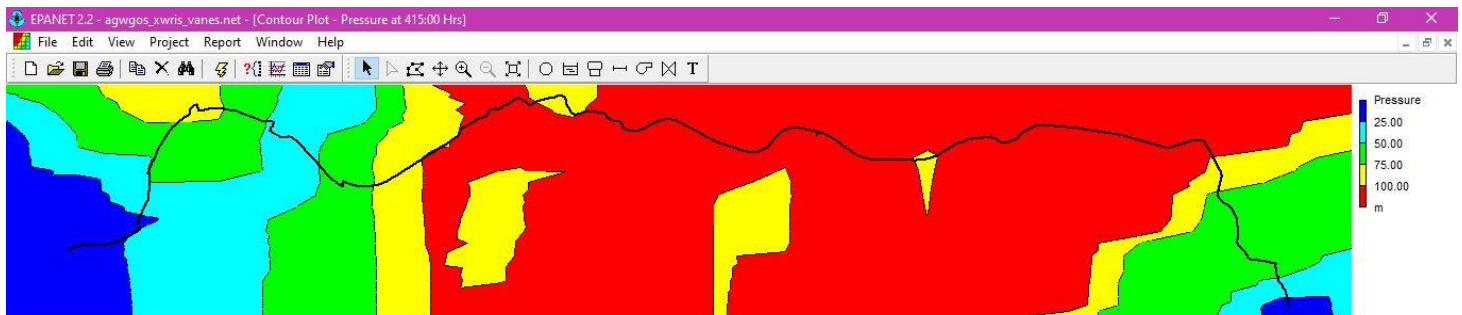
Το διάγραμμα 8 δείχνει την πίεση στα διάφορα σημεία του δικτύου την χρονική στιγμή 12:00 Hrs. Η πίεση στο πρώτο και τελευταίο κομμάτι του δικτύου φαίνεται να παραμένει σταθερή. Οι διαφορές εντοπίζονται σε δύο κομμάτια προς το κέντρο του δικτύου, όπου το ένα βρίσκεται πριν και το άλλο μετά το Φ.Δ.Ε.1. Η πίεση στους κόμβους της περιοχής αυτής παρουσιάζει αύξηση και το χρώμα από κίτρινο έχει μεταβληθεί σε κόκκινο. Οι κόμβοι στα σημεία αυτά πιθανώς θα πρέπει να ερευνηθούν περαιτέρω για κόπωση εφόσον παρουσιάζουν μεταβολές στην πίεση.



Διάγραμμα 9: Πίεση για όλο το δίκτυο την χρονική στιγμή 48:00 Hrs

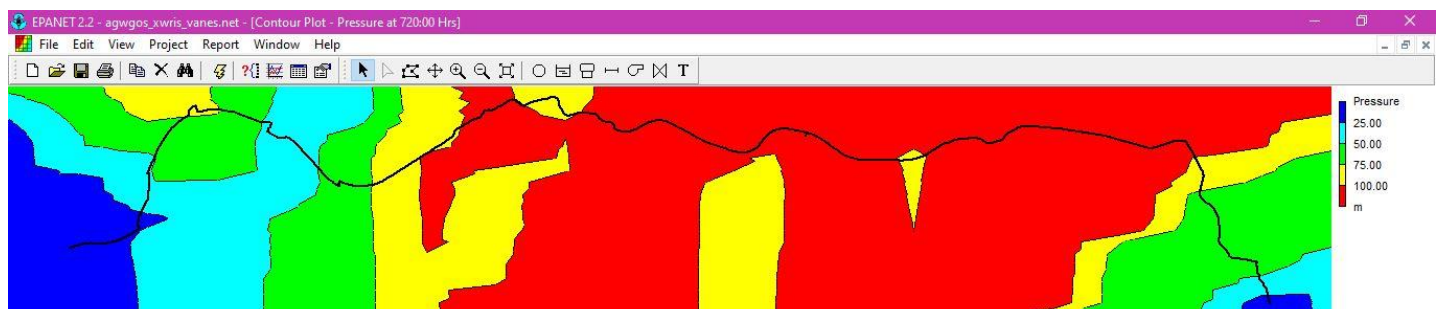
Το διάγραμμα 9 αποτυπώνει την πίεση στα διάφορα σημεία του δικτύου την χρονική στιγμή 48:00 Hrs. Η πίεση στο πρώτο κομμάτι του δικτύου πριν το Φ.Μ.Ε2 φαίνεται να παραμένει σταθερή σε σχέση με τα προηγούμενα διαγράμματα. Προς το μέσο του δικτύου πολλές περιοχές που προηγουμένως είχαν υψηλή πίεση φαίνεται να έχουν διαφοροποιηθεί. Στις δύο μέρες ανάλυσης πολλοί κόμβοι που καταπονούνταν από πιέσεις μεγαλύτερες από 100 m(H₂O) (κόκκινο χρώμα) στις περιοχές από το Φ.Μ.Ε.2 μέχρι το Φ.Μ.Ε. 6 έχουν χρωματιστεί κίτρινες και η πίεση σε αυτές έχει μειωθεί. Ακόμη, στο αριστερό κομμάτι του δικτύου οι πιέσεις έχουν παραμείνει χαμηλές, με τα σημεία όπου υπήρχαν πιέσεις μεγαλύτερες των 75

m(H₂O) να έχουν ελαττωθεί και την πίεση σε αυτούς τους κόμβους να παρουσιάζει ελαφρώς πτωτική τάση.



Διάγραμμα 10: Πίεση για όλο το δίκτυο την χρονική στιγμή 415:00 Hrs

Το διάγραμμα 10 δείχνει την πίεση στα διάφορα σημεία του δικτύου την χρονική στιγμή 415:00 Hrs. Η πίεση στο πρώτο κομμάτι του δικτύου πριν το Φ.Μ.Ε2 φαίνεται παρόμοια με τα προηγούμενα διαγράμματα. Προς το μέσο του δικτύου ανάμεσα στα Φ.Μ.Ε.2 και Φ.Μ.Ε.6 πολλές περιοχές που προηγουμένως είχαν χαμηλότερη πίεση φαίνεται να έχουν διαφοροποιηθεί. Συγκεκριμένα, πολλοί κόμβοι που καταπονούνταν από πιέσεις μικρότερες από 100 m(H₂O) που φαίνονταν με κίτρινο χρώμα έχουν χρωματιστεί κόκκινες και η πίεση σε αυτές παρουσιάζει αύξηση. Το ενδιαμέσο τμήμα του δικτύου εκτιμάται ότι είναι πιο ευαίσθητο ως προς την πίεση και υπάρχουν περισσότερες μεταβολές της πίεσης κατά την διάρκεια του μήνα.



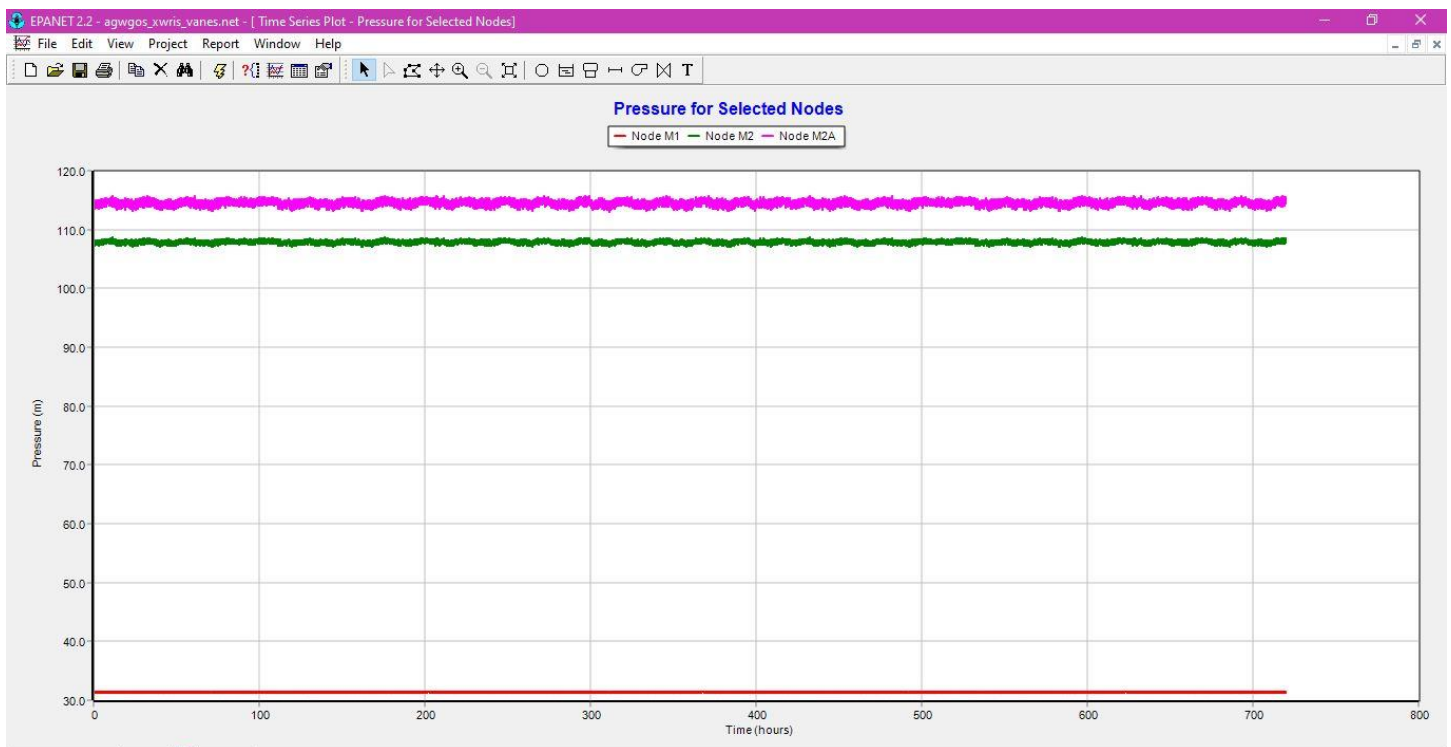
Διάγραμμα 11: Πίεση για όλο το δίκτυο την χρονική στιγμή 720:00 Hrs

Τέλος, το διάγραμμα 11 δείχνει την πίεση στα διάφορα σημεία του δικτύου την χρονική στιγμή 720:00 Hrs. Η πίεση στο πρώτο κομμάτι του δικτύου πριν το Φ.Μ.Ε2 δεν παρουσιάζει έντονες διαφορές καθ' όλη την διάρκεια της ανάλυσης. Προς το μέσο του δικτύου ανάμεσα στα Φ.Μ.Ε.2 και Φ.Μ.Ε.6 πολλές περιοχές διατηρούν την ίδια πίεση σε σχέση με τις 415 Hrs, αλλά εμφανώς αυξημένη σε σχέση με τις 48 ώρες. Στο αριστερό κομμάτι του δικτύου μετά το

Φ.Μ.Ε 6 η πίεση έχει ελαφρώς μειωθεί και σχεδόν για όλους τους κόμβους είναι κάτω από τα 75 m(H₂O).

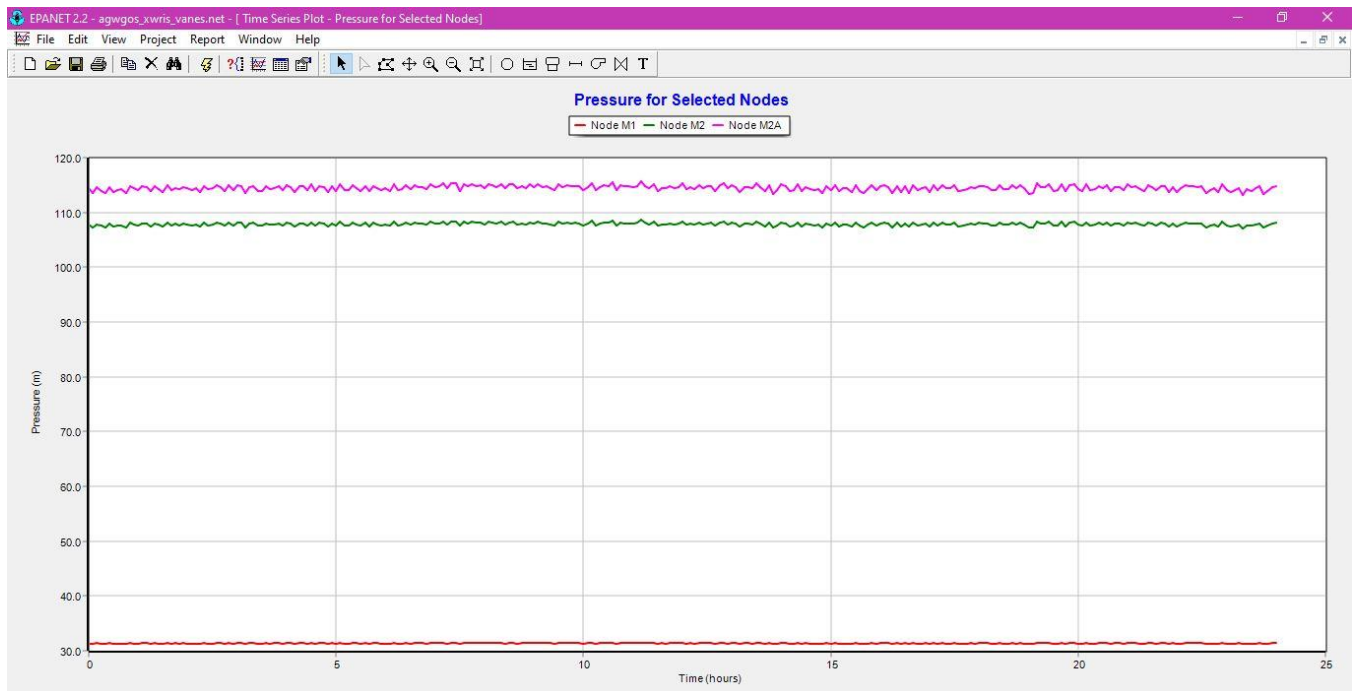
4.3 Αποτελέσματα για περισσότερους κόμβους σε κοινό διάγραμμα

Στο συγκεκριμένο σενάριο αξιοποιήθηκε η δυνατότητα του προγράμματος να παρουσιάζει την πίεση για περισσότερα του ενός σημεία σε κοινό διάγραμμα, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ τους. Για λόγους ευκολίας αυτός ο τρόπος αποτύπωσης εφαρμόστηκε στα Σ.Μ.Ε τα οποία είναι γνωστά, ωστόσο το ίδιο θα μπορούσε να έχει γίνει και για οποιαδήποτε σημεία μέσα στο δίκτυο. Για κάθε περίπτωση κόμβων υπάρχει ανάλυση 720 και 24 ωρών.



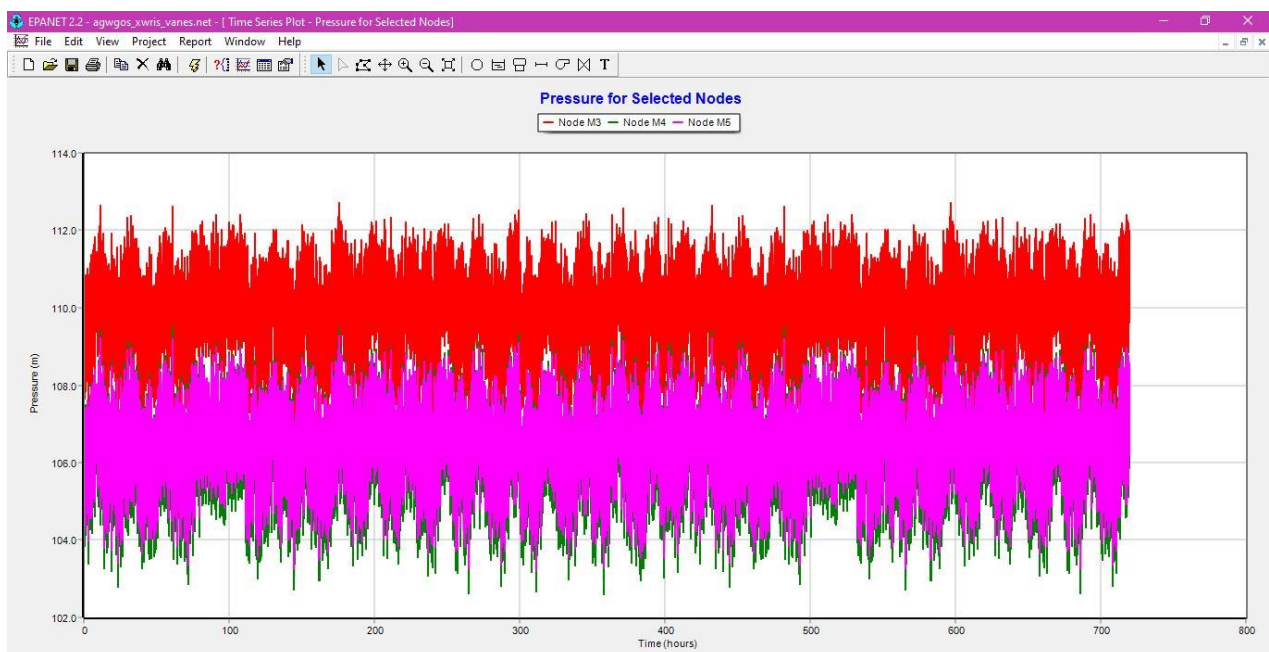
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M1,M2,M2A ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 720 ωρών (ενός μήνα)

Στο παραπάνω διάγραμμα μελετάται η πίεση τριών σημείων, των M1, M2 και M2A για ένα διάστημα ενός μήνα. Κατά την σύγκριση στο ίδιο διάγραμμα παρατηρείται ότι στο M1 η πίεση κινείται κοντά στα 32 m(H₂O), στο M2 κοντά στα 108 m(H₂O) και στο M2A κοντά στα 114 m(H₂O). Επομένως η πίεση στο M2A είναι σαφώς υψηλότερη από τα άλλα δύο σημεία. Ακόμη, εμφανίζονται πιο έντονες μεταβολές της πίεσης στον κόμβο M2A, λιγότερο έντονες μεταβολές στον κόμβο M2, ενώ στον κόμβο M1 δεν παρατηρούνται έντονες μεταβολές και η γραφική για διάστημα ενός μήνα φαίνεται σαν ευθεία γραμμή. Η παρατήρηση αυτή βασίζεται στην πυκνότητα και το πλάτος της γραφικής για κάθε κόμβο.



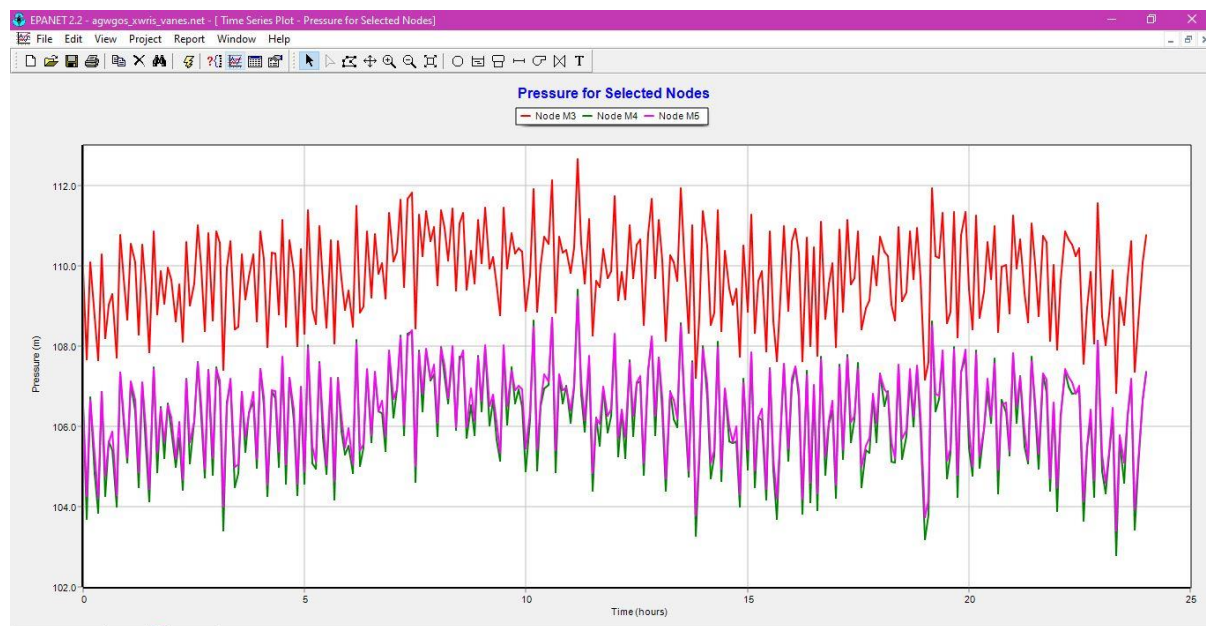
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M1,M2,M2A ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 24 ωρών

Το διάγραμμα 13 αποτυπώνει την πίεση σε τρία σημεία, το M1, το M2 και το M2A για διάστημα μίας μέρας. Είναι παρόμοιο με το προηγούμενο διάγραμμα και οι πληροφορίες που λαμβάνονται είναι ίδιες με πριν. Βεβαίως η ακρίβεια είναι πολύ μεγαλύτερη από το διάγραμμα 12, καθώς φαίνονται οι κορυφές και κοιλάδες των διαγραμμάτων από την μεταβολή της πίεσης και η γραφική για τον κόμβο M1 γίνεται αντιληπτό ότι δεν είναι ευθεία γραμμή.



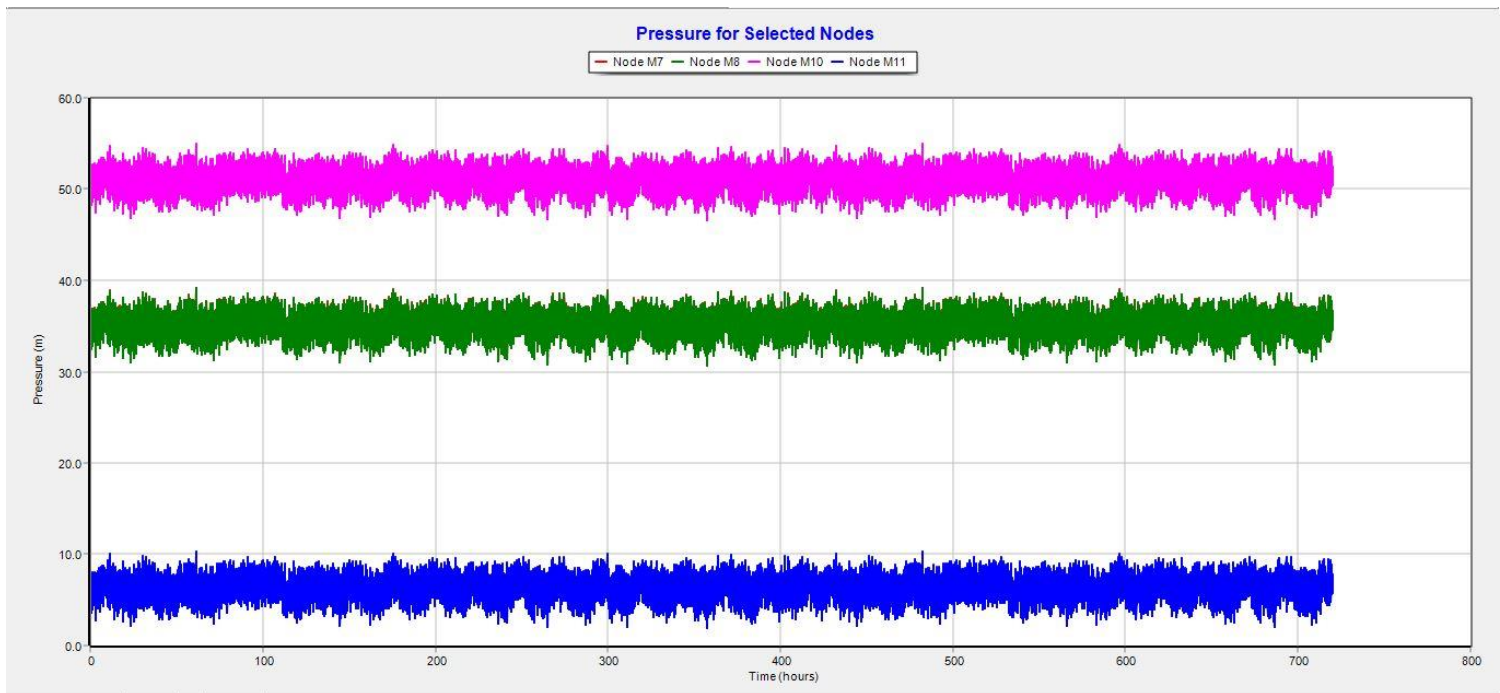
Διάγραμμα 14: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M3,M4,M5 ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 720 ωρών

Σύμφωνα με το διάγραμμα 14 η πίεση για τον κόμβο M3 κυμαίνεται από 107 έως 113 m(H₂O) και για τους κόμβους M4 και M5 από 103 έως 109 m(H₂O). Είναι φανερό ότι οι κόμβοι M4 και M5 παρουσιάζουν παρόμοιες πιέσεις και διακυμάνσεις της πίεσης και οι τιμές στις πιέσεις τους είναι λίγο χαμηλότερες σε σχέση με τις πιέσεις στον κόμβο M3. Και τα τρία σημεία ωστόσο εμφανίζουν υψηλές πιέσεις.



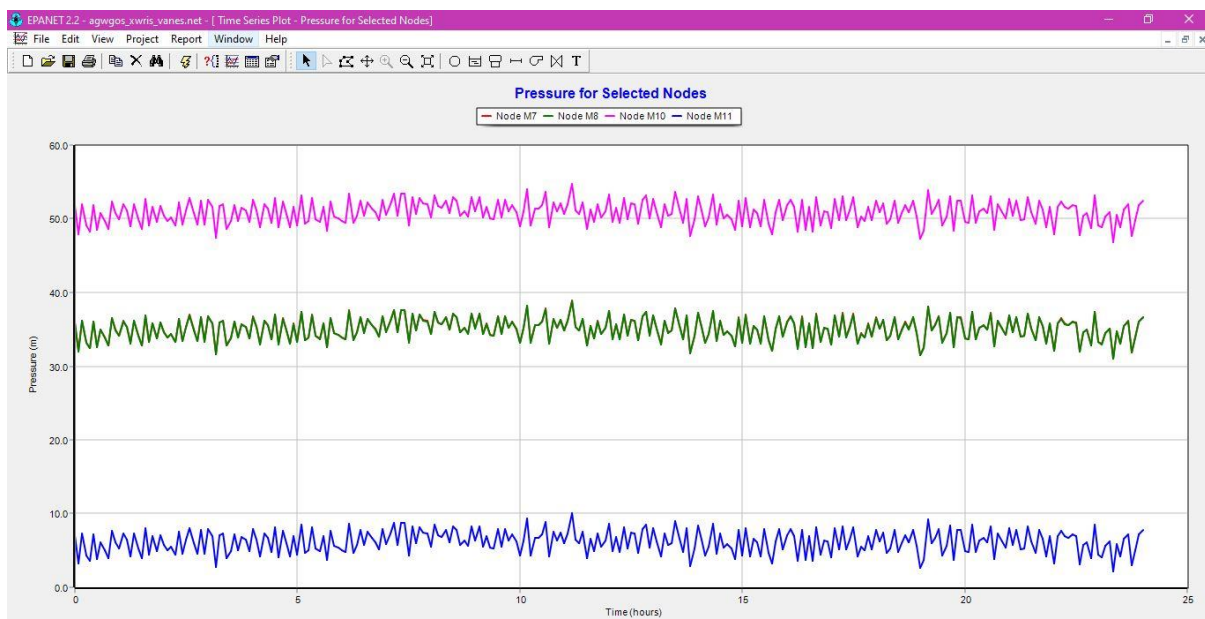
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M3,M4,M5 ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 24 ωρών

Από το διάγραμμα 15 αντλούνται πληροφορίες σχετικά με τις μεταβολές των πιέσεων στα M3,M4 και M5 για ανάλυση μίας μέρας. Και για τα τρία σημεία οι πιέσεις παράγουν διάγραμμα παρόμοιας μορφής, με την διαφορά ότι ο κόμβος M3 παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές πιέσεων. Μέγιστη πίεση για τον κόμβο M3 είναι στα 113 m(H₂O) και ελάχιστη παρουσιάζεται στα 107 m(H₂O) κατά προσέγγιση. Αντίστοιχα, για τα σημεία M4 και M5 προσεγγιστικά μέγιστη πίεση είναι τα 109.5 m(H₂O) και ελάχιστη τα 103 m(H₂O). Συνολικά και τα τρία σημεία εμφανίζουν μικρές μεταβολές πίεσης. Επιπλέον, το παρόν διάγραμμα δεν διαφέρει τόσο από το προηγούμενο ως προς την μορφή, αλλά είναι πιο ακριβές και οι τιμές πιο ευδιάκριτες.



Διάγραμμα 16: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M7,M8,M10 και M11 ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 24 ωρών

Το διάγραμμα 16 αποτυπώνει την μεταβολή της πίεσης ως προς τον χρόνο για τους κόμβους M7,M8,M10 και M11. Βέβαια, ο κόμβος M7 αλληλεπικαλύπτεται με τον M8 επομένως έχουν τις ίδιες μεταβολές στις πέσεις. Υψηλότερες πιέσεις παρουσιάζει ο κόμβος M10, έπειτα οι κόμβοι M7 και M8 και τέλος ο κόμβος M11 όπου παρατηρούνται χαμηλές τιμές της πίεσης. Ως προς τις μεταβολές το διάγραμμα αυτό είναι αρκετά πυκνό και δεν γίνεται να προσδιοριστούν.



Διάγραμμα 17: Διάγραμμα πίεσης των σημείων M7,M8,M10 και M11 ως προς τον χρόνο σε ανάλυση διάρκειας 24 ωρών

Το διάγραμμα 17 δίνει πληροφορίες σχετικά με την μεταβολή της πίεσης στους κόμβους M7, M8, M10 και M11 για ανάλυση μίας μέρας. Ο κόμβος M10 παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές πιέσεων που κυμαίνονται γύρω από τα 60 m(H₂O). Αντίστοιχα, για τα σημεία M7 και M8 όπου οι γραφικές παραστάσεις αλληλεπικαλύπτονται η πίεση μεταβάλλεται αλλά βρίσκεται κοντά στα 35 m(H₂O). Τέλος, το M11 έχει πιέσεις που μεταβάλλονται με τιμές κοντά στα 5m. Συνολικά και τα τρία σημεία εμφανίζουν μικρές μεταβολές πίεσης. Το διάγραμμα αυτό δίνει τα στοιχεία με μεγαλύτερη λεπτομέρεια από το προηγούμενο, αλλά η μορφή τους είναι παρόμοια.

Κεφάλαιο 5: Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα βασικά σημεία και συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής. Αρχικά, για την διεκπεραίωση της εργασίας ήταν απαραίτητο να γίνει μία έρευνα γύρω από τα ψηφιακά δίδυμα ως απόρροια του φαινομένου Industry 4.0 και να δοθεί έμφαση στην σπουδαιότητα της εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων σε υδραυλικά δίκτυα υπό πίεση όπως αυτό που μελετήθηκε. Έγινε μία πρώτη περιγραφή του υδραυλικού δικτύου που ξεκινά από το φράγμα Αποσελέμη και καταλήγει στην πόλη του Ηρακλείου και δόθηκαν πληροφορίες γύρω από το EPANET, το λογισμικό το οποίο επιλέχθηκε για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση.

Στην συνέχεια, έγινε αντιληπτό ότι για να σχεδιαστεί ένα ψηφιακό δίδυμο που θα προσομοιάζει στο υπάρχον υδραυλικό δίκτυο ήταν απαραίτητα τρία βήματα. Το πρώτο βήμα ήταν η ακριβής αποτύπωση του πραγματικού δικτύου στο EPANET, δηλαδή η σχεδίαση των κόμβων και του αγωγού, η εισαγωγή των αποστάσεων, των υψομετρικών διαφορών ανάμεσα στους κόμβους και των διαμέτρων του αγωγού. Όλα αυτά πραγματοποιήθηκαν με βάση τα σχέδια του δικτύου ύδρευσης που δόθηκαν από τους μηχανικούς και ακολουθώντας πιστά την δομή και τον τρόπο λειτουργίας του, πάντα με βάση τις δυνατότητες των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Το δεύτερο βήμα ήταν η σύνδεση του εικονικού δικτύου με το πραγματικό. Αυτό επιτεύχθηκε με την αξιοποίηση των δεδομένων που δόθηκαν από τους μηχανικούς του δικτύου σε μορφή μετρήσεων παροχής για διάφορα σημεία του δικτύου. Από τα αρχεία επιλέχθηκαν οι μετρήσεις για τον Μάιο του 2021 για να αξιοποιηθούν στο εικονικό δίκτυο. Τα δεδομένα αυτά μετατράπηκαν σε pattern και ανατέθηκαν στους αντίστοιχους κόμβους στο σχεδιασμένο δίκτυο, ώστε να καθορίσουν την ζήτηση των κόμβων που χρειάζεται το πρόγραμμα για την ανάλυση. Παράλληλα, προστέθηκαν δύο δεξαμενές, ένα reservoir στην αρχή και tank στο τέλος του δικτύου. Τελευταίο βήμα ήταν η σύγκριση της ζήτησης του πραγματικού δικτύου από τις μετρήσεις σε σχέση με την ζήτηση που εμφανίζει το σχεδιασμένο δίκτυο κατά την ανάλυση. Μετά από σχεδίαση των σχετικών διαγραμμάτων φαίνεται ότι η ζήτηση των δύο δικτύων παρουσιάζει ομοιότητα και εφόσον η υδραυλική πίεση στο reservoir είναι ίση με την πραγματική εκτιμάται ότι το εικονικό δίκτυο αποτελεί ψηφιακό δίδυμο του δικτύου ύδρευσης Ηρακλείου που ξεκινά από το φράγμα Αποσελέμη. Επομένως, προσαρμόζοντας και αλλάζοντας τα μοτίβα της ζήτησης είναι δυνατό το εικονικό να ακολουθεί την συμπεριφορά του πραγματικού δικτύου.

Τέλος, ακολούθησαν ορισμένα παραδείγματα αναλύσεων στο EPANET τα αποτελέσματα των οποίων αποτυπώθηκαν με την μορφή διαγραμμάτων μεταβολής της πίεσης ως προς το χρόνο για έναν ή περισσότερους κόμβους, ακόμα και για όλο το δίκτυο συνολικά. Το συμπέρασμα από αυτά τα αποτελέσματα ήταν ότι κατά την δημιουργία διαγραμμάτων για μελέτη πίεσης σε κόμβους είναι προτιμότερο τα διαγράμματα να μελετούν μικρότερα χρονικά διαστήματα προς επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας. Άλλο συμπέρασμα ήταν ότι από τα

δεδομένα πιέσεων που υπολογίστηκαν μπορεί να γίνει σύγκριση με πραγματικά δεδομένα πιέσεων. Εφόσον τα δεδομένα κριθούν αξιόπιστα είναι εφικτός ο εντοπισμός σημείων που παρουσιάζουν υψηλή πίεση ή και έντονες μεταβολές στην πίεση οπουδήποτε και εάν αυτά βρίσκονται στο δίκτυο και ανεξάρτητα αν υπάρχει ή όχι μετρητικό όργανο στις θέσεις αυτές. Σε επέκταση του προηγούμενου είναι εφικτή η παρατήρηση της συμπεριφοράς επικίνδυνων σημείων και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς σημείων ή και ολόκληρου του δικτύου σε μελλοντικά υποθετικά σενάρια. Στο μέλλον μέσα από τα υποθετικά σενάρια είναι δυνατό να προβλεφθούν οι τάσεις, η κόπωση του υλικού ή η δημιουργία διαρροών.

Πηγές εικόνων

- [1] Εικόνα 1: Dr Mark van Rijmenam, 13/04/2022,
<https://www.thedigitalspeaker.com/digital-twins-building-block-metaverse/>
- [2] Εικόνα 2: Bentley Systems
- [3] Εικόνα 3: <https://oakae.gr/i-etairia/>
- [4] Εικόνα 4: Αγαπάκη Μαρία, Φράγμα Αποσελέμη: Μπορεί να υπερχειλίσει σε 10 μέρες, 11/02/2019,
<https://www.neakriti.gr/article/kriti/1535332/se-10-meres-borei-na-uperheilisei-o-aposelemis-pano-apo-15-ekatommuria-kuvika-nerou/>
- [5] Εικόνα 5,6: ‘Κρήτη: Ξενάγηση στο εντυπωσιακό φράγμα Αποσελέμη (βίντεο)’. *Νέα Κρήτη*, 04/01/2022
<https://www.neakriti.gr/article/kriti/1642359/kriti-xenagisi-sto-eduposiako-fragmento-aposelemi-video/>.
- [6] Εικόνα 7: Κατερίνα Πολύζου, Χανιά: Στον ΟΑΚ η επεξεργασία νερού του Αποσελέμη, 20/12/2021
<https://www.ertnews.gr/perifereiakoi-stathmoi/chania/chania-o-oak-analamvanti-ti-litourgia-tis-egkatastasis-epexergasias-nerou-tou-aposelemi/>
- [7] Εικόνα 8: ‘Κρήτη: Ξενάγηση στο εντυπωσιακό φράγμα Αποσελέμη (βίντεο)’. *Νέα Κρήτη*, 4/01/2022, <https://www.neakriti.gr/article/kriti/1642359/kriti-xenagisi-sto-eduposiako-fragmento-aposelemi-video/>.
- [8] Εικόνα 9: OWA-EPANET Toolkit
http://wateranalytics.org/EPANET/ data_model.html
- [9] Εικόνα 10: U.S. EPA , EPANET 2.2.0: An EPA And Water Community Collaboration, 23/06/2020
<https://www.wateronline.com/doc/epanet-an-epa-and-water-community-collaboration-0001>

- [10] Εικόνες 11-16,22: Δεδομένα του δικτύου Μιχαήλ Μανιός, Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός, Μηχανικός Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης στο υδραγωγείο Αποσελέμη.
- [11] Εικόνα 17: Δεδομένα του δικτύου Μιχαήλ Μανιός, Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός, Μηχανικός Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης στο υδραγωγείο Αποσελέμη, προσωπική επεξεργασία

Βιβλιογραφία-Δικτυογραφία

- [12] Ρεντούμης Ι. (2018). INDUSTRY 4 : Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
- [13] Zongyan Wang. (2020). Digital Twin Technology.
- [14] Forbes. What Is Digital Twin Technology - And Why Is It So Important? <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twintechology-and-why-is-it-so-important/?sh=4580f8352e2a>
- [15] Aaron Parrott & Lane Warshaw. Industry 4.0 and the digital twin. Deloitte University. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/kr/Documents/insights/deloittenewsletter/2017/26_201706/kr_insights_deloitte-newsletter-26_report_02_en.pdf
- [16] *What Is Industry 4.0 and How Does It Work? / IBM.* <https://www.ibm.com/topics/industry-4-0> . Ημερομηνία πρόσβασης 8/10/ 2022.
- [17] Phanden, Rakesh Kumar, κ.ά. ‘A Review on Simulation in Digital Twin for Aerospace, Manufacturing and Robotics’. *Materials Today: Proceedings*, τ. 38, 2021, σσ. 174–78. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.446>.
- [18] Grieves, Michael. Origins of the Digital Twin Concept. 2016. DOI.org (Datacite), <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.
- [19] Σταυρουλάκης , Γεώργιος Ε. *Computational mechanics for digital twin*.
- [20] Xie, Jiacheng, κ.ά. ‘Virtual Monitoring Method for Hydraulic Supports Based on Digital Twin Theory’. *Mining Technology*, τ. 128, τχ. 2/04/ 2019, σσ. 77-87. DOI.org (Crossref),

<https://doi.org/10.1080/25726668.2019.1569367>.

- [21] Conejos Fuertes, P., κ.ά. ‘Building and Exploiting a Digital Twin for the Management of Drinking Water Distribution Networks’. *Urban Water Journal*, τ. 17, τχ. 8, 9/2020, σσ. 704–13. *DOI.org (Crossref)*,
<https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1771382>.
- [22] Mmuo, Charity. *Application of Digital Twin to Zagreb’s Water Distribution Network - Structville*. 23 /07/2022,
<https://structville.com/digital-twin-in-water-distribution-zagreb>.
- [23] *Οικολογική Παροχή Ποταμού - Οδηγία 2000/60/EK*. 15/02/2021,
<https://www.waterresourcesengineering.com/%cf%86%cf%81%ce%ac%ce%b3%ce%bc%ce%b1%cf%84%ce%b1/%ce%bf%ce%b9%ce%ba%ce%bf%ce%bb%ce%bf%ce%b3%ce%b9%ce%ba%ce%ae-%cf%80%ce%b1%cf%81%ce%bf%cf%87%ce%ae/>.
- [24] *Υδρευση Ηρακλείου – Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη – Εργασίες εκτροπής μεταφοράς υδάτων και κατασκευής αγωγών και διυλιστηρίων – ΟΑΚΑΕ*.
<https://oakae.gr/erga-ypodomon/ydravlika-erga/ydrefsi-irakleiou-ag-nikolaou-apo-to-fragma-aposelemi-ergasies-ektropis-metaforas-ydaton-kai-kataskevis-agogon-kai-diylistirion/>. Ημερομηνία πρόσβασης 7 /10/ 2022.
- [25] TREMOPOULOS, Michail. *Κοινοβουλευτική ερώτηση | Υδρευση των πόλεων του Ηρακλείου και του Αγίου Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη στην Κρήτη | Ε-1484/2010 | Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο*.

https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-7-2010-1484_EL.html.

Ημερομηνία πρόσβασης 7/10/ 2022.

- [26] Έργα Αποσελέμη – ΟΑΚΑΕ. <https://oakae.gr/portfolio-item/erga-aposelemi/>.

Ημερομηνία πρόσβασης 9 /10/ 2022.

- [27] ‘Κρήτη: Ξενάγηση στο εντυπωσιακό φράγμα Αποσελέμη (βίντεο)’. *Νέα Κρήτη*, 4/01/2022, <https://www.neakriti.gr/article/kriti/1642359/kriti-xenagisi-sto-eduposiako-fragmento-aposelemi-video/>.

- [28] US EPA, ORD. *EPANET*. 24/06/ 2014,

<https://www.epa.gov/water-research/epanet>.

- [29] US EPA, ORD. *EPANET 2.2.0: An EPA and Water Community Collaboration*. 22/06/ 2020,

<https://www.epa.gov/sciencematters/epanet-220-epa-and-water-community-collaboration>.

- [30] *EPANET*. <http://epanet.de/>. Ημερομηνία πρόσβασης 9/10/ 2022.

- [31] *Μηκοτομή - Τοπογραφικό Σχέδιο*.

<https://sites.google.com/site/topographikoschedio423/enoteta-3/ypoenoteta-5>.

Ημερομηνία πρόσβασης 10/10/ 2022.

- [32] *Οριζοντιογραφία - Τοπογραφικό Σχέδιο*.

<https://sites.google.com/site/topographikoschedio423/enoteta-3>.

Ημερομηνία πρόσβασης 7 /11/ 2022.

- [33] Ζαφειρόπουλος Α.Ε. Υπηρεσίες Ασφάλειας & Ελέγχου. Φράγμα Αποσελέμη Ηρακλείου Κρήτης.

<https://zarifopoulos.com/portfolio/security-systems-aposelemis/>

- [34] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος. Γεωτεχνικά θέματα του φράγματος Αποσελέμη Κρήτης.
<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teclar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/1.5.pdf>
- [35] Υπουργείο Ανάπτυξης Ανταγωνιστικότητας Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων, Δ6 Διεύθυνση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης, Εισήγηση « Ύδρευση Ηρακλείου και ΑΓ. Νικολάου από το Φράγμα Αποσελέμη » Κοτσώνης Α., Διευθυντής Δ6/ΓΓΔΕ, Αθήνα 2013
- [36] Καραβαλάκης Ι., Αγριανά 2006, « Ο Ποταμός Αποσελέμη »
- [37] Lewis A. Rossman, Hyoungmin Woo, Michael Tryby, Feng Shang, Robert Janke, Terranna Haxton, EPANET USERS MANUAL, Release 2.2