



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



Industrial
Energy
Environmental
Systems
Laboratory

«Έξυπνα Υδατικά Δίκτυα και Ενεργειακή Αυτονομία:
Η Προοπτική της Αειφόρου Διαχείρισης για Αποδοτική
Χρήση Υδάτινων Πόρων»

«Smart Water Networks and Energy Autonomy:
The Prospect of Sustainable Management for Efficient
Use of Water Resources»

Αισώπου Χριστίνα

A.M. 2017010116

Επιβλέπων καθηγητής:
Σπυρίδων Παπαευθυμίου

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Χανιά, Σεπτέμβριος 2025

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση Υδατικών Δικτύων, καθώς δίνεται έμφαση στην αποδοτική διαχείριση και στις προκλήσεις που προκύπτουν από την αυξημένη ζήτηση αλλά και τη μέχρι τώρα διαχείριση των υδάτινων πόρων. Ένας βασικός στόχος είναι η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και των αυξομειώσεων στην κατανάλωσή του, σε διάστημα ενός χρόνου, καθώς και η ανίχνευση διαρροών με σκοπό τη μείωση απωλειών μέσα στο Υδατικό Δίκτυο, με τη χρήση συστημάτων IoT. Μέσω ανάλυσης των δεδομένων που δίνονται από τη μελέτη ενός Υδατικού Δικτύου, προτείνονται τρόποι για την βελτίωση της αποδοτικότητας και έτσι την βέλτιστη λειτουργία, καθώς και την μακροχρόνια βιωσιμότητα των Υδατικών Δικτύων. Συγκεκριμένα, μελετάται η υδραυλική συμπεριφορά του βαρυτικού δικτύου της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου, πως επηρεάζεται από τη ζήτηση νερού, το υψόμετρο των υδρομέτρων και τις συνθήκες των δεξαμενών. Γίνεται προσομοίωση εύρεσης διαρροών αλλά και μοντελοποίηση για την ποιότητα του νερού που παρέχει το δίκτυο, μέσω διαδικασίας χλωρίωσης και εύρεσης της ηλικίας του νερού. Με βάση τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης, δίνεται η δυνατότητα, μέσω νέων τεχνολογιών, για προσπάθεια επίτευξης μιας αποδοτικότερης διαχείρισης υδάτινων πόρων.

Abstract

The analysis and optimization of Water Networks are the focus of this thesis, as emphasis is placed on efficient management along with the challenges arising from the increased demand and the current way of managing water resources. With the use of advanced IoT systems a key objective is the monitoring of water quality and the fluctuations in its consumption over the course of a year, as well as the detection of leaks which will result in the reduction of damage within the Water Network. By analyzing the data given by a water network study, arise ways to improve efficiency and thus optimal operation, as well as the long-term sustainability of Water Networks. Specifically, the hydraulic behavior of the gravitational water network of the old city of Heraklion is studied, how it is affected by water demand, the altitude of its water meters and the conditions of the water tanks. Leak detection simulations and modeling of the quality of the water supplied by the network are carried out and based on the results of the above study ways to use new technologies that enable more efficient water resources management are proposed.

Περιεχόμενα

<i>Εισαγωγή.....</i>	<i>9</i>
<i>1. Χρήση συστημάτων IoT σε δίκτυα ύδρευσης</i>	<i>10</i>
1.1 Τι είναι το Διαδίκτυο των πραγμάτων IoT	10
1.2 Συστήματα IoT σε υδατικά δίκτυα	11
<i>2. Το λογισμικό Watergems</i>	<i>13</i>
2.1 Μεθοδολογία προσομοίωσης και μελέτης σε πειραματικά δίκτυα ύδρευσης	19
2.1.1 Ζώνη 1.....	20
2.1.1.1 Προσομοίωση εύρεσης διαρροών στη Ζώνη 1	25
2.1.2 Ζώνη 2.....	26
2.1.2.1 Προσομοίωση εύρεσης διαρροών στις Ζώνες 1 & 2	28
2.1.3 Ζώνη 3.....	30
2.1.3.1 Προσομοίωση εύρεσης διαρροών στις Ζώνες 1, 2 & 3	34
2.1.4 Ζώνη 4.....	35
2.1.4.1 Προσομοίωση εύρεσης διαρροών στις Ζώνες 1, 2, 3 & 4.....	39
<i>3. Το υδατικό δίκτυο της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου.....</i>	<i>41</i>
3.1. Παρουσίαση και μελέτη του δικτύου στο λογισμικό WaterGems.....	42
3.2. Εντοπισμός διαρροών με χρήση του Darwin Calibrator	52
3.3. Μοντελοποίηση ποιότητας νερού	55
<i>Συμπεράσματα</i>	<i>59</i>
<i>Βιβλιογραφία</i>	<i>61</i>

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1 Internet of Things

Εικόνα 1.2 Τα 4 βασικά στάδια του δικτύου των πραγμάτων

Εικόνα 1.3 IoT συσκευές υδατικά δίκτυα

Εικόνα 2.1 Απεικόνιση πιθανών θέσεων με διαρροή στο WaterGEMS

Εικόνα 2.2 Η αρχιτεκτονική SCADA

Εικόνα 2.3 Εισαγωγή δεδομένων στο ModelBuilder

Εικόνα 2.4 Άδεια εκπαιδευτικής έκδοσης του WaterGEMS

Εικόνα 2.5 Εισαγωγή του αρχείου Excel στο ModelBuilder

Εικόνα 2.6 Απεικόνιση του δικτύου της Ζώνης 1

Εικόνα 2.7 Μέση ημερήσια ζήτηση

Εικόνα 2.8 Ημερήσιο pattern κατανάλωσης ανά ώρα

Εικόνα 2.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροών στο δίκτυο της Ζώνης 1

Εικόνα 2.10 Πιθανοί κόμβοι διαρροών στις 4 π.μ.

Εικόνα 2.11 Απεικόνιση του δικτύου μετά την προσθήκη της Ζώνης 2

Εικόνα 2.12 Μέση ημερήσια ζήτηση στις δύο ζώνες

Εικόνα 2.13 Πιθανότητα διαρροής στον κόμβο J-9

Εικόνα 2.14 Αλλαγές στη ροή του δικτύου μετά από δοκιμή αντοχής στον κόμβο J-6

Εικόνα 2.15 Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροών με ή χωρίς τιμές ζήτησης στη Ζώνη 2

Εικόνα 2.16 Απεικόνιση του δικτύου μετά την προσθήκη της Ζώνης 3

Εικόνα 2.17 Μέση ημερήσια ζήτηση στις 3 ζώνες του δικτύου

Εικόνα 2.18 Τα τρία pattern κατανάλωσης για κάθε ζώνη

Εικόνα 2.19 Η θέση των αγωγών στο δίκτυο

Εικόνα 2.20 Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροών από το Darwin Calibrator

Εικόνα 2.21 Αποτελέσματα του συντελεστή εκπομπής που έδωσε το Darwin

Εικόνα 2.22 Απεικόνιση του δικτύου με τις 4 ζώνες

Εικόνα 2.23 Ημερήσιο pattern ανά ώρα για την Ζώνη 4

Εικόνα 2.24 Τιμές ζήτησης για τις τέσσερις ζώνες

Εικόνα 2.25 Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροών από το Darwin Calibrator

Εικόνα 2.26 Αποτελέσματα του συντελεστή εκπομπής που έδωσε το Darwin Calibrator

Εικόνα 2.27 Σενάριο διαρροής στις 4 π.μ. για τις τέσσερις ζώνες

(α) Zoom στην περιοχή διαρροών της Ζώνης 4

(β) Zoom στην περιοχή διαρροών για τις Ζώνες 1&2

Εικόνα 3.1 Η πόλη του Ηρακλείου

Εικόνα 3.2 Το φράγμα Αποσελέμη

Εικόνα 3.3 Υδατικό δίκτυο της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου στο λογισμικό WaterGems

Εικόνα 3.4 Χαρακτηριστικά δεξαμενών

Εικόνα 3.5 Κανόνες λειτουργίας των δεξαμενών

Εικόνα 3.6 Πολλαπλασιαστές του Pattern 2

Εικόνα 3.7 Εφαρμογή της κλίμακας ροής στο δίκτυο

Εικόνα 3.8 Η τοποθεσία των υδρομέτρων που επιλέχθηκαν

Εικόνα 3.9 Μεταβολές πίεσης και ροής

(α) 3h

(β) 65h

Εικόνα 3.10 Μεταβολές πίεσης και ροής

(α) Ζώνη 1

(β) Ζώνη 2

(γ) Ζώνη 3

(δ) Ζώνη 4

Εικόνα 3.11 Μεταβολές ζήτησης

(α) 3h

(β) 65h

Εικόνα 3.12 Πιθανές θέσης διαρροών

(α) 3^η ώρα

(β) 28^η ώρα

(γ) 53^η ώρα

(δ) 4^η ώρα

Εικόνα 3.13 Μεταφορά Χλωρίου για τις ώρες 0, 8, 20, 34, 35, 59-72 (από αριστερά προς δεξιά)

Εικόνα 3.14 Η ηλικία νερού στο δίκτυο για τις ώρες 0, 14, 15, 17, 24, 29, 33, 44, 45, 54, 66-72 (από αριστερά προς δεξιά)

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 2.1 Δεδομένα υψομέτρων των υδρομέτρων

Πίνακας 2.2 Δεδομένα εισαγωγής δεξαμενής

Πίνακας 2.3 Υψόμετρο του ρεζερβουάρ

Πίνακας 2.4 Δεδομένα εισαγωγής σωλήνων

Πίνακας 2.5 Controls για τον σωλήνα που συνδέει τη δεξαμενή με το ρεζερβουάρ

Πίνακας 2.6 Κλίμακα συντελεστή εκπομπών

Πίνακας 2.7 Κλίμακας Πίεσης

Πίνακας 3.1 Κλίμακα ζήτησης

Πίνακας 3.2 Κλίμακα πίεσης

Πίνακας 3.3 Κλίμακα ροής

Πίνακας 3.4 Κλίμακα συντελεστή εκπομπής

Πίνακας 3.5 Κλίμακα συγκέντρωσης χλωρίου

Πίνακας 3.6 Κλίμακα ηλικίας νερού

Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1 Ροή Ζώνης 1

Διάγραμμα 2.2 Πίεση στους κόμβους της Ζώνης 1

Διάγραμμα 2.3 Υδραυλική κλίση δεξαμενής στη Ζώνη 1

Διάγραμμα 2.4 Υδραυλική κλίση ρεζερβουάρ στη Ζώνη 1

Διάγραμμα 2.5 Στάθμη δεξαμενής στη Ζώνη 1

Διάγραμμα 2.6 Μέση ημερήσια ζήτηση υδρομέτρων της Ζώνης 1

Διάγραμμα 2.7 Μηδενική ζήτηση στη Ζώνη 2

Διάγραμμα 2.8 Εισαγωγή τιμών ζήτησης στη Ζώνη 2

Διάγραμμα 2.9 Σταθερή πίεση πριν και μετά την προσθήκη τιμών ζήτησης στη Ζώνη 2

Διάγραμμα 2.10 Μηδενική ζήτηση στη Ζώνη 2

Διάγραμμα 2.11 Μη μηδενική ζήτηση στη Ζώνη 2

Διάγραμμα 2.11 Ζήτηση για κάθε υδρόμετρο

Διάγραμμα 2.12 Στάθμη της δεξαμενής

Διάγραμμα 2.13 Πίεση στους κόμβους του δικτύου

Διάγραμμα 2.14 Απώλεια φορτίου στους αγωγούς

Διάγραμμα 2.15 Απώλεια φορτίου στους αγωγούς

Διάγραμμα 2.16 Ζήτηση για τους κόμβους της Ζώνης 4

Διάγραμμα 2.17 Ζήτηση για όλους τους κόμβους/υδρόμετρα του δικτύου

Διάγραμμα 2.18 Πίεση για τα υδρόμετρα J-2, J-9 & J-20

Διάγραμμα 2.19 Ροή για τους αγωγούς εκατέρωθεν των υδρομέτρων J-2, J-9 & J-20

Διάγραμμα 2.20 Στάθμη δεξαμενής για την Ζώνη 1

Διάγραμμα 2.21 Στάθμη δεξαμενής με τις Ζώνες 1, 2, 3 & 4

Διάγραμμα 3.1 Ωριαίο Pattern ζήτησης

Διάγραμμα 3.2 Ζητούμενη ροή του δικτύου

Διάγραμμα 3.3 Παρεχόμενη ροή στο δίκτυο

Διάγραμμα 3.4 Αποθηκευμένη ροή στο δίκτυο

Διάγραμμα 3.5 Δεξαμενές PTM (κόκκινο) & D4 (μπλε)

(α) Στάθμη

(β) Υδραυλική κλίση

Διάγραμμα 3.6 Ζήτηση

Διάγραμμα 3.7 Υδρόμετρα 2690.0150, 0220.0270, 1800.0060 & 1120.0120

(α) Υδραυλική κλίση

(β) Πίεση

Διάγραμμα 3.8 Ροή αγωγών

(α) Αγωγός 121

(β) Αγωγός 56

Εισαγωγή

Η έξυπνη και ενεργειακά αποδοτική διαχείριση των υδατικών δικτύων έχει αναδειχθεί σε μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις του 21^{ου} αιώνα, καθώς η ζήτηση του νερού αυξάνεται συνεχώς ενώ οι φυσικοί πόροι παραμένουν περιορισμένοι και με την πάροδο των χρόνων λόγω της κλιματικής αλλαγής και της υπερκατανάλωσης, μπορεί να καταλήξουν ανεπαρκείς. Φαινόμενα όπως η λειψυδρία και η συνεχής αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, καθιστούν το νερό, ένα ήδη πολύτιμο και απαραίτητο αγαθό, ως «προστατευόμενο είδος». Είναι, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη για μελέτη και βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης με σκοπό τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητάς τους αλλά και της μακροχρόνιας βιωσιμότητάς τους με χρήση νέων, «έξυπνων» τεχνολογιών.

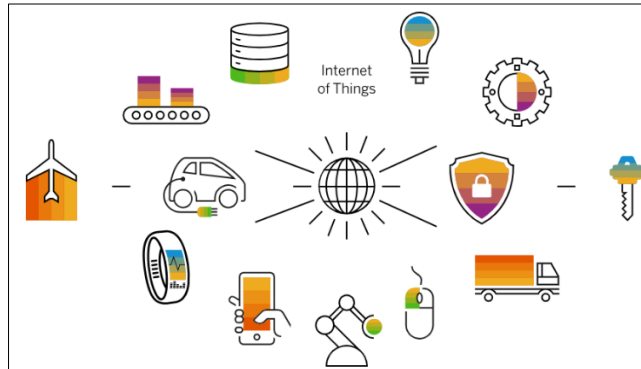
Η έννοια των «έξυπνων» υδατικών δικτύων (Smart Water Networks) αφορά ένα εκτενές σύστημα που λειτουργεί με δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο, σχεδιασμένο να βελτιστοποιεί κάθε τμήμα διανομής νερού. Αποτελείται από τους σωλήνες, τις δεξαμενές αλλά και οποιοδήποτε άλλο κομμάτι που υφίσταται μέσα σε ένα δίκτυο ύδρευσης, καθώς και από προηγμένο εξοπλισμό ελέγχου και συλλογής δεδομένων όπως αισθητήρες IoT. Στόχος τους είναι η πρόληψη και η ετοιμότητα απέναντι σε βλάβες που πιθανότατα συμβούν, η συνεχής και αυξανόμενη αποδοτικότητα του δικτύου αλλά και η εξοικονόμηση υδάτινων πόρων. Ένα τέτοιο σύστημα προηγμένης τεχνολογίας θα έχει ενδιαφέρον να γίνει και ενεργειακά αυτόνομο, εν μέρη ή συνολικά, εφόσον δεν είναι ήδη, με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ο ρόλος τους μπορεί να εφαρμοστεί στο κομμάτι της άντλησης του νερού, αλλά και σε άλλες υποστηρικτικές λειτουργίες, όπως η τηλεμετρία, οι αισθητήρες IoT ή η επεξεργασία του νερού. Σε οποιοδήποτε επίπεδο, η μείωση χρήσης συμβατικής ενέργειας και εκπομπών CO₂ βοηθούν στη βιωσιμότητα και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των υδατικών δικτύων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα μελετηθεί το υδατικό δίκτυο της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου μέσω του λογισμικού WaterGEMS. Με βάση τα χαρακτηριστικά του δικτύου στην κατασκευή αλλά και στις ανάγκες της περιοχής, θα γίνει μελέτη της κατανάλωσης και ζήτησης νερού, βάσει πραγματικών δεδομένων, καθώς και ανάλυση στις λειτουργικές επιδόσεις του υδατικού δικτύου. Θα δοθεί έμφαση στις δυνατότητες που δίνει η εφαρμογή έξυπνων τεχνολογιών αλλά και το πρόγραμμα WaterGEMS για τον εντοπισμό διαρροών και θα απαντηθεί εάν εν τέλει το δίκτυο είναι ενεργειακά αυτόνομο καθώς και αν μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «έξυπνο» υδατικό δίκτυο.

1. Χρήση συστημάτων IoT σε δίκτυα ύδρευσης

1.1 Τι είναι το Διαδίκτυο των πραγμάτων IoT

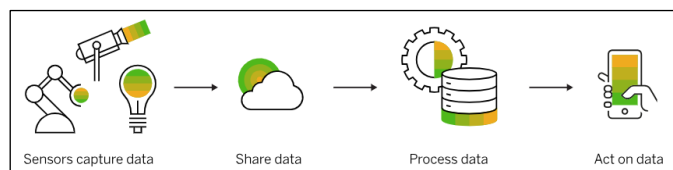
Το διαδίκτυο των πραγμάτων ή Internet of Things (IoT) είναι ένα δίκτυο συνδεδεμένων αντικειμένων και συσκευών, εξοπλισμένα με αισθητήρες που τους επιτρέπει να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα προς και από άλλα συστήματα. Σκοπός του IoT είναι η ενημέρωση των χρηστών σε πραγματικό χρόνο και η αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής και ανάλυσης δεδομένων [1].



Εικόνα 1.1 Internet of Things [1]

Η καταγραφή των δεδομένων γίνεται μέσω αισθητήρων. Οι αισθητήρες IoT μετρούν τις αλλαγές στο περιβάλλον και μεταδίδουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για επεξεργασία και ανάλυση. Οι αισθητήρες αποτελούν τη βάση των ψηφιακών οικοσυστημάτων που αυτοματοποιούν, παρέχουν πληροφορίες, βελτιστοποιούν και διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων. Οι αισθητήρες στις συσκευές IoT ανιχνεύουν αλλαγές στις φυσικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως αλλαγές στην πίεση, αυξήσεις στην υγρασία και ασυνήθιστη θερμοκρασία. Τέτοιες συσκευές είναι οι κάμερες που καταγράφουν την κίνηση και το φως ή τα βαρόμετρα που μετρούν τις αλλαγές στην πίεση. Αφού καταγράψουν τα δεδομένα γρήγορα, τα συγκεντρώνουν σε ένα cloud για ανάλυση [2].

Στόχος της χρήσης των αισθητήρων IoT είναι η επίτευξη ταχύτερων χρόνων απόκρισης, η ακριβέστερη προετοιμασία και συλλογή πληροφοριών που βασίζονται σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο τα οποία αποτελούν πρωταρχικό παράγοντα πίσω από τον αυτοματισμό, θέτοντας τα θεμέλια για πιο αποτελεσματικές λειτουργίες. Οι έξυπνοι αισθητήρες IoT λοιπόν, μπορούν να έχουν εφαρμογές που κυμαίνονται από τη σηματοδότηση έκτακτων αναγκών σε μία εγκατάσταση έως την προγνωστική συντήρηση των μηχανημάτων της. Συλλέγουν δεδομένα άμεσα, αυξάνουν τον έλεγχο, μετριάζουν τα ανθρώπινα σφάλματα και ενισχύουν την παραγωγικότητα [2].



Εικόνα 1.2 Τα 4 βασικά στάδια του δικτύου των πραγμάτων [1]

Τα βασικά σημεία των αισθητήρων IoT είναι[2]:

- **Αισθητήρες:** Το βασικό στοιχείο των αισθητήρων IoT που μετρά τις περιβαλλοντικές ή φυσικές αλλαγές και μετατρέπει τα αποτελέσματα σε σήματα για επεξεργασία.
- **Μικροελεγκτές:** Λειτουργούν ως ο εγκέφαλος που επεξεργάζεται τα συλλεγόμενα δεδομένα και εκτελεί εργασίες φιλτραρίσματος και επικοινωνίας.
- **Στοιχεία συνδεσιμότητας:** Ενεργοποιούν την επικοινωνία μεταξύ του αισθητήρα και του δικτύου και μεταδίδουν τα δεδομένα.
- **Αποθήκευση και επεξεργασία:** Η μονάδα αυτή αποθηκεύει προσωρινά ή μόνιμα τα συσσωρευμένα δεδομένα και βοηθά στην επεξεργασία για τη μείωση του χρόνου επικοινωνίας της συσκευής.

Ενώ τα παραπάνω αποτελούν τα βασικά στοιχεία της υποδομής αισθητήρων IoT, υπάρχουν επίσης υποστηρικτικά μέρη που αξίζει να σημειωθούν. Αυτά περιλαμβάνουν μονάδες διαχείρισης ενέργειας για τη ρύθμιση και την παροχή ενέργειας, μονάδες ασφαλείας για την κρυπτογράφηση και την ασφάλεια των δεδομένων και φυσικά περιβλήματα για την προστασία των αισθητήρων [2].

1.2 Συστήματα IoT σε υδατικά δίκτυα

Οι αισθητήρες IoT έχουν πολλές εφαρμογές σε διάφορες σύγχρονες βιομηχανίες. Πολυάριθμες συσκευές ενσωματώνουν πολλαπλά στοιχεία για να δημιουργήσουν πιο αποδοτικές συσκευές και δίκτυα. Στα δίκτυα ύδρευσης οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται πιο συχνά ανήκουν στην κατηγορία αισθητήρων πίεσης και στάθμης νερού ή αισθητήρες ροής. Οι αισθητήρες πίεσης μετρούν τη δύναμη που ασκείται από αέρια ή υγρά στοιχεία, ενώ οι αισθητήρες στάθμης νερού παρακολουθούν τα επίπεδα υγρών σε δεξαμενές, σωλήνες ή ταμειευτήρες [2].

Πιο αναλυτικά όμως, οι δυνατότητες που προσφέρουν οι τεχνολογίες IoT συμπεριλαμβάνουν ένα εύρος ελέγχων σε οτιδήποτε αφορά ένα δίκτυο ύδρευσης, όπως[3]:

Συσκευές μέτρησης ποιότητας του νερού

- **Πολυμετρικοί αισθητήρες:** Μετρούν το pH, τη θερμοκρασία, την αλατότητα, τα επίπεδα οξυγόνου, τη θολότητα και άλλες χημικές ή φυσικές παραμέτρους.
- **Αισθητήρες ανίχνευσης ρύπανσης:** Εντοπίζουν χημικούς ρύπους όπως νιτρικά, φωσφορικά και βαρέα μέταλλα.
- **Αισθητήρες UV:** Ελέγχουν για βιολογικές μολύνσεις όπως βακτήρια ή φύκη.
- **Συσκευές δοκιμής σκληρότητας του νερού:** Μετρούν τα διαλυμένα μέταλλα και τη συγκέντρωση άλατος.
- **Αναλυτές Χλωρίου:** Μετρούν τα επίπεδα χλωρίου κατά την επεξεργασία του νερού.

Αισθητήρες στάθμης νερού και διαρροών

- **Αισθητήρες υπερήχων για τη στάθμη νερού:** Παρακολουθούν τα επίπεδα νερού σε δεξαμενές, σωλήνες, ποτάμια, φράγματα και άλλες τοποθεσίες.
- **Πιεζομετρικοί αισθητήρες:** Μετρούν τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων.
- **Αισθητήρες ανίχνευσης διαρροών:** Εντοπίζουν διαρροές σε αγωγούς ή συστήματα άδρευσης.
- **Ροόμετρα:** Μετρούν το ρυθμό και τον όγκο ροής του νερού.

Συσκευές μεταφοράς νερού

- **Αισθητήρες πίεσης σε αγωγούς:** Παρακολουθούν την πίεση του νερού για την αποφυγή θραύσεων σε τοιχώματα αγωγών και την ανίχνευση διαρροών.
- **Αισθητήρες κατάστασης αγωγών:** Μετρούν κραδασμούς, ήχους και τη δομική ακεραιότητα των αγωγών.
- **«Έξυπνες» βαλβίδες:** Ελέγχουν τη ροή του νερού ανοίγοντας ή κλείνοντας αυτόματα με βάση τα δεδομένα των αισθητήρων.
- **Αντλίες IoT:** Έξυπνα συστήματα αντλιών που βελτιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας κατά την μεταφορά νερού.

Από τις παραπάνω κατηγορίες φαίνεται πως για τις ανάγκες του εκάστοτε υδατικού δικτύου μπορούν να επιλεγθούν αισθητήρες ανάλογα με τα συγκεκριμένα δεδομένα που συλλέγει ο κάθε ένας από αυτούς. Σκοπός του IoT είναι να διευκολύνει τη συλλογή, αποθήκευση και ανάλυση αυτών των δεδομένων [3].



Εικόνα 1.3 IoT συσκευές υδατικά δίκτυα [3].

Τα συστήματα IoT λοιπόν, αποτελούν καταλυτικό παράγοντα για τη μετάβαση των δικτύων ύδρευσης σε ένα πιο έξυπνο, διασυνδεδεμένο και αποδοτικό πλαίσιο λειτουργίας. Μέσω αισθητήρων, έξυπνων υδρομέτρων και συστημάτων τηλεμετρίας, παρέχονται σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες και δεδομένα που προσφέρουν τη δυνατότητα να γίνεται εγκαίρως η ανίχνευση βλαβών εντός του δικτύου και το ίδιο να λειτουργεί στο βέλτιστο βαθμό απόδοσης του. Όσο οι τεχνολογίες IoT εξελίσσονται, η εφαρμογή τους στα υδατικά δίκτυα αναμένεται να ενισχύσει ακόμη περισσότερο τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα των υποδομών ύδρευσης.

2. Το λογισμικό *Watergems*

Ανεπτυγμένο από την Bentley Systems, το OpenFlows WaterGEMS είναι ένα προηγμένο λογισμικό προσομοίωσης και ανάλυσης δικτύων ύδρευσης, το οποίο χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό, την βελτιστοποίηση και τη διαχείριση τους. Θεωρείται μία εφαρμογή υδραυλικής μοντελοποίησης για υδατικά δίκτυα με προηγμένες δυνατότητες διαλειτουργικότητας, δημιουργίας γεωχωρικών μοντέλων, ανάλυσης ποιότητας νερού, κατανάλωσης ενέργειας και διαχείρισης κόστους. Περιλαμβάνει σύγχρονους μηχανισμούς βελτιστοποίησης γενετικών αλγορίθμων για αυτοματοποιημένη βαθμονόμηση (calibration), ανίχνευση διαρροών, σχεδιασμό και αποκατάσταση του δικτύου καθώς και λειτουργία αντλιών. Κάποιες από τις σημαντικότερες λειτουργίες του OpenFlows WaterGEMS, είναι [4]:

Darwin Calibrator: Μία λειτουργία που αξιολογεί εκατομμύρια πιθανές λύσεις επιτρέποντας να βρεθεί γρήγορα μια υπόθεση βαθμονόμησης που ταιριάζει καλύτερα με τις μετρούμενες ροές και πιέσεις δίνοντας τη δυνατότητα να ληφθούν αξιόπιστες αποφάσεις, βασισμένες σε ακριβείς υδραυλικές προσομοιώσεις του πραγματικού δικτύου. Βελτιστοποιεί τις τιμές για οποιονδήποτε συνδυασμό παραμέτρων του μοντέλου, όπως την τραχύτητα των σωλήνων, την ζήτηση των κόμβων και την ροή των σωλήνων, ώστε να πετύχει την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των πραγματικών τιμών του υδραυλικού συστήματος. Η λειτουργία ανίχνευσης διαρροών μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό των πιο πιθανών τοποθεσιών διαρροής στο δίκτυο. Για τον καθορισμό της ύπαρξης αλλά και του μεγέθους της διαρροής το Darwin Calibrator χρησιμοποιεί τον *συντελεστή εκπομπής* (emitter coefficient) στους κόμβους και τα υδρόμετρα του δικτύου. Ο συντελεστής εκπομπής προσομοιώνει τη ροή νερού που εκτονώνεται από ένα στόμιο ή άνοιγμα σε ένα κόμβο με βάση την πίεση εντός του κόμβου αυτού. Η ροή υπολογίζεται μέσω του συντελεστή εκπομπής ως [5],[7]:

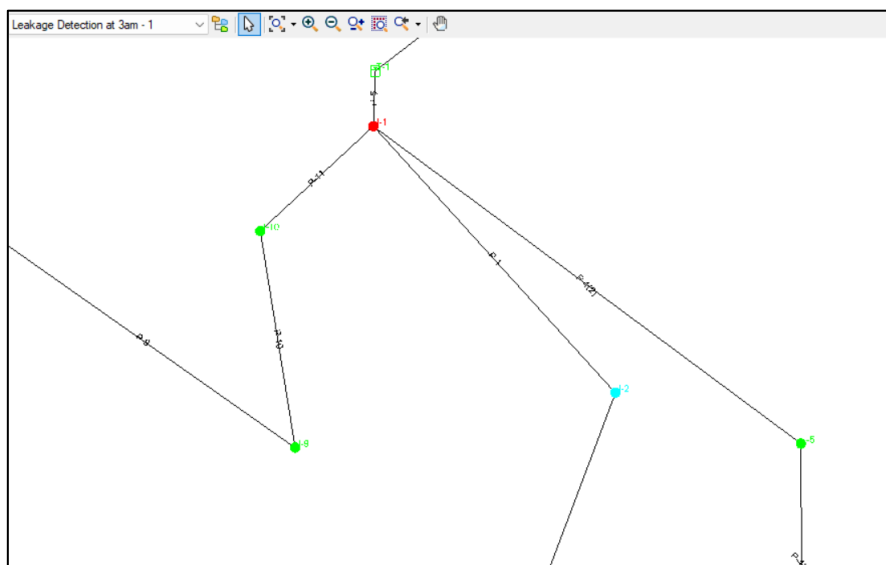
$$Q = kP^n$$

Όπου:

- Q : Ροή
- k : Συντελεστής εκπομπής
- P : Πίεση
- n : Εκθέτης εκπομπής, ορίζεται παγκοσμίως στις επιλογές υπολογισμού για την εκτέλεση του αλγορίθμου. Είναι αδιάστατος, ωστόσο επηρεάζει τις μονάδες μέτρησης του k. Η προεπιλεγμένη τιμή για το n είναι 0,5 καθώς θεωρείται μία τυπική τιμή για ένα στόμιο.

Το WaterGEMS επιτρέπει να ορίζεται κλίμακα του συντελεστή εκπομπής, επομένως με βάση τις τιμές και τα χρώματα που επιλέξει ο χρήστης, είναι σε θέση να αποτυπώσει την πιθανότητα ύπαρξης διαρροής, εντός του εύρους που εκτείνεται από

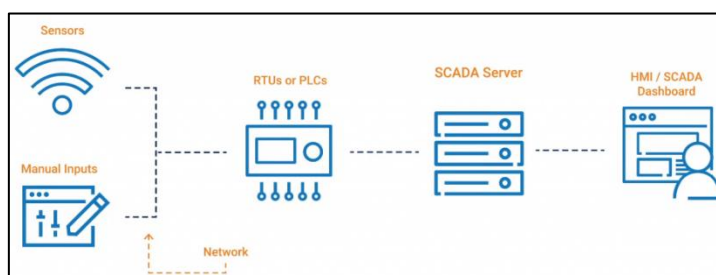
την ελάχιστη έως τη μέγιστη τιμή. Η απεικόνιση των πιθανών θέσεων διαρροής γίνεται πάνω στους κόμβους όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Απεικόνιση πιθανών θέσεων με διαρροή στο WaterGEMS.

Τα δεδομένα που χρειάζονται και την εκτέλεση της προσομοίωσης είναι οι τιμές της υδραυλικής κλίσης (Hydraulic Grade) όλων των κόμβων και οι εκροές (Discharge) των αγωγών που συνδέουν τα ρεζερβουάρ με τις δεξαμενές. Επειδή η προσομοίωση αυτή δίνει την πιθανότητα να εκτονωθεί νερό από κάποιο κόμβο του δικτύου, αυτό εμπεριέχει και την πιθανότητα όχι μόνο να υπάρχει κάποια θραύση ή διαρροή, αλλά και πραγματική ζήτηση, δηλαδή το άνοιγμα μίας βρύσης. Επομένως, η προσομοίωση των διαρροών, επιλέγεται να γίνει τις πρωινές ώρες της ημέρας 2 π.μ. με 4 π.μ. όπου η πιθανότητα πραγματικής ζήτησης νερού από τους καταναλωτές ελαχιστοποιείται.

SCADAConnect: Επιτρέπει τη λήψη δεδομένων (SCADA) δημιουργώντας μία προσομοίωση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο που αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τις τρέχουσες συνθήκες του, με τα αποτελέσματά του να βοηθούν στην πρόβλεψη των συνθηκών λειτουργίας και των πιθανών προβλημάτων. Συνδέει τα δεδομένα SCADA απευθείας στο μοντέλο, για να διαβαθμιστεί εύκολα ένας απεριόριστος αριθμός σημάτων με βάση τις πραγματικές συνθήκες, να εφαρμοστούν αρχικές πραγματικές συνθήκες ή να υπολογιστεί η ζήτηση με βάση τις καταγεγραμμένες ταχύτητες ροής SCADA [6].



Εικόνα 2.2 Η αρχιτεκτονική SCADA [7].

Για να γίνει χρήση εξωτερικών πηγών δεδομένων, με συστήματα SCADA, είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί η σύνδεση μεταξύ του WaterGEMS και της πηγής δεδομένων. Υπάρχει ποικιλία στους τύπους πηγών δεδομένων, όπως και στους τύπους αρχείων που τα εμπεριέχουν, το WaterGEMS δέχεται ιστορικά δεδομένα OPC, δεδομένα OPC σε πραγματικό χρόνο και Citect SCADA [8].

Το SCADAConnect Simulator παρέχει στους χρήστες του τη δυνατότητα να τροποποιήσουν και να εκτελέσουν ένα σενάριο μοντέλου από μία απλή διεπαφή χρήστη χωρίς να χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν πιο περίπλοκες λειτουργίες του WaterGEMS. Με αυτό το εργαλείο λοιπόν, σε ένα υπάρχον μοντέλο WaterGEMS, κάνοντας μικρές αλλαγές, μπορούν να γίνουν προσομοιώσεις πυρκαγιάς, θραύσης σωλήνα ή διακοπής λειτουργίας του δικτύου. Δίνει επίσης τη δυνατότητα στους χρήστες να παρακάμψουν τυχόν ελέγχους ή απαιτήσεις και να δημιουργήσουν σε μικρό χρονικό διάστημα ένα μοντέλο που θα μπορούν να προσδιοριστούν οι βασικές ιδιότητές του, όπως, πιέσεις, ροές, επίπεδα δεξαμενών, ποιότητα νερού και κατανάλωση ενέργειας. Απαραίτητο για να γίνει η προσομοίωση με το SCADAConnect, είναι το μοντέλο στο οποίο θα εφαρμοστεί να έχει ένα υπάρχον σενάριο Προσομοίωσης Εκτεταμένης Περιόδου (EPS) στην οποία το μοντέλο παρατηρείται για καθορισμένο χρονικό διάστημα, το οποίο ορίζει ο χρήστης, και δίνει τη δυνατότητα να εμφανιστούν αναλυτικά οι υδραυλικές αλλαγές μέσα σε αυτό. Διαφορετικά, αν το μοντέλο παραμείνει σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας, τα αποτελέσματα που δίνονται θα είναι μόνο για ένα χρονικό βήμα. Η επιλογή EPS δίνει μία σαφή γραφική αναπαράσταση της υδραυλικής συμπεριφοράς του μοντέλου στον καθορισμένο χρόνο όπως πληροφορίες για τη συμπεριφορά των δεξαμενών του δικτύου, σε ποιες ώρες γεμίζουν ή αδειάζουν αλλά και για τις αλλαγές που υφίσταται η πίεση ή η ροή στο δίκτυο. Για κάθε νέο σενάριο, στο οποίο χρησιμοποιείται η λειτουργία SCADAConnect θα πρέπει να αντικατοπτρίζεται στη βασική δομή του, ο σκοπός της εκτέλεσης του. Εάν πρόκειται να υπολογιστούν υπολείμματα απολυμαντικού, τότε θα πρέπει να καθοριστούν οι ρυθμοί αποσύνθεσης για τα απολυμαντικά, ενώ αν πρόκειται να εκτελεστούν σενάρια βάση της ενέργειας, θα πρέπει να οριστεί η τιμολόγηση της. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα για εισαγωγή ειδοποιήσεων, οι οποίες θα μπορούν να υποδείξουν εάν υπάρχει κάποιο πρόβλημα ή κάποια ενημέρωση σε οποιοδήποτε χρονικό βήμα της εκτέλεσης του σεναρίου [9], [10].

Darwin Designer: Δίνει τη δυνατότητα για σχεδίαση νέων σωλήνων ή για αποκατάσταση των ήδη υπάρχοντων. Είναι μία προσέγγιση που βασίζεται σε γενετικό αλγόριθμο που αποφεύγει μία χειροκίνητη προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος για την εύρεση του αποτελεσματικού σχεδιασμού. Σε οποιοδήποτε σενάριο που εκτελείται εντός του δικτύου, μπορούν να εξαχθούν λύσεις βελτιστοποίησης του μοντέλου αλλά και υπολογισμός του κόστους των αλλαγών. Το Darwin Designer επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει ανάμεσα σε τρία μοντέλα βελτιστοποίησης, ανάλογα με το ποιο από τα τρία ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες του εκάστοτε υδραυλικού μοντέλου. Η

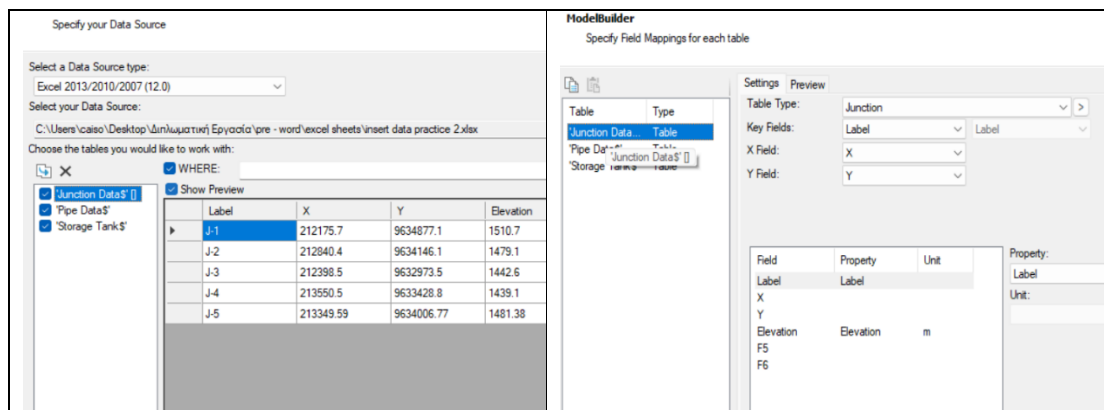
οικονομικά αποδοτικότερη λύση σχεδιασμού ή αποκατάστασης, λοιπόν, καθορίζεται από το ελάχιστο κόστος, το μέγιστο όφελος ή την αντιστάθμιση μεταξύ των δύο. Αναλυτικότερα τα τρία μοντέλα βελτιστοποίησης προσφέρουν [11],[12],[13], [14],[15]:

- Ελάχιστο κόστος: Μοναδικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους επομένως η βέλτιστη λύση καθορίζεται μόνο από το ελάχιστο κόστος σχεδιασμού και αποκατάστασης διανομής νερού που ικανοποιεί προκαθορισμένα υδραυλικά κριτήρια όπως την ελάχιστη και μέγιστη απαιτούμενη πίεση κόμβου καθώς και την μέγιστη και ελάχιστη επιτρεπόμενη απαιτούμενη ταχύτητα ροής σωλήνα.
- Μέγιστο όφελος: Το μοντέλο βελτιστοποίησης οφέλους αναπτύσσεται για να προσδιορίσει τη λύση σχεδιασμού ή αποκατάστασης με το μέγιστο όφελος πίεσης για ένα σύστημα διανομής νερού. Μέσω γενετικού αλγορίθμου αναζητείται η βέλτιστη λύση με βάση τη μεγιστοποίηση του οφέλους σχεδιασμού, ικανοποιώντας παράλληλα τα υδραυλικά κριτήρια του δικτύου αλλά και τον διαθέσιμο προϋπολογισμό.
- Μέγιστο όφελος με ελάχιστο κόστος: Με βάση τη διαθέσιμη χρηματοδότηση, το μοντέλο αυτό δίνει τη βέλτιστη λύση σχεδιασμού ή αποκατάστασης. Μπορούν να προσαρμοστούν οι κατάλληλες συναρτήσεις οφέλους και να καθοριστεί ο μέγιστος προσιτός προϋπολογισμός. Το μοντέλο παράγει ένα σύνολο μη κυρίαρχων λύσεων, που αντιπροσωπεύουν το βέλτιστο πλάνο σχεδιασμού ή αποκατάστασης για διαφορετικά επίπεδα κόστους και οφέλους. Επομένως, το μοντέλο αυτό σε σύγκριση με τα δύο προηγούμενα, θέτει πολλαπλούς στόχους για την εκτέλεσή του, οι οποίοι αφορούν το όφελος και το κόστος.

Darwin Scheduler: Επιτρέπει βελτιστοποιήσεις στις λειτουργίες των αντλιών. Με χρήση γενετικού αλγορίθμου για τον έλεγχο των επιλεγμένων αντλιών κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης εκτεταμένης περιόδου (EPS), αποφεύγει την ανάγκη για χειροκίνητη προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος για την εύρεση του πιο αποτελεσματικού προγράμματος λειτουργίας. Ταυτόχρονα, μαζί με τις λύσεις στις οποίες καταλήγει για την βέλτιστη λειτουργία των αντλιών, ώστε να μειωθεί η ενέργεια που καταναλώνεται στο δίκτυο, υπολογίζει και το απαραίτητο κόστος για κάθε μία από αυτές. Ωστόσο, οι χρόνοι εκτέλεσης του Darwin Scheduler για μεγάλα ή περίπλοκα δίκτυα μπορεί να είναι μεγάλοι και επομένως οι προσομοιώσεις ανάλογα με τον καθορισμένο χρόνο του μοντέλου (EPS), να είναι χρονοβόρες [6], [16], [17].

ModelBuilder: Παρόμοια με τη λειτουργία SCADA, το ModelBuilder προσφέρει τη δυνατότητα για εισαγωγή δεδομένων διαφορετικού τύπου. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός δικτύου από δεδομένα GIS. Για τη λειτουργία

του χρειάζεται να επιλεγεί η πηγή των δεδομένων και η αντιστοίχισή τους με την επιθυμητή είσοδο του μοντέλου όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.3. Έστω ότι εισάγεται ένα αρχείο excel στο ModelBuilder, τότε θα γίνει αντιστοίχιση κάθε στήλης του αρχείου με την κατάλληλη είσοδο για τα δεδομένα, καθώς θα οριστούν και οι επιθυμητές μονάδες μέτρησης [18].



Εικόνα 2.3 Εισαγωγή δεδομένων στο ModelBuilder

Pipe Renewal Planner: Ένα εργαλείο που κατατάσσει τους σωλήνες βάση της αποδοτικότητάς τους, ως προς την χωρητικότητα, το ιστορικό θραύσεων, τα κρίσιμα τμήματά τους, αλλά και βάσει των ιδιοτήτων των σωλήνων όπως είναι το υλικό τους, η τοποθεσία τους και το έτος κατασκευής τους, με σκοπό να βρεθεί ποιοι έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα φθοράς και να παρακολουθούνται για επισκευές [6]. Για το ενδεχόμενο θραύσης σωλήνα, εκτελείται Ανάλυση Θραύσης Σωλήνα, όπου υπολογίζεται ο προβλεπόμενος ρυθμός θραύσης για κάθε σωλήνα. Ο τύπος θραύσης μεμονωμένου σωλήνα υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{ij} = \left(\frac{break_j}{breakmax} \right)$$

Όπου:

- $break_j$ ο ρυθμός θραύσης στον j-οστό σωλήνα και
- $breakmax$ ο μέγιστος ρυθμός θραύσης σε όλους τους σωλήνες

Επίσης σημαντική λειτουργία του Pipe Renewal Planner είναι η Ανάλυση Κρισιμότητας, καθώς ελέγχει αν υπάρχει διακοπή λειτουργίας σε οποιονδήποτε σωλήνα του δικτύου ή σε τμήμα με περισσότερους από έναν σωλήνες και βασίζεται στον υπολογισμό για την έλλειψη ικανοποίησης της ζήτησης. Ακόμη μία δυνατότητα που προσφέρει, είναι ο έλεγχος Χωρητικότητας (Fire Flow), όπου στόχος είναι να προσδιοριστούν ποιοι σωλήνες αποτελούν σημεία συμφόρησης στο δίκτυο ώστε να αξιολογηθεί αν οι σωλήνες ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις για παροχή νερού σε περίπτωση πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχει αν η υδραυλική ικανότητα του σωλήνα επαρκεί για να εξασφαλίσει την ελάχιστη απαιτούμενη παροχή πυρόσβεσης. Οι σημαντικότερες παράμετροι για τον έλεγχο αυτό είναι η ταχύτητα ροής νερού, η

κλίση απώλειας ύψους, η πίεση στο σωλήνα αλλά και η διαθέσιμη παροχή νερού σε κάθε κόμβο [19].

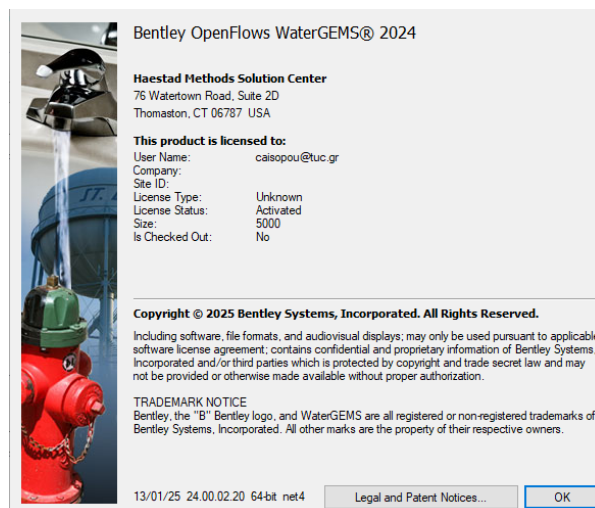
Water Quality Analysis: Η λειτουργία αυτή επιτρέπει τον έλεγχο της ηλικίας του νερού (water age), τον έλεγχο χλωρίωσης, την ποιότητα του νερού στις δεξαμενές και την ιχνηλάτησή του. Βάσει ενός χρονικού διαστήματος που καθορίζει ο χρήστης, παρακολουθούνται οι αλλαγές στην ποιότητα του νερού σε όλο το δίκτυο. Το χρονικό αυτό διάστημα ισοδυναμεί με τον μικρότερο χρόνο διαδρομής μέσω οποιουδήποτε σωλήνα στο σύστημα [20]. Μέσω της ανάλυσης της ηλικίας του νερού, καθορίζεται πόσο καιρό βρίσκεται το νερό στο σύστημα και η εκτίμηση αυτή γίνεται με ένα γενικό δείκτη ποιότητας νερού και όχι με μέτρηση κάποιου συγκεκριμένου συστατικού [21]. Ωστόσο, δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης των συστατικών του νερού. Συστατικά θεωρούνται ουσίες όπως το χλώριο ή το φθόριο, των οποίων η αύξηση ή μείωση περιγράφεται μέσω συντελεστών αντίδρασης όγκου και τοιχώματος. Μία τέτοια ανάλυση καθορίζει τη συγκέντρωση ενός συστατικού σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Οι αναλύσεις συστατικών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό υπολειμμάτων χλωρίου σε όλο το σύστημα, σύμφωνα με τα τρέχοντα προγράμματα χλωρίωσης ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του συστήματος εάν γίνει εφαρμογή διαφορετικών προγραμμάτων χλωρίωσης [22]. Τέλος, εφαρμόζοντας ανάλυση ιχνηλάτησης, εντοπίζεται από ποια δεξαμενή, αντλία ή είσοδο προέρχεται το νερό που καταλήγει σε ένα συγκεκριμένο κόμβο αλλά και που θα καταλήξει μετά τον κόμβο αυτό. Σε περίπτωση που παρουσιαστεί μόλυνση εντός του δικτύου χημική ή βιολογική, μπορεί να εντοπιστεί αυτό το τμήμα μέσα στο δίκτυο και να απομονωθεί από το υπόλοιπο, με σκοπό να καθαριστεί και να επανέλθει σε λειτουργία [23].

Energy Cost: Για τον υπολογισμό κόστους ενέργειας, απαραίτητες είναι οι πληροφορίες για τις αντλίες (μπαταρίες, στρόβιλοι) και ο καθορισμός του κόστους ενέργειας στην είσοδο Energy Pricing Manager. Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται μετά από μία ανάλυση κόστους είναι [24], [25]:

- **Ενέργεια:** Η συνολική ενέργεια που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του σεναρίου EPS (Extended Period Simulation).
- **Κόστος Ενέργειας:** Το συνολικό κόστος ενέργειας κατά τη διάρκεια του σεναρίου.
- **Κόστος Αποθήκευσης:** Το καθαρό κόστος ενέργειας στο νερό που εισέρχεται ή εξέρχεται από την αποθήκευση.
- **Ημερήσιο Κόστος:** Το συνολικό κόστος ενέργειας διαιρούμενο με τη διάρκεια του σεναρίου σε ημέρες.
- **Όγκος:** Ο συνολικός όγκος νερού που διέρχεται από τις αντλίες κατά τη διάρκεια ενός σεναρίου.

- Ειδική ενέργεια άντλησης: Η ενέργεια που απαιτείται για την άντληση ενός δεδομένου όγκου νερού.
- Κόστος ειδικής ενέργειας άντλησης: Το κόστος ενέργειας που απαιτείται για την άντληση ενός δεδομένου όγκου νερού.
- Κόστος Αιχμής Ζήτησης: Το κόστος για την ενέργεια που χρησιμοποιείται κατά το βήμα στην αιχμή της διάρκειας του σεναρίου.
- Εκπομπές Άνθρακα: Οι συνολικές εκπομπές άνθρακα κατά τη διάρκεια του σεναρίου.
- Διάρκεια Εκτέλεσης: Η διάρκεια του σεναρίου κόστους ενέργειας.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η εκπαιδευτική έκδοση της Bentley Educational, Bentley OpenFlows WaterGems 2024, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4, η οποία παρέχει όλες τις δυνατότητες και λειτουργίες του WaterGEMS.



Εικόνα 2.4 Άδεια εκπαιδευτικής έκδοσης του WaterGEMS

2.1 Μεθοδολογία προσομοίωσης και μελέτης σε πειραματικά δίκτυα ύδρευσης

Για την κατανόηση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς των υδατικών δικτύων μέσω του λογισμικού WaterGEMS, πραγματοποιήθηκε μία σειρά προσομοιώσεων σε πειραματικά δίκτυα μικρής κλίμακας. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να εφαρμοστούν, σε μικρά και εύκολα σε διαχείριση μοντέλα, οι λειτουργίες και οι ρυθμίσεις που προσφέρει το λογισμικό αλλά και η κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος καθώς μεταβάλλονται τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του. Τα πειραματικά δίκτυα σχεδιάστηκαν έτσι, ώστε να παρουσιάζουν κάποια βασικά, παρόμοια χαρακτηριστικά με το πραγματικό δίκτυο, που θα αναλυθεί στη συνέχεια, όπως τα υψόμετρα των κόμβων, των δεξαμενών και των ρεζερβουάρ

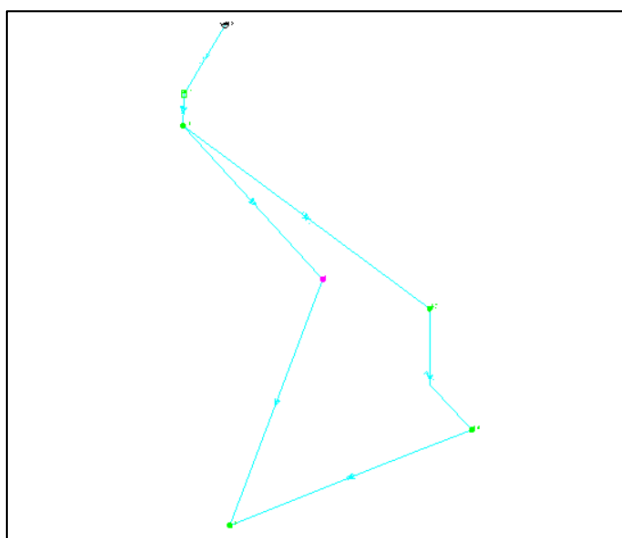
καθώς και η πολυζωνική δομή του. Συνολικά κατασκευάστηκαν τέσσερα δίκτυα, στα οποία σταδιακά προστέθηκαν οι ζώνες. Το πρώτο περιλάμβανε τη Ζώνη 1 και στο κάθε ένα από τα επόμενα προστέθηκαν διαδοχικά οι Ζώνες 2, 3 και 4. Το σταδιακό «χτίσιμο» των δικτύων, είχε στόχο την παρακολούθηση της επίδρασης της κάθε επιπλέον ζώνης στη συνολική συμπεριφορά του δικτύου. Για κάθε ένα από τα τέσσερα δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα μέσης ημερήσιας κατανάλωσης (m^3/day), τα οποία προήλθαν από υδρόμετρα του δικτύου της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου, από τον Οκτώβριο του 2024. Επίσης, δημιουργήθηκαν διαφορετικά, ημερήσια Patterns ανά ώρα, για κάθε μοντέλο και έγινε επαλήθευση για την εγκυρότητα της συμπεριφοράς του δικτύου αφότου έγινε εισαγωγή των δεδομένων ζήτησης. Η μελέτη των δικτύων αυτών ολοκληρώθηκε με χρήση του Darwin Calibrator για μελέτη διαρροών και με τη διεξαγωγή stress tests για την αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος.

2.1.1 Ζώνη 1

Ο σχεδιασμός του δικτύου, το οποίο θα αποτελέσει την Ζώνη 1 η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 2.6, έγινε μέσω του εργαλείου ModelBuilder, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5, στο οποίο εισήχθη ένα αρχείο Excel το οποίο περιείχε τυχαίες γεωγραφικές συντεταγμένες και υψόμετρα για την τοποθεσία των κόμβων ή υδρομέτρων, της δεξαμενής και του ρεζερβουάρ, καθώς και τη σύνδεση των κόμβων με τους αντίστοιχους σωλήνες.

Label	Start Node	End Node	Roughness Coefficient	Material	Label	X	Y
P-5	T-1	J-1	110	Steel	J-1	212175.7	9634877.1
P-1	J-1	J-2	110	Steel	J-2	212840.4	9634146.1
P-2	J-2	J-3	140	PVC	J-3	212398.5	9632973.5
P-3	J-3	J-4	140	PVC	J-4	213550.5	9633428.8
P-4(1)	J-4	J-5	140	PVC	J-5	213349.59	9634006.77
P-4(2)	J-5	J-1	140	PVC			

Εικόνα 2.5 Εισαγωγή του αρχείου Excel στο ModelBuilder



Εικόνα 2.6 Απεικόνιση του δικτύου της Ζώνης 1

Εξαρχής, δίνονται στο πρόγραμμα τα υψόμετρα των υδρομέτρων (J), της δεξαμενής (T) και του ρεζερβουάρ (R) σε m, η διάμετρος των σωληνώσεων σε mm, καθώς και χαρακτηριστικά που αφορούν τις σωληνώσεις:

Πίνακας 2.1 Δεδομένα υψομέτρων των υδρομέτρων

Label	Elevation (m)
J-1	77,00
J-2	24,00
J-3	81,00
J-4	79,00
J-5	81,00

Πίνακας 2.2 Δεδομένα εισαγωγής δεξαμενής

Label	Zone	Elevation (Base) (m)	Elevation (Minimum) (m)	Elevation (Initial) (m)	Elevation (Maximum) (m)	Diameter (m)
T-1	Zone - 1	100,00	102,00	104,50	106,00	20,00

Πίνακας 2.3 Υψόμετρο του ρεζερβουάρ

Label	Elevation (m)
R-2	110,00

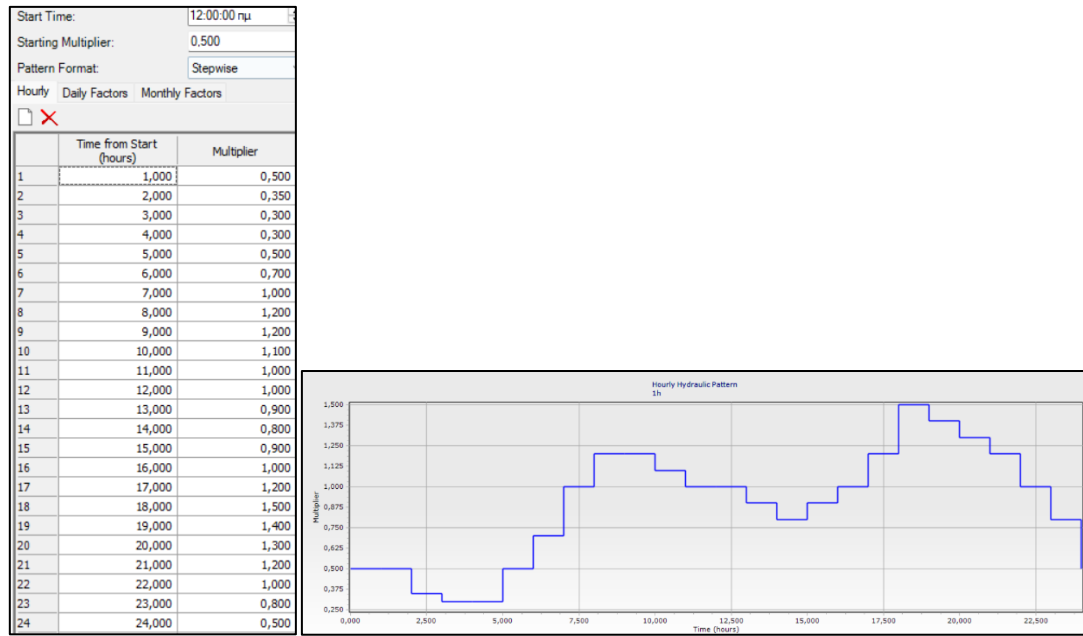
Πίνακας 2.4 Δεδομένα εισαγωγής σωλήνων

Label	Diameter (mm)	Material	Hazen-Williams C
P-1	152,4	Steel	110,0
P-2	152,4	PVC	140,0
P-3	152,4	PVC	140,0
P-5	152,4	Steel	110,0
P-4(1)	152,4	PVC	140,0
P-4(2)	152,4	PVC	140,0
P-13	152,4	Ductile Iron	130,0

Για τις τιμές μέσης ημερήσιας ζήτησης των υδρομέτρων, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές τιμές ζήτησης από τον Οκτώβριο του 2024 και έγινε η εισαγωγή τους στο Demand Control Center τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.7. Παράλληλα δημιουργήθηκε ημερήσιο Pattern ανά ώρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8, με βάση την κατά προσέγγιση ζήτηση που απαιτείται από ένα σπίτι μέσα σε μία ημέρα.

Label	Demand (Base) (m ³ /day)	Pattern (Demand)	Zone
J-1	0,2547	1h	Zone - 1
J-2	0,3531	1h	Zone - 1
J-3	1,1868	1h	Zone - 1
J-4	0,4450	1h	Zone - 1
J-5	0,6045	1h	Zone - 1

Εικόνα 2.7 Μέση ημερήσια ζήτηση



Εικόνα 2.8 Ημερήσιο pattern κατανάλωσης ανά ώρα

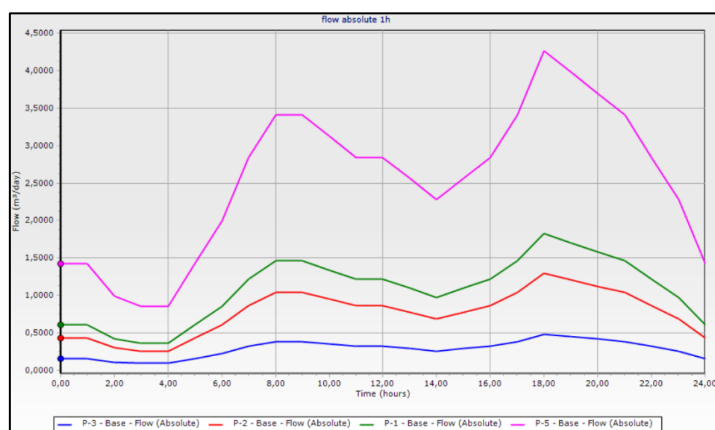
Για τη σωστή λειτουργία του δικτύου, χρειάστηκε να εφαρμοστούν κανόνες (Controls), τέτοιοι ώστε η δεξαμενή να γεμίζει πριν αδειάσει εντελώς:

Πίνακας 2.5 Controls για τον σωλήνα που συνδέει τη δεξαμενή με το ρεζερβουάρ

If Element	If Setting	If Operator	Value	Then	Then Element	Then Setting	Then Value
T-1	Level (m)	>	5,90	Then	P-13	Pipe Status	Closed
T-1	Level (m)	<	3,00	Then	P-13	Pipe Status	Open

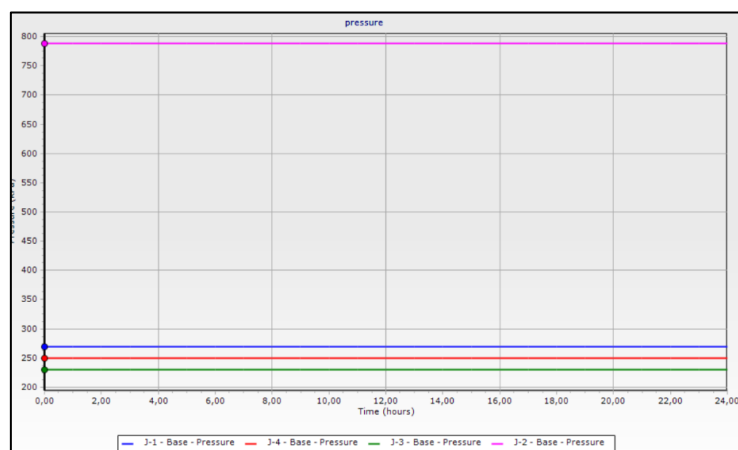
Με την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων και περιορισμών, έγινε η πρώτη υδραυλική προσομοίωση του δικτύου, για διάρκεια 24^{ωv} ωρών, με σκοπό να παρουσιαστούν βασικές υδραυλικές μεταβλητές, όπως πίεση, ροή, στάθμες δεξαμενών, κατανομή ζήτησης, τα οποία δίνονται παρακάτω. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων γίνεται με σκοπό τη μετέπειτα σύγκριση της συμπεριφοράς του δικτύου, καθώς προστίθενται περισσότερες ζώνες. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η προσομοίωση διαρροών και το stress test που εφαρμόστηκε για την κατανόηση και επαλήθευση της λειτουργίας του Darwin Calibrator ως προς την προσομοίωση διαρροών. Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την αρχική κατάσταση του δικτύου:

- Αποτελέσματα ροής του δικτύου



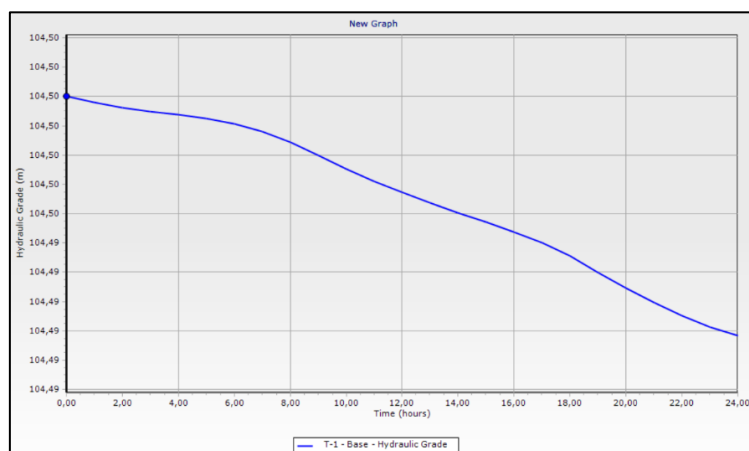
Διάγραμμα 2.1 Ροή Ζώνης 1

- Αποτελέσματα πίεσης στους κόμβους του δικτύου

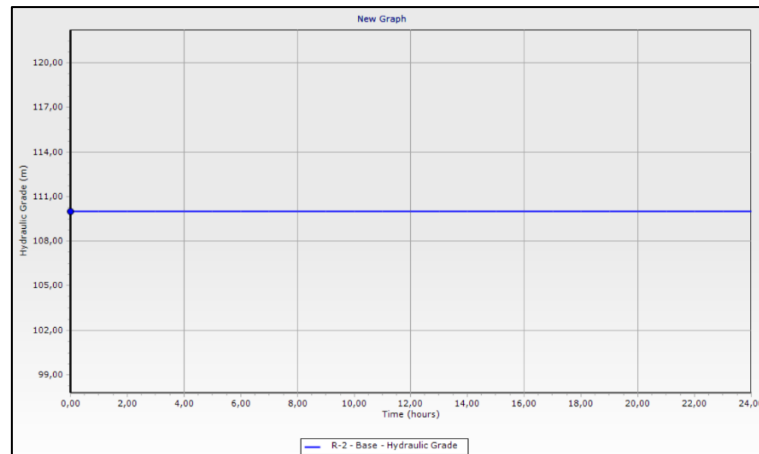


Διάγραμμα 2.2 Πίεση στους κόμβους της Ζώνης 1

- Απεικόνιση υδραυλικής κλίσης (hydraulic grade) για τη δεξαμενή και το ρεζερβουάρ

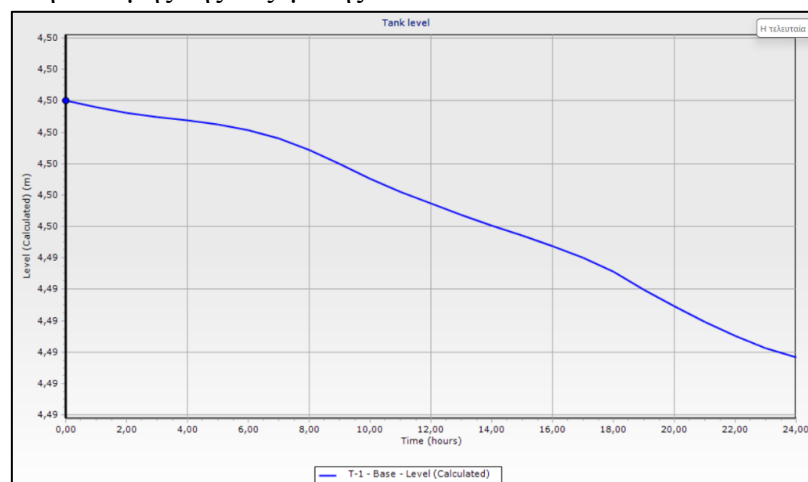


Διάγραμμα 2.3 Υδραυλική κλίση δεξαμενής στη Ζώνη 1



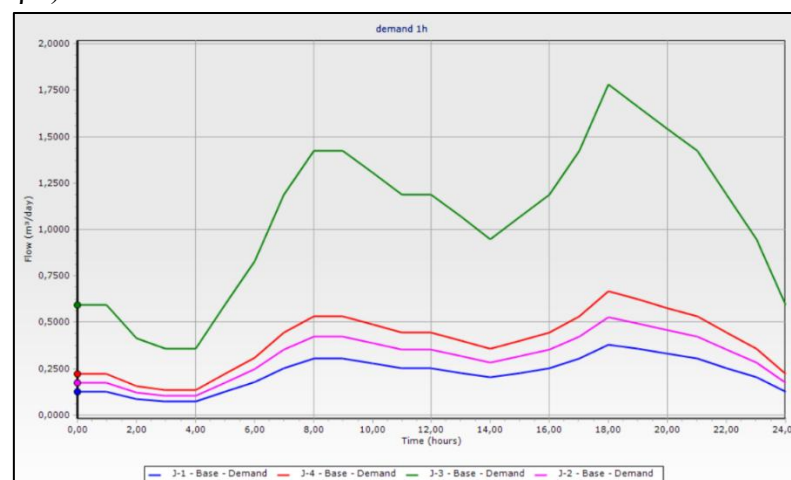
Διάγραμμα 2.4 Υδραυλική κλίση ρεζερβουάρ στη Ζώνη 1

- Απεικόνιση στάθμης της δεξαμενής



Διάγραμμα 2.5 Στάθμη δεξαμενής στη Ζώνη 1

- Απεικόνιση μέσης ημερήσιας ζήτησης ($\frac{m^3}{day}$) στους κόμβους του δικτύου (υδρόμετρα)



Διάγραμμα 2.6 Μέση ημερήσια ζήτηση υδρομέτρων της Ζώνης 1

2.1.1.1 Προσομοίωση εύρεσης διαρροών στη Ζώνη 1

Το εργαλείο Darwin Calibrator χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό διαρροών, με δεδομένα εισαγωγής τις μετρήσεις υδραυλικής κλίσης (Hydraulic Grade) όλων των κόμβων του δικτύου και την τιμή εκροής του αγωγού που συνδέει την δεξαμενή με τον πρώτο κόμβο/υδρόμετρο του δικτύου. Παρότι το σύνηθες είναι να χρησιμοποιείται η παροχή του αγωγού που συνδέει το ρεζερβουάρ με την δεξαμενή ως σημείο αναφοράς για τη βαθμονόμηση με το Darwin Calibrator, στη παρούσα περίπτωση κρίθηκε καταλληλότερη η επιλογή του αγωγού P-5 λόγω του τρόπου λειτουργίας του συστήματος, καθώς ο αγωγός ρεζερβουάρ-δεξαμενής παραμένει κλειστός καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και συνεπώς δεν παρέχει αντιπροσωπευτική παροχή. Αντιθέτως, ο P-5 εκφράζει τη ροή που τροφοδοτεί άμεσα τις καταναλώσεις.

Έπειτα, ορίστηκε μέγιστη τιμή για τον συντελεστή εκπομπής το 0,4 η οποία θα καθορίσει το μέγεθος της πιθανής διαρροής. Ο αριθμός των κόμβων στους οποίους θα εφαρμοστεί ο έλεγχος διαρροών είναι 5, όσοι δηλαδή οι κόμβοι του δικτύου της Ζώνης 1. Η διαδικασία εκτελέστηκε για τις 4 π.μ. καθώς τις πρωινές ώρες υπάρχει η μικρότερη κατανάλωση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι:

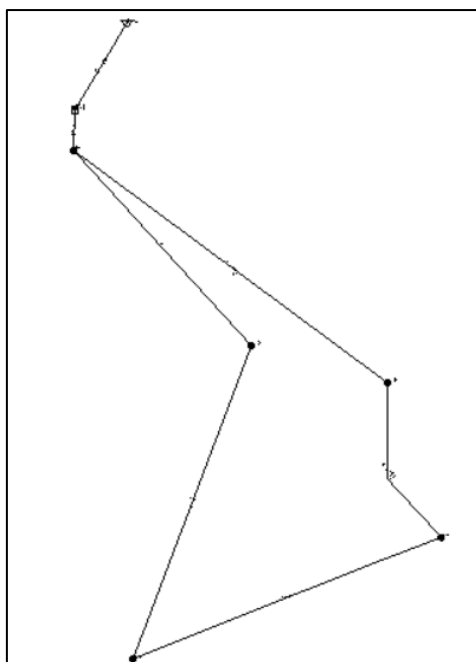
Solution	Fitness	Emitter Coefficient (L/s/(m H ₂ O) ⁻ⁿ)	Number of Leakage Nodes	Original Emitter Coefficient (L/s/(m H ₂ O) ⁻ⁿ)	Adjusted Emitter Coefficient (L/s/(m H ₂ O) ⁻ⁿ)
Solution 1	0,000	(N/A)	0	0,000	0,000
				0,000	0,000
				0,000	0,000
				0,000	0,000
				0,000	0,000

Εικόνα 2.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροών στο δίκτυο της Ζώνης 1

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.9. Το Fitness της λύσης εκφράζει το σφάλμα μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται από το υδραυλικό μοντέλο και των πραγματικών δεδομένων που έχουν εισαχθεί. Όσο μικρότερη τιμή έχει, τόσο καλύτερη θεωρείται η προσαρμογή του μοντέλου (calibration). Στην περίπτωση του δικτύου της Ζώνης 1, προκύπτει μηδενικό Fitness, επομένως η προσομοίωση του μοντέλου ταιριάζει απόλυτα στα πραγματικά δεδομένα. Επίσης, δεν εμφανίστηκαν κόμβοι στους οποίους είναι πιθανό να υπάρξει διαρροή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10.

Πίνακας 2.6 Κλίμακα συντελεστή εκπομπών

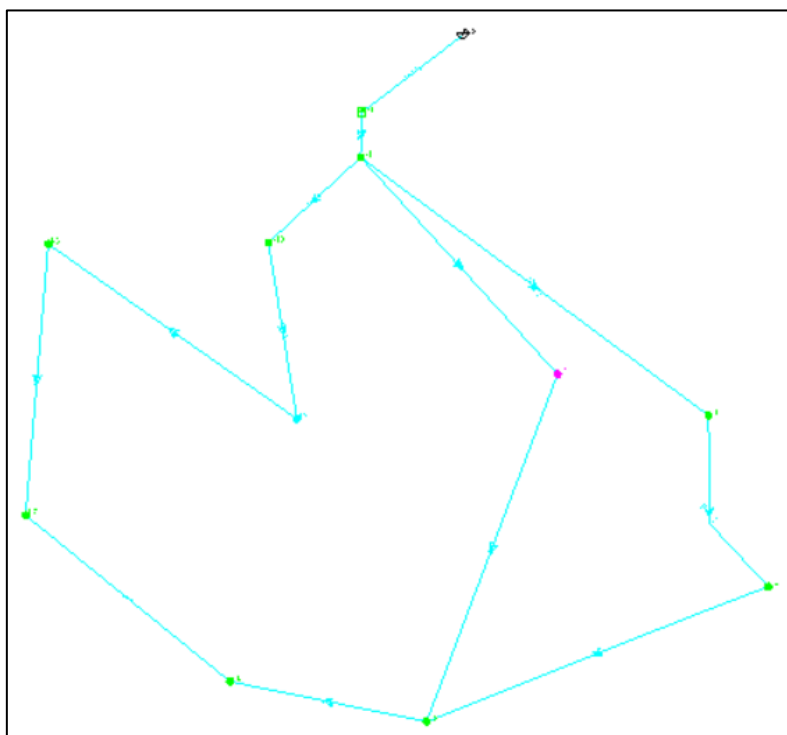
Τιμή \leq (L/s/(mH ₂ O) ⁿ)	Χρώμα
0,000	Μαύρο
0,100	Λευκό
0,200	Κίτρινο
0,300	Πορτοκάλι
0,400	Κόκκινο



Εικόνα 2.10 Πιθανοί κόμβοι διαρροών στις 4 π.μ.

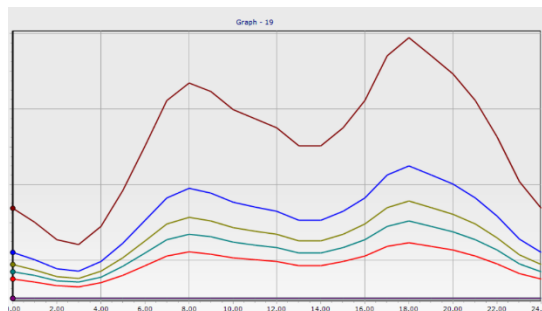
2.1.2 Ζώνη 2

Ο σχεδιασμός της Ζώνης 2 έγινε χειροκίνητα, εκτελέστηκε η πρώτη προσομοίωση και στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των τιμών ζήτησης για τους νέους κόμβους που προστέθηκαν. Το δίκτυο έχει πλέον δύο ζώνες όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11.

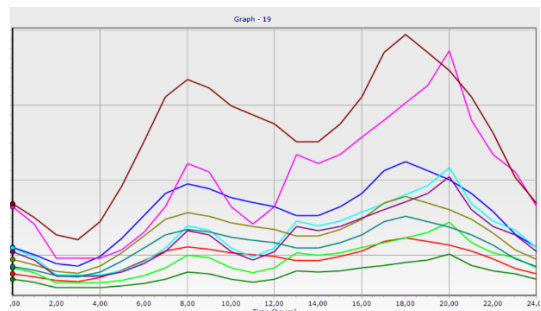


Εικόνα 2.11 Απεικόνιση του δικτύου μετά την προσθήκη της Ζώνης 2

Με σκοπό να προσεγγιστούν πιο ρεαλιστικά οι πραγματικές συνθήκες κατανάλωσης, δημιουργήθηκε ξεχωριστό ημερήσιο pattern κατανάλωσης ανά ώρα για τη Ζώνη 2, ώστε να διαφοροποιηθεί με τη Ζώνη 1 σε ότι αφορά τις απαιτήσεις νερού. Η μέση ημερήσια ζήτηση στους κόμβους πριν και μετά την προσθήκη τιμών στη Ζώνη 2:

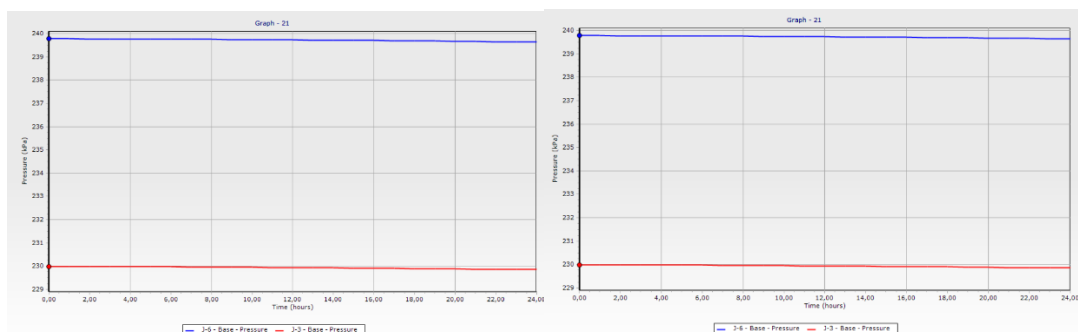


Διάγραμμα 2.7 Μηδενική ζήτηση στη Ζώνη 2

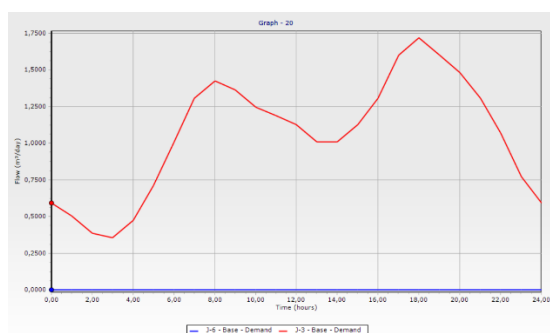


Διάγραμμα 2.8 Εισαγωγή τιμών ζήτησης στη Ζώνη 2

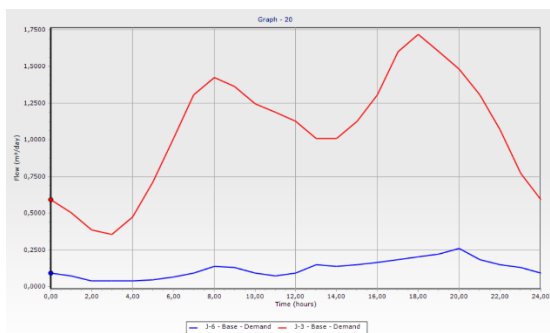
Οι τιμές που προστέθηκαν δεν επηρεάζουν την πίεση και τη ροή του νερού στη Ζώνη 1, άρα η ύπαρξη ή μη ζήτησης σε γειτονικό κόμβο δεν επηρεάζει ουσιαστικά κόμβους με σταθερή κατανάλωση, επομένως το υδραυλικό μοντέλο αποδίδει σωστά τη λειτουργία των κόμβων. Η συμπεριφορά του μοντέλου αποτυπώνεται στα ακόλουθα γραφήματα, τα οποία αφορούν δύο επιλεγμένους γειτονικούς κόμβους, ο κόμβος J-3 για την Ζώνη 1 και ο κόμβος J-4 για τη Ζώνη 2:



Διάγραμμα 2.9 Σταθερή πίεση πριν και μετά την προσθήκη τιμών ζήτησης στη Ζώνη 2



Διάγραμμα 2.10 Μηδενική ζήτηση στη Ζώνη 2



Διάγραμμα 2.11 Μη μηδενική ζήτηση στη Ζώνη 2

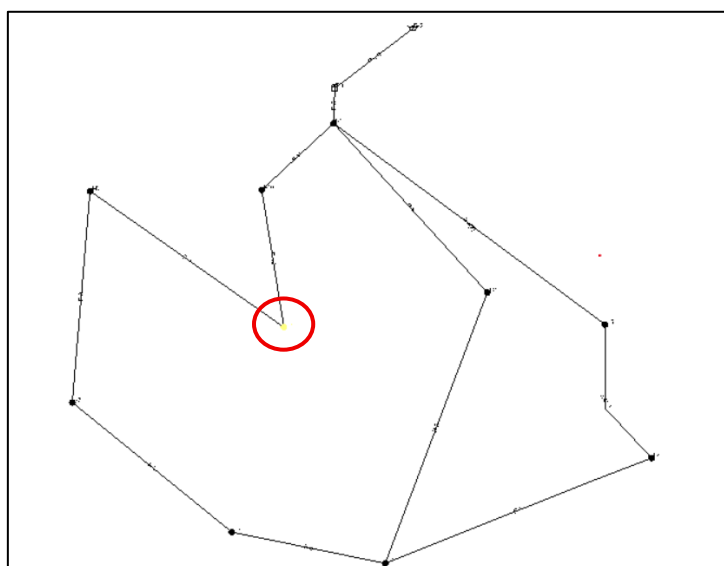
Στην Εικόνα 2.12, παρουσιάζονται οι τιμές μέσης ημερήσιας ζήτησης που έχουν εισαχθεί στο δίκτυο.

Label	Demand (Base) (m ³ /day)	Pattern (Demand)	Zone
J-1	0,2547	1h (zone 1)	Zone - 1
J-2	0,3531	1h (zone 1)	Zone - 1
J-3	1,1868	1h (zone 1)	Zone - 1
J-4	0,4450	1h (zone 1)	Zone - 1
J-5	0,6045	1h (zone 1)	Zone - 1
J-6	0,1843	1h (zone 2)	Zone - 2
J-7	0,5539	1h (zone 2)	Zone - 2
J-9	0,5971	1h (zone 2)	Zone - 2
J-8	0,3355	1h (zone 2)	Zone - 2
J-10	1,1525	1h (zone 2)	Zone - 2

Εικόνα 2.12 Μέση ημερήσια ζήτηση στις δύο ζώνες

2.1.2.1 Προσομοίωση εύρεσης διαρροών στις Ζώνες 1 & 2

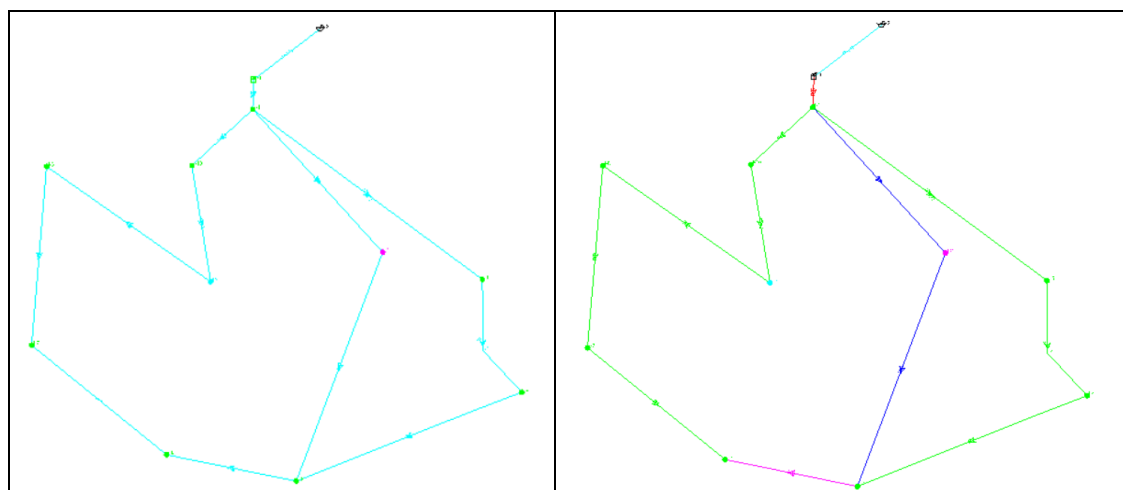
Η προσομοίωση διαρροών πραγματοποιήθηκε για δύο σενάρια, με μηδενικές τιμές ζήτησης στη Ζώνη 2 και με μη μηδενικές τιμές ζήτησης, με σκοπό να παρατηρηθούν τυχόν αλλαγές στη λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου λόγω της ζήτησης. Στο συγκεκριμένο δίκτυο ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε καμία διαφορά, καθώς και στα δύο σενάρια ο κόμβος J-9 είναι ο μοναδικός που παρουσιάζει πιθανότητα διαρροής με την ίδια τιμή πιθανότητας 0,010 (L/s/(mH₂O))ⁿ και παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.13.



Εικόνα 2.13 Πιθανότητα διαρροής στον κόμβο J-9

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ένα stress test, μία δοκιμή αντοχής, με στόχο την κατανόηση της συμπεριφοράς του Darwin Calibrator και την αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου. Αυξήθηκε χειροκίνητα η τιμή του emitter coefficient στον κόμβο J-6 της Ζώνης 2, στα 0,400 από αρχική τιμή μηδέν. Οι αλλαγές στη συμπεριφορά της ροής του

δικτύου και οι κόμβοι που επηρεάστηκαν ως προς αυτή απεικονίζονται παρακάτω, Εικόνα 2.14:



Εικόνα 2.14 Αλλαγές στη ροή του δικτύου μετά από δοκιμή αντοχής στον κόμβο J-6

Η προσομοίωση διαρροών πραγματοποιήθηκε ξανά για δύο σενάρια μηδενικών και μη μηδενικών τιμών ζήτησης στη Ζώνη 2, με τα αποτελέσματα να δίνουν τους ίδιους 4 κόμβους για πιθανή εμφάνιση διαρροών με μικρές αποκλίσεις στα μεγέθη των πιθανοτήτων, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.15:

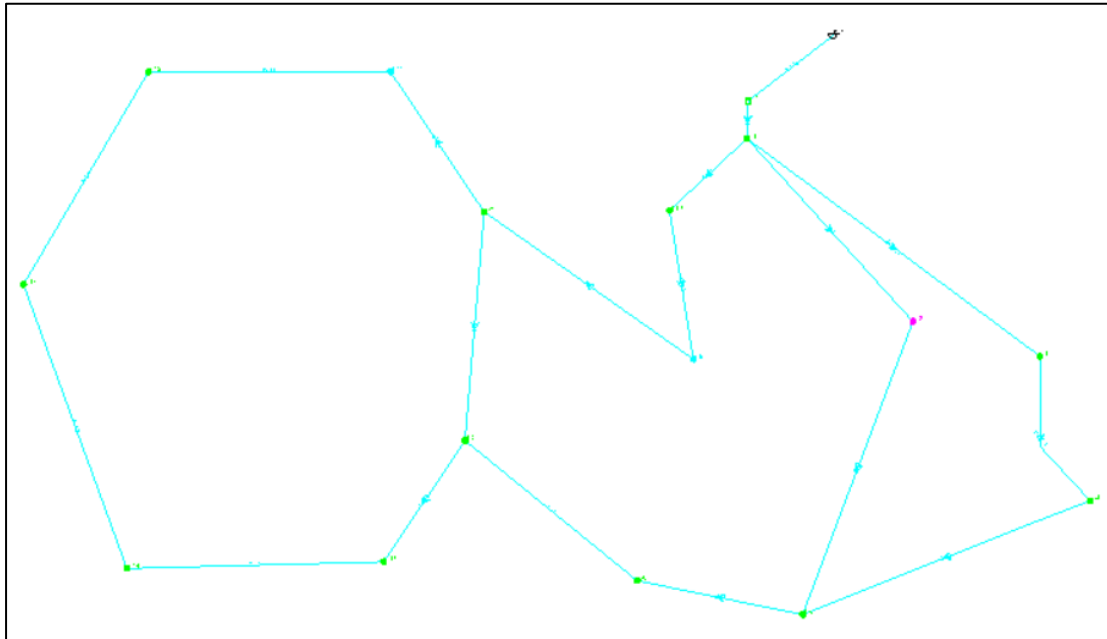
Number of Leakage Nodes	Adjusted Emitter Coefficient (L/s/(m H2O) ⁿ)	Adjusted Emitter Coefficient (L/s/(m H2O) ⁿ)
4	0,230	0,200
	0,000	0,000
	0,000	0,000
	0,000	0,000
	0,000	0,000
	0,400	0,400
	0,040	0,040
	0,000	0,000
	0,010	0,020
	0,170	0,160

Εικόνα 2.15 Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροών με ή χωρίς τιμές ζήτησης στη Ζώνη 2

Αφού λοιπόν, οι ίδιοι τέσσερις κόμβοι αναδείχθηκαν ως πιθανές θέσεις διαρροής, συμπεραίνεται πως η παρουσία ή μη ζήτησης στη Ζώνη 2 δεν επηρεάζει την χωρική εντόπιση διαρροών. Οι αποκλίσεις που παρουσιάστηκαν αφορούν την τιμή του συντελεστή εκπομπής, δηλαδή το μέγεθος της πιθανότητας εκδήλωσης διαρροής, γεγονός που δείχνει μία περιορισμένη ευαισθησία του μοντέλου στις συνθήκες ζήτησης, με τα αποτελέσματα να επηρεάζονται μόνο ποσοτικά και όχι ποιοτικά. Στο σύνολο της, η διαδικασία εύρεσης διαρροών με το Darwin Calibrator εμφανίζει σταθερότητα, με τις ποσοτικές διαφοροποιήσεις να ερμηνεύονται στο πλαίσιο των αναμενόμενων αβεβαιοτήτων.

2.1.3 Ζώνη 3

Για το σχεδιασμό της Ζώνης 3 ακολουθήθηκε το ίδιο μοτίβο προσθήκης πέντε ακόμη κόμβων/υδρομέτρων, γειτονικά της Ζώνης 2 και απεικονίζεται στην Εικόνα 2.16.



Εικόνα 2.16 Απεικόνιση του δικτύου μετά την προσθήκη της Ζώνης 3

Έγινε εισαγωγή δεδομένων μέσης ημερήσιας ζήτησης, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.17, με τις πραγματικές μετρήσεις από τον Οκτώβριο του 2024 και δημιουργήθηκε ξεχωριστό 24ωρο pattern για τη Ζώνη 3, Εικόνα 2.18. Σκοπός είναι να προσομοιωθεί ένα δίκτυο που να προσεγγίζει ρεαλιστικά πραγματικές συνθήκες κατανάλωσης για να μελετηθεί η υδραυλική συμπεριφορά του.

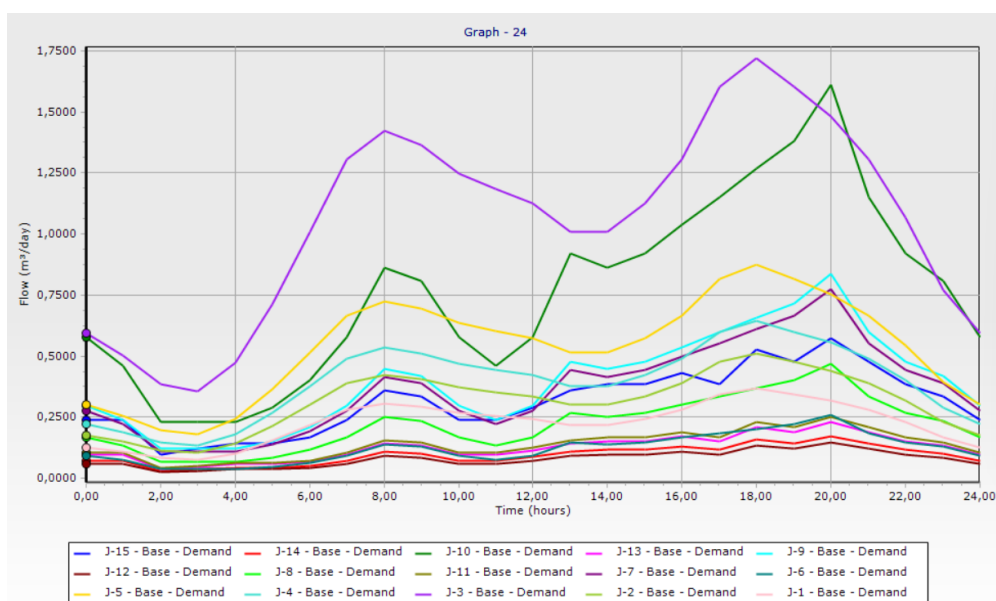
Label	Demand (Base) (m ³ /day)	Pattern (Demand)	Zone
J-1	0,2547	1h (zone 1)	Zone - 1
J-2	0,3531	1h (zone 1)	Zone - 1
J-3	1,1868	1h (zone 1)	Zone - 1
J-4	0,4450	1h (zone 1)	Zone - 1
J-5	0,6045	1h (zone 1)	Zone - 1
J-6	0,1843	1h (zone 2)	Zone - 2
J-7	0,5539	1h (zone 2)	Zone - 2
J-9	0,5971	1h (zone 2)	Zone - 2
J-8	0,3355	1h (zone 2)	Zone - 2
J-10	1,1525	1h (zone 2)	Zone - 2
J-15	0,4790	1h (zone 3)	Zone - 3
J-14	0,1444	1h (zone 3)	Zone - 3
J-13	0,1904	1h (zone 3)	Zone - 3
J-12	0,1209	1h (zone 3)	Zone - 3
J-11	0,2092	1h (zone 3)	Zone - 3

Εικόνα 2.17 Μέση ημερήσια ζήτηση στις 3 ζώνες του δικτύου

	Time from Start (hours)	Multiplier	Multiplier	Multiplier
1	1,000	0,500	0,400	0,500
2	2,000	0,350	0,200	0,200
3	3,000	0,300	0,200	0,250
4	4,000	0,300	0,200	0,300
5	5,000	0,500	0,250	0,300
6	6,000	0,700	0,350	0,350
7	7,000	1,000	0,500	0,500
8	8,000	1,200	0,750	0,750
9	9,000	1,200	0,700	0,700
10	10,000	1,100	0,500	0,500
11	11,000	1,000	0,400	0,500
12	12,000	1,000	0,500	0,600
13	13,000	0,900	0,800	0,750
14	14,000	0,800	0,750	0,800
15	15,000	0,900	0,800	0,800
16	16,000	1,000	0,900	0,900
17	17,000	1,200	1,000	0,800
18	18,000	1,500	1,100	1,100
19	19,000	1,400	1,200	1,000
20	20,000	1,300	1,400	1,200
21	21,000	1,200	1,000	1,000
22	22,000	1,000	0,800	0,800
23	23,000	0,800	0,700	0,700
24	24,000	0,500	0,500	0,500

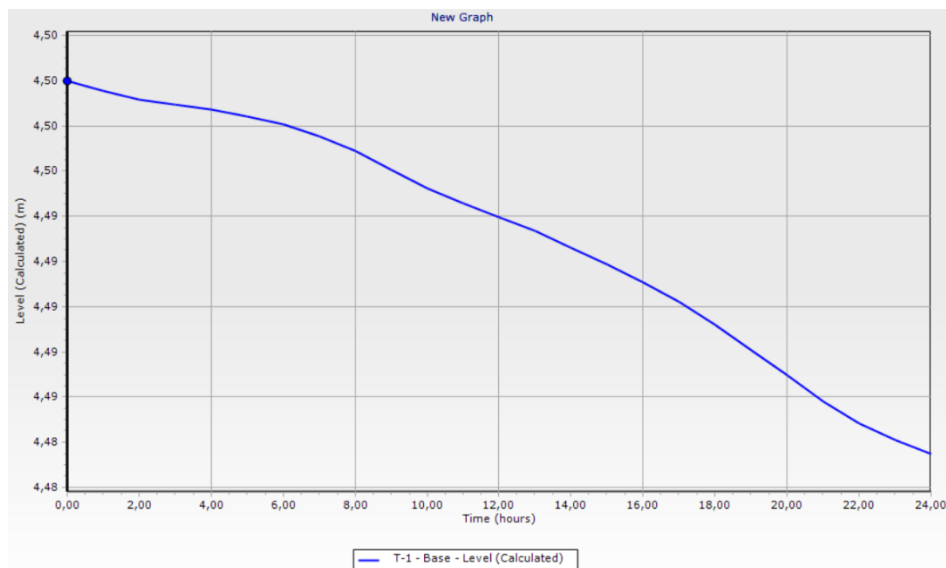
Εικόνα 2.18 Τα τρία pattern κατανάλωσης για κάθε ζώνη

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα το γράφημα ζήτησης/ροής που προκύπτει για κάθε υδρόμετρο είναι:



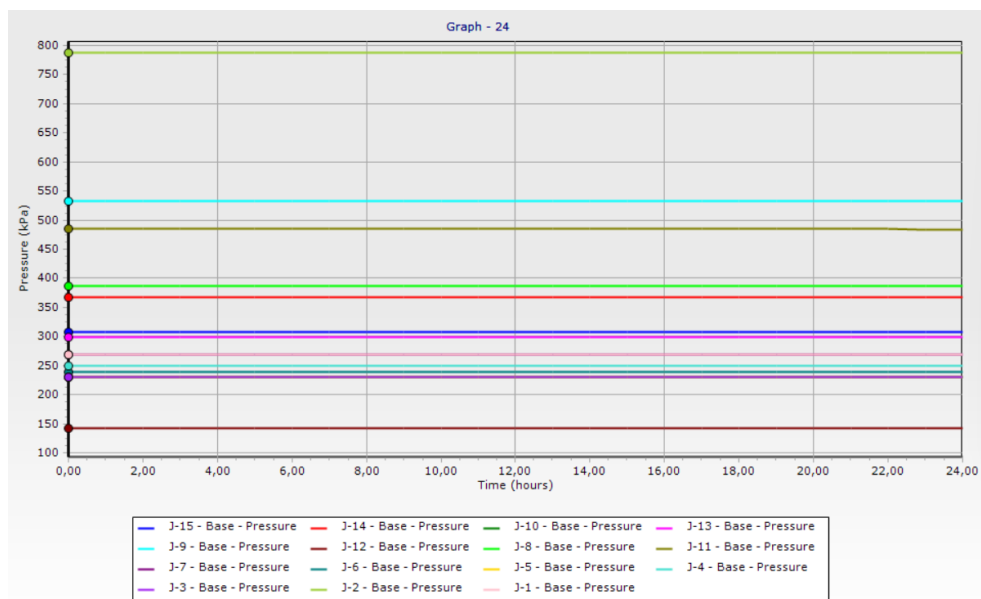
Διάγραμμα 2.11 Ζήτηση για κάθε υδρόμετρο

Για 15 πλέον κόμβους/υδρόμετρα η δεξαμενή του δικτύου δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα, μετά την πρώτη προσομοίωση:



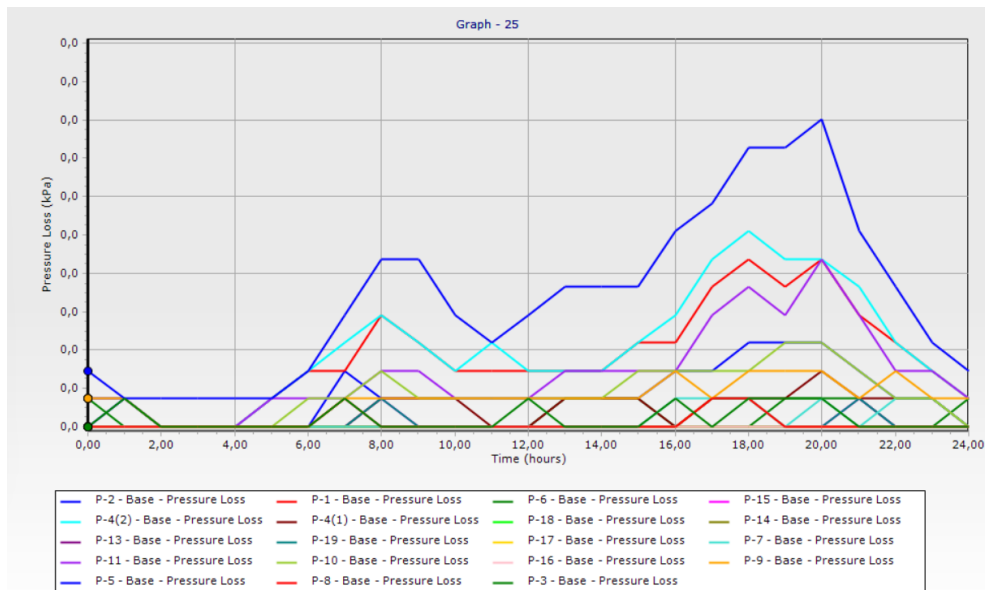
Διάγραμμα 2.12 Στάθμη της δεξαμενής

Η πίεση στους κόμβους είναι σταθερή και αντιστακτά το γεγονός ότι το υπό μελέτη δίκτυο λειτουργεί βαρυτικά.



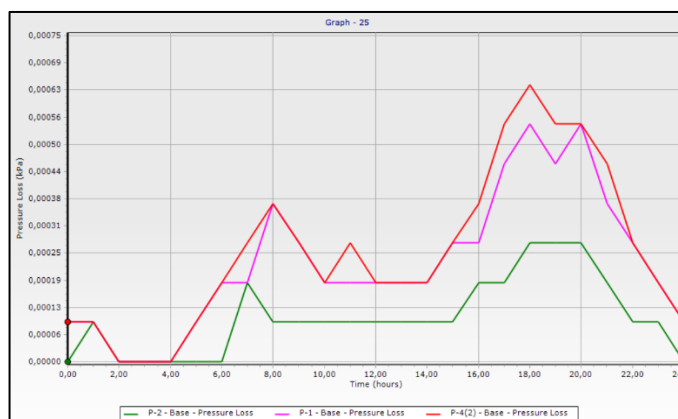
Διάγραμμα 2.13 Πίεση στους κόμβους του δικτύου

Η απώλεια φορτίου (pressure loss) που παρατηρείται στους αγωγούς, αφορά την απώλεια πίεσης κατά μήκος των αγωγών λόγω τριβών και ροής.

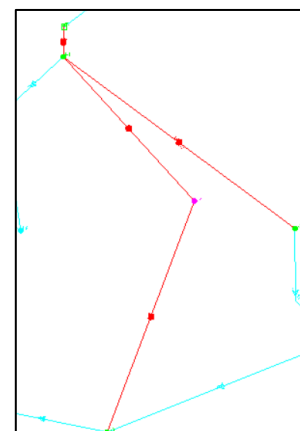


Διάγραμμα 2.14 Απώλεια φορτίου στους αγωγούς

Η μεγαλύτερη απώλεια φορτίου παρατηρείται στις ώρες αιχμής (18:00 – 20:00) καθώς τότε η ζήτηση είναι μεγαλύτερη, επομένως η ροή και οι τριβές αυξάνονται. Οι αγωγοί P-1, P-2, P-4(2) έχουν σημαντικά υψηλότερες απώλειες σε σχέση με τους υπόλοιπους και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 2.15. Οι αγωγοί αυτοί βρίσκονται στη Ζώνη 1, με τους P-1 και P-4(2) να συνδέονται με τον κόμβο που τροφοδοτείται απευθείας από τη δεξαμενή, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.19, και έτσι να λειτουργούν ως κύριοι τροφοδοτικοί αγωγοί. Δέχονται όλη τη ροή που απαιτείται για να τροφοδοτήσουν τους άμεσα συνδεδεμένους κόμβους αλλά και τους επόμενους που βρίσκονται στη σειρά. Επομένως η παροχή είναι μεγαλύτερη, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες ταχύτητες και άρα μεγαλύτερες απώλειες φορτίου. Ο P-2 είναι συνδεδεμένος σε σειρά με τον P-1, τροφοδοτείται από αυτόν, επομένως υιοθετεί τις υδραυλικές συνθήκες του P-1, τις ήδη αυξημένες ροές και απώλειες.



Διάγραμμα 2.15 Απώλεια φορτίου στους αγωγούς



Εικόνα 2.19 Η θέση των αγωγών στο δίκτυο

2.1.3.1 Προσομοίωση εύρεσης διαρροών στις Ζώνες 1, 2 & 3

Πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση εύρεσης διαρροών στο δίκτυο που πλέον εμπεριέχει τις Ζώνες 1, 2 και 3. Ο αλγόριθμος έτρεξε για την ώρα 4 π.μ. και έδωσε μία πολύ καλή τιμή Fitness 0,002 στοιχείο που καταδεικνύει καλή σύγκλιση του μοντέλου και υψηλό βαθμό αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων καθώς και 5 κόμβους με πιθανότητα διαρροής και παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.20:

Fitness	Number of Leakage Nodes
0,002	5

Εικόνα 2.20 Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροών από το Darwin Calibrator

Η μέγιστη πιθανή τιμή που δόθηκε στον συντελεστή εκπομπής για τη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι 0,500 και η υψηλότερη τιμή που έδωσε σαν αποτέλεσμα το Darwin Calibrator είναι 0,100 και αποδόθηκε στον κόμβο J-1, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.21, καθιστώντας τον, τον πλέον πιθανό υποψήφιο για παρουσίαση διαρροής. Οι υπόλοιποι τέσσερις κόμβοι εμφάνισαν αρκετά χαμηλότερες τιμές από 0,01- 0,05 επομένως εμφανίζουν μικρή πιθανότητα για παρουσία διαρροής.

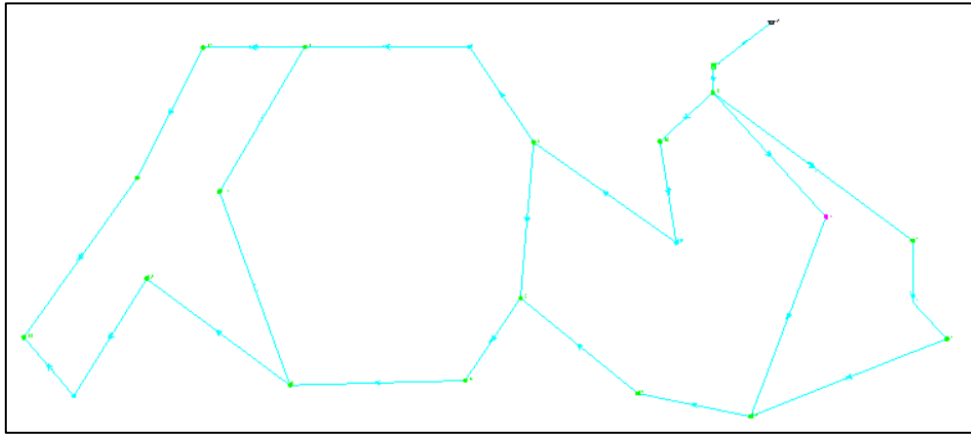
	Adjusted Emitter Coefficient (L/s/(m H ₂ O) ⁿ)
J-1	0,100
J-2	0,020
J-3	0,000
J-4	0,000
J-5	0,000
J-6	0,010
J-7	0,050
J-8	0,000
J-9	0,000
J-10	0,030
J-11	0,000
J-12	0,000
J-13	0,000
J-14	0,000
J-15	0,000

Εικόνα 2.21 Αποτελέσματα του συντελεστή εκπομπής που έδωσε το Darwin Calibrator

Καθώς αυξάνονται οι κόμβοι με την προσθήκη κάθε νέας ζώνης, αυξάνεται και ο αριθμός των πιθανών θέσεων διαρροής που εντοπίζονται από το λογισμικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε πρόσθετος κόμβος αποτελεί μία νέα πιθανή παράμετρο εκτίμησης, διευρύνοντας τον χώρο αναζήτησης του αλγορίθμου. Ωστόσο, δίνοντας χαμηλή τιμή Fitness και έναν κόμβο με σαφώς υψηλότερο συντελεστή εκπομπής από τους υπόλοιπους, το λογισμικό παρέχει μια αρκετά αξιόπιστη και στοχευμένη εκτίμηση για την πιθανή θέση διαρροής.

2.1.4 Ζώνη 4

Η προσθήκη της Ζώνης 4 έγινε με την εισαγωγή πέντε ακόμη κόμβων στο δίκτυο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.22. Δόθηκαν τιμές μέσης ημερήσιας ζήτησης στους κόμβους/υδρόμετρα και δημιουργήθηκε και τέταρτο pattern κατανάλωσης ανά ώρα.



Εικόνα 2.22 Απεικόνιση του δικτύου με τις 4 ζώνες

Το pattern κατανάλωσης που προστέθηκε για την 4^η και τελευταία ζώνη απεικονίζεται στην Εικόνα 2.23:

Time from Start (hours)	Multiplier
1,000	0,500
2,000	0,250
3,000	0,300
4,000	0,350
5,000	0,500
6,000	0,600
7,000	0,900
8,000	1,000
9,000	1,200
10,000	1,000
11,000	0,900
12,000	0,800
13,000	1,000
14,000	1,200
15,000	0,800
16,000	0,800
17,000	1,100
18,000	1,300
19,000	1,200
20,000	1,300
21,000	1,000
22,000	0,850
23,000	0,750
24,000	0,500

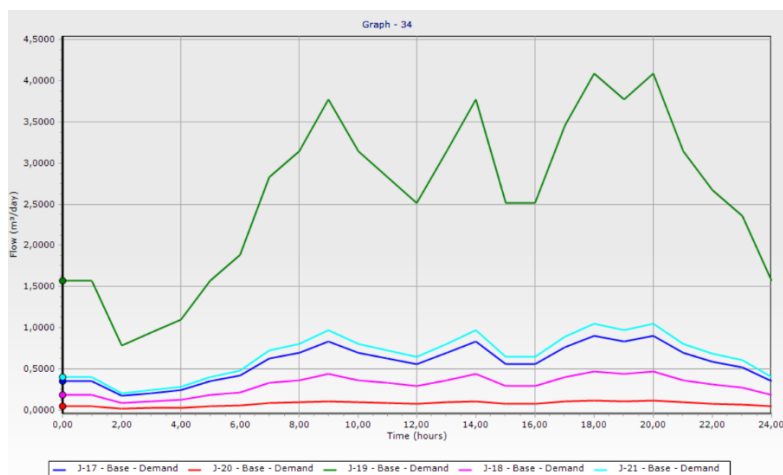
Εικόνα 2.23 Ημερήσιο pattern ανά ώρα για την Ζώνη 4

Οι τιμές μέσης ημερήσιας ζήτησης δίνονται στην Εικόνα 2.24:

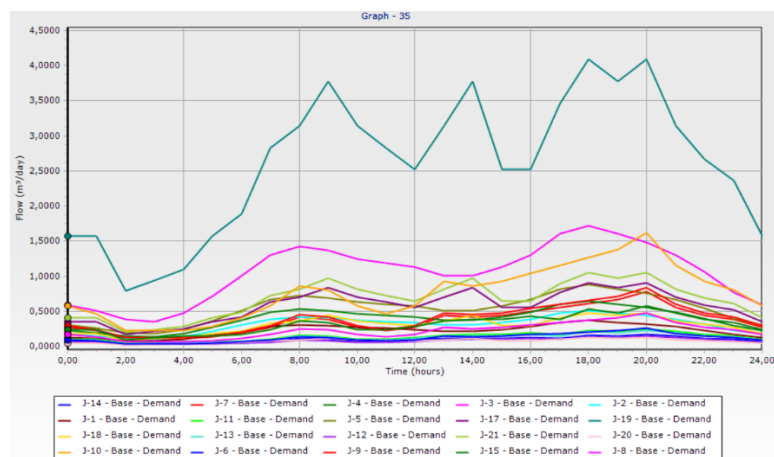
Label	Demand (Base) (m ³ /day)	Pattern (Demand)	Zone
J-1	0,2547	1h (zone 1)	Zone - 1
J-2	0,3531	1h (zone 1)	Zone - 1
J-3	1,1868	1h (zone 1)	Zone - 1
J-4	0,4450	1h (zone 1)	Zone - 1
J-5	0,6045	1h (zone 1)	Zone - 1
J-6	0,1843	1h (zone 2)	Zone - 2
J-7	0,5539	1h (zone 2)	Zone - 2
J-9	0,5971	1h (zone 2)	Zone - 2
J-8	0,3355	1h (zone 2)	Zone - 2
J-10	1,1525	1h (zone 2)	Zone - 2
J-15	0,4790	1h (zone 3)	Zone - 3
J-14	0,1444	1h (zone 3)	Zone - 3
J-13	0,1904	1h (zone 3)	Zone - 3
J-12	0,1209	1h (zone 3)	Zone - 3
J-11	0,2092	1h (zone 3)	Zone - 3
J-17	0,6979	1h (zone 4)	Zone - 4
J-18	0,3660	1h (zone 4)	Zone - 4
J-19	3,1447	1h (zone 4)	Zone - 4
J-20	0,0938	1h (zone 4)	Zone - 4
J-21	0,8097	1h (zone 4)	Zone - 4

Εικόνα 2.24 Τιμές ζήτησης για τις τέσσερις ζώνες

Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα το γράφημα ζήτησης/ροής για τους κόμβους της Ζώνης 4, αλλά και για τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου να είναι:



Διάγραμμα 2.16 Ζήτηση για τους κόμβους της Ζώνης 4



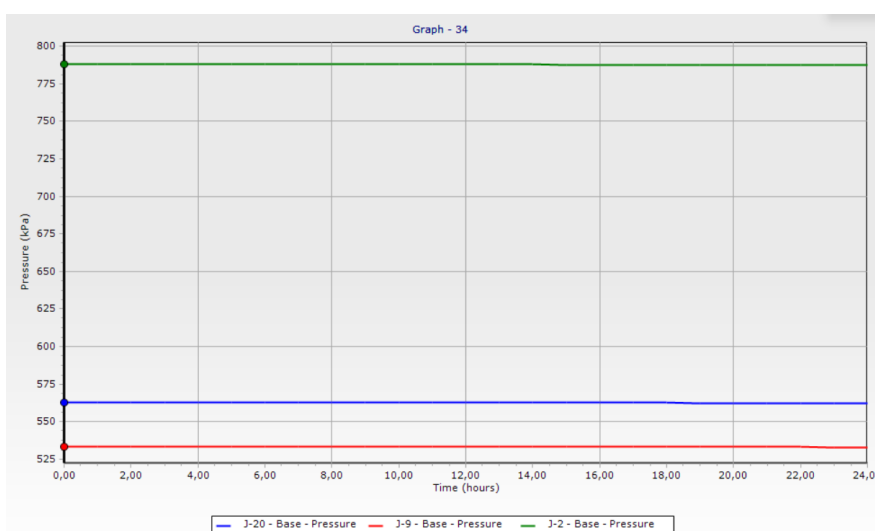
Διάγραμμα 2.17 Ζήτηση για όλους τους κόμβους/υδρόμετρα του δικτύου

Στο τελικό δίκτυο, οι κόμβοι/υδρόμετρα με τις υψηλότερες πιέσεις είναι το υδρόμετρο J-2 (Ζώνη 1), το υδρόμετρο J-9 (Ζώνη 2) και το υδρόμετρο J-20 (Ζώνη 4), με την κλίμακα για τις μετρήσεις πίεσης στους κόμβους να είναι:

Πίνακας 2.7 Κλίμακας Πίεσης

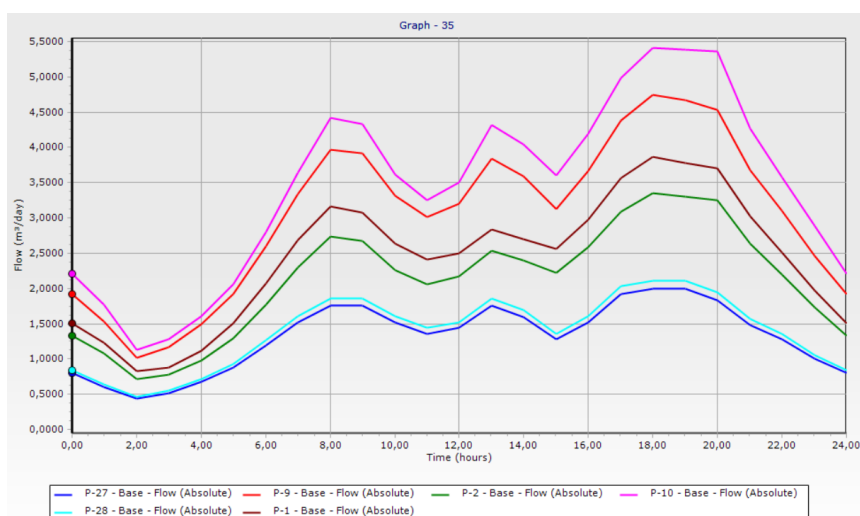
Τιμή ≤ (kPa)	Χρώμα
400	Λίμω
500	Κίτρινο
650	Μαύρο
800	Μαγenta
950	Κόκκινο

Και το γράφημα για τους κόμβους/υδρόμετρα με τις υψηλότερες τιμές πίεσης δίνεται:



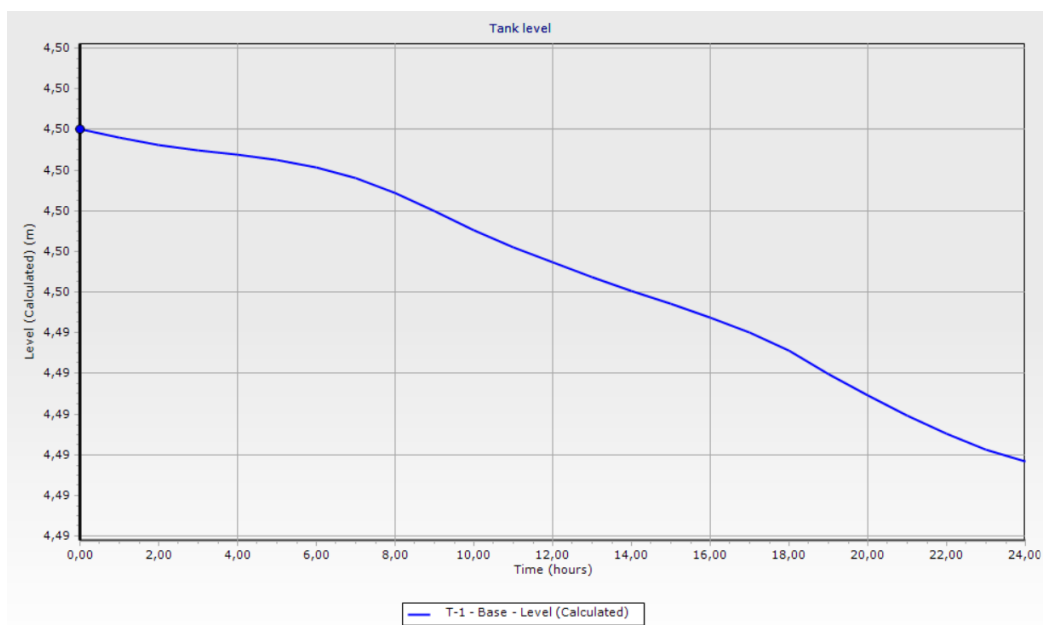
Διάγραμμα 2.18 Πίεση για τα υδρόμετρα J-2, J-9 & J-20

Η ροή για τους αγωγούς που βρίσκονται πριν και μετά το κάθε υδρόμετρο από τα παραπάνω, δίνουν το ακόλουθο γράφημα ροής (Flow Absolute):

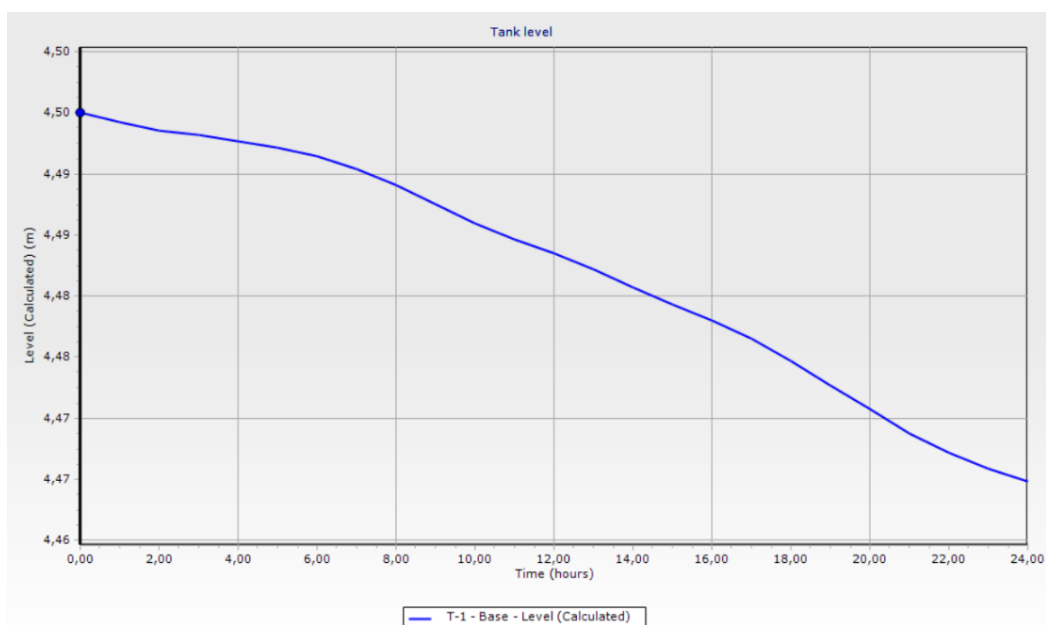


Διάγραμμα 2.19 Ροή για τους αγωγούς εκατέρωθεν των υδρομέτρων J-2, J-9 & J-20

Ωστόσο, ο αγωγός με την υψηλότερη τιμή ροής είναι ο αγωγός P-5, καθώς είναι αυτός που συνδέει την δεξαμενή με τον πρώτο κόμβο/υδρόμετρο του δικτύου. Παρά την προσθήκη περισσότερων κόμβων, η δεξαμενή δεν αδειάζει διότι για τις τιμές ζήτησης που έχουν δοθεί στους κόμβους, η τροφοδοσία επαρκεί. Η στάθμη της όμως, εμφανίζει την αναμενόμενη μείωση με την προσθήκη νέων κόμβων. Συγκριτικά, στο δίκτυο μόνο με τη Ζώνη 1, δηλαδή με πέντε κόμβους/ υδρόμετρα, η δεξαμενή έφτανε την κατώτερη τιμή 4,49m, ενώ στο δίκτυο με τις 4 ζώνες και είκοσι υδρόμετρα φτάνει στην τιμή 4,46m.



Διάγραμμα 2.20 Στάθμη δεξαμενής για την Ζώνη 1



Διάγραμμα 2.21 Στάθμη δεξαμενής με τις Ζώνες 1, 2, 3 & 4

2.1.4.1 Προσομοίωση εύρεσης διαρροών στις Ζώνες 1, 2, 3 & 4

Η προσομοίωση εύρεσης διαρροών για τις τέσσερις πλέον ζώνες, πραγματοποιήθηκε για τις 4 π.μ. , με σκοπό την αποφυγή υψηλής κατανάλωσης από τα υδρόμετρα ώστε το αποτέλεσμα για τη θέση της πιθανής διαρροής να έχει περισσότερη ακρίβεια. Έγινε εισαγωγή των τιμών υδραυλικού βαθμού των κόμβων για τις 4 π.μ. και της τιμής εκροής του αγωγού P-5 ο οποίος συνδέει τη δεξαμενή με τον πρώτο κόμβο και αποτελεί την κύρια έξοδο της δεξαμενής προς το δίκτυο. Τα αποτελέσματα του σεναρίου διαρροών για τις 4 π.μ. δίνονται στις Εικόνες 2.25 και 2.26:

Fitness	Number of Leakage Nodes
0,051	5

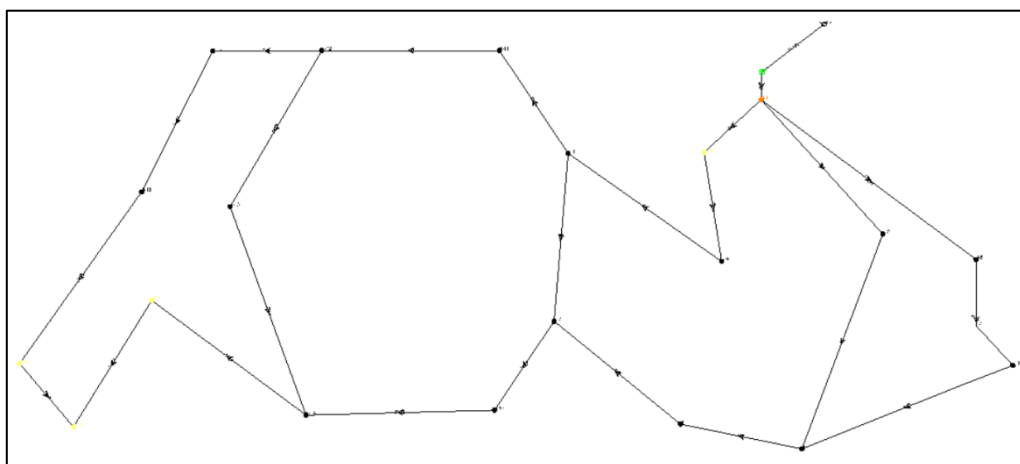
Εικόνα 2.25 Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροών από το Darwin Calibrator

Adjusted Emitter Coefficient (L/s/(m H ₂ O) ⁿ)
0,400
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,010
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,080
0,050
0,020
0,000
0,000

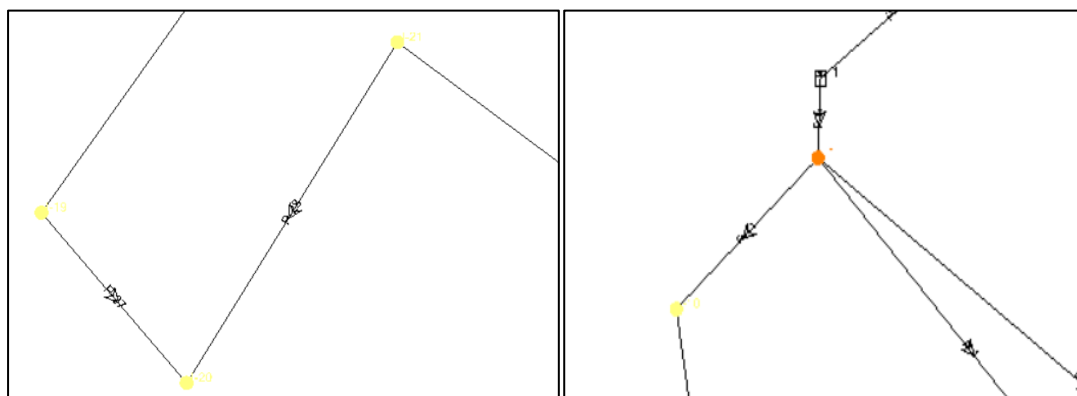
Εικόνα 2.26 Αποτελέσματα του συντελεστή εκπομπής που έδωσε το Darwin Calibrator

Από τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, φαίνεται πως οι περισσότερες θέσεις/κόμβοι (υδρόμετρα) του δικτύου, δεν παρουσιάζουν ενδείξεις διαρροής, καθώς δίνουν συντελεστή εκπομπής ίσο με το μηδέν. Αντιθέτως, εντοπίζονται μόνο 5 κόμβοι από τους 20 συνολικά, με μη μηδενικές τιμές, εκ των οποίων οι τέσσερις δίνουν τιμές εύρους 0,010 – 0,080 ενώ ο κόμβος J-1 είναι αυτός με την υψηλότερη τιμή 0,400 υποδεικνύοντας σημαντική πιθανή διαρροή. Συνεπώς το μοντέλο, όπως και στα σενάρια διαρροής για τις Ζώνες 2 και 3, παρουσιάζει στοχευμένα έναν κόμβο με την μεγαλύτερη πιθανότητα να παρουσιάσει διαρροή, τον κόμβο J-1. Το μοντέλο υποδεικνύει ότι οι διαρροές συγκεντρώνονται σε λίγους μόνο κόμβους, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της εκτίμησης. Το Fitness που έδωσε είναι 0,051 αρκετά

χαμηλή τιμή που επιβεβαιώνει την καλή σύγκλιση του μοντέλου. Στις Εικόνες 2.27 (α) και (β) απεικονίζονται οι θέσεις με τις πιθανές διαρροές.



Εικόνα 2.27 Σενάριο διαρροής στις 4 π.μ. για τις τέσσερις ζώνες



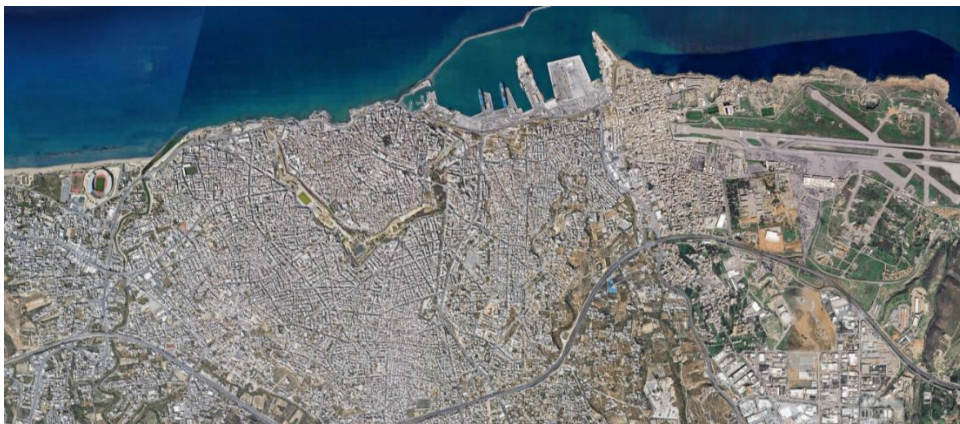
(α) Zoom στην περιοχή διαρροών της Ζώνης 4

(β) Zoom στην περιοχή διαρροών για τις Ζώνες 1&2

Το υδρόμετρο J-1 δίνει σε κάθε σενάριο για τις πρωινές ώρες, την μεγαλύτερη τιμή emitter coefficient. Το υδρόμετρο αυτό συνδέεται απευθείας με τον τροφοδοτικό αγωγό P-5, ο οποίος τον συνδέει με την δεξαμενή. Στην συγκεκριμένη θέση, μεταφέρονται μεγάλες τιμές παροχών και ροής ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται υψηλές υδραυλικές φορτίσεις, επομένως υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα ο αλγόριθμος να παρουσιάσει στο σημείο αυτό διαρροή. Με σκοπό την επαλήθευση του μηχανισμού, έγινε προσομοίωση για σενάριο διαρροής στις 14 μ.μ. θεωρώντας την ώρα αιχμής, και η επόμενη προσομοίωση έγινε για σενάριο στις 4 π.μ. αφαιρώντας τον J-1 από τα δεδομένα εισαγωγής για το calibration. Και στις δύο περιπτώσεις ο J-1 δεν παρουσίασε υψηλές τιμές emitter coefficient, ωστόσο ήταν μη μηδενικές, γεγονός που υποδεικνύει πως τα αποτελέσματα παρουσιάζουν χρονική ευαισθησία, ανάλογη με τα patterns ζήτησης, όμως όπως προαναφέρθηκε στο Leak Calibration έχει συνήθως μεγαλύτερη σημασία η ποιοτική πληροφορία που δίνεται (η θέση της πιθανότητας διαρροής) παρά η ποσοτική (η τιμή της πιθανότητας διαρροής). Ανεξαρτήτως, λοιπόν, σεναρίων αλλά και λόγω της θέσης του J-1 παρουσιάζεται σταθερότητα στο αποτέλεσμα ότι το συγκεκριμένο υδρόμετρο αποτελεί την πιο επίμονη ένδειξη πιθανής διαρροής στο δίκτυο.

3. Το υδατικό δίκτυο της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου

Το Ηράκλειο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, αποτελεί πρωτεύουσα της Κρήτης, είναι χτισμένο στη βόρεια ακτογραμμή του νησιού και βρέχεται από τον ομώνυμο κόλπο. Η περιοχή γύρω του χαρακτηρίζεται από χαμηλούς λόφους στα ανατολικά και κατά μήκος της ακτής, ενώ κοντά στον ποταμό Γιόφυρο το έδαφος γίνεται πιο ομαλό και στη νότια περιοχή του Ηρακλείου εκτείνεται η πεδιάδα της πόλης. Σύμφωνα με απογραφή που έγινε το 2021, ο Δήμος του Ηρακλείου αριθμεί 179.302 κατοίκους και κατατάσσεται τέταρτος σε πληθυσμό στην Ελλάδα. Ακόμη, το Ηράκλειο είναι μία πόλη που δέχεται έντονο τουρισμό τους καλοκαιρινούς μήνες, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τη ζήτηση νερού [6].



Εικόνα 3.1 Η πόλη του Ηρακλείου [27].

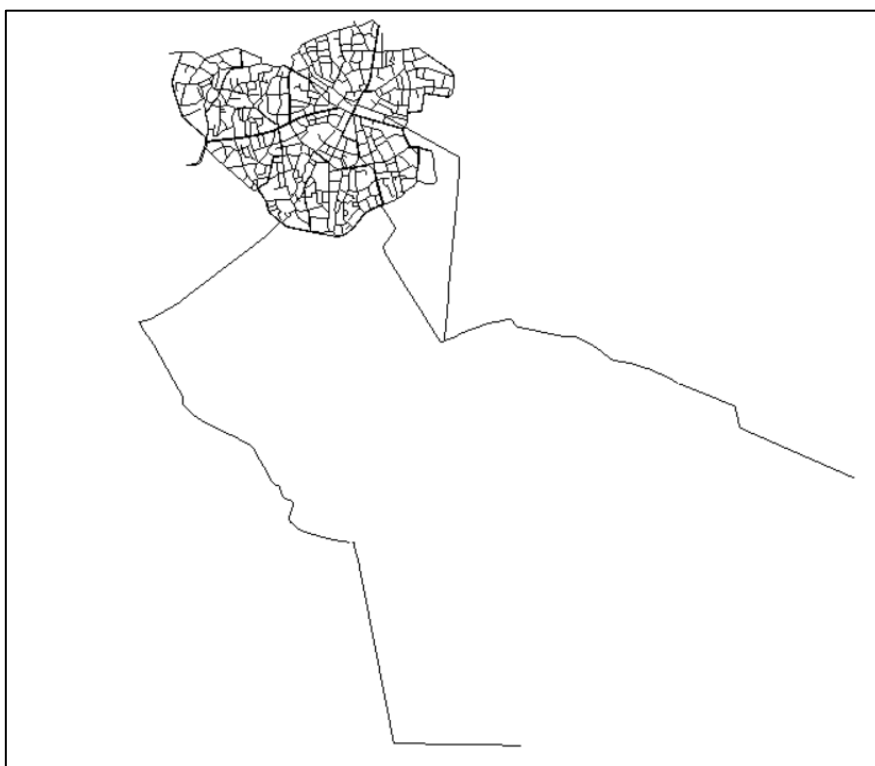
Το δίκτυο ύδρευσης της πόλης του Ηρακλείου τελεί υπό τη διαχείριση της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Ηρακλείου (Δ.Ε.Υ.Α.Η), η οποία έχει στόχο την μελέτη, κατασκευή, συντήρηση, λειτουργία και διοίκηση των δικτύων ύδρευσης της περιοχής. Η υδροδότηση της πόλης προέρχεται από το φράγμα Αποσελέμη. Ο αγωγός μεταφοράς, μήκους 7.130 μέτρων, συνδέει τον ταμιευτήρα με την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού, δυναμικότητας 110.600 m³ ημερησίως. Έπειτα μέσω του υδραγωγείου, διοχετεύεται στην πόλη η απαιτούμενη ποσότητα νερού. Το υδραγωγείο έχει μήκος περίπου 74^ον χιλιομέτρων, εξυπηρετώντας τόσο τις πόλεις του Ηρακλείου και του Αγίου Νικολάου, όσο και έξι ακόμη δήμους και δεκαεννέα οικισμούς. Στην περιοχή του Ηρακλείου το δίκτυο συνδέεται με τις δεξαμενές Δ7, Δ3Α και Δ4 της Δ.Ε.Υ.Α.Η. Η υδροδότηση της περιοχής, επηρεάζεται τόσο από τα επίπεδα κατανάλωσης, καθώς οι υψηλές καταναλώσεις οδηγούν σε χαμηλή πίεση στο δίκτυο, όσο και από το ανάγλυφο του εδάφους, αφού στα υψηλότερα σημεία παρατηρούνται καθυστερήσεις στον χρόνο παροχής[6],[26]. Τέλος, σε αυτό το υδατικό δίκτυο, υπάρχει εγκατεστημένο δίκτυο υδρομέτρων και τηλεμετρίας καθώς και σύστημα παρακολούθησης ποιότητας και ποσότητας των υδάτων.



Εικόνα 3.2 Το φράγμα Αποσελέμη [28].

3.1. Παρουσίαση και μελέτη του δικτύου στο λογισμικό WaterGems

Το υδατικό δίκτυο της παλιάς πόλης του Ηρακλείου, το οποίο σχεδιάστηκε σε λογισμικό EPANET, μελετήθηκε στο λογισμικό WaterGems. Το δίκτυο αυτό είναι βαρυτικό, με τη ροή του νερού να επιτυγχάνεται λόγω της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των σημείων παροχής και των σημείων κατανάλωσης, χωρίς την ανάγκη χρήσης αντλιών. Αποτελείται από δύο δεξαμενές, δύο ρεζερβουάρ και 5791 κόμβους, εκ των οποίων οι 3292 είναι υδρόμετρα, ενώ οι υπόλοιποι είναι απλοί κόμβοι σύνδεσης. Η απεικόνιση του δικτύου στο λογισμικό WaterGems δίνεται με την Εικόνα 3.3 παρακάτω [6].



Εικόνα 3.3 Υδατικό δίκτυο της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου στο λογισμικό WaterGems

Το ρεζερβουάρ με την ονομασία 13 τροφοδοτεί την δεξαμενή D4 μέσω του αγωγού 56 και βρίσκεται σε υψόμετρο 130 μέτρων, ενώ το ρεζερβουάρ 754 τροφοδοτεί τη δεξαμενή PTM μέσω του αγωγού 121 και βρίσκεται σε υψόμετρο 160 μέτρων. Τα χαρακτηριστικά των δύο δεξαμενών παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4:

Label	Elevation (Base) (m)	Elevation (Minimum) (m)	Elevation (Initial) (m)	Elevation (Maximum) (m)	Diameter (m)
D4	102,50	102,50	107,50	108,50	40,00
PTM	70,00	70,00	75,00	76,00	40,00

Εικόνα 3.4 Χαρακτηριστικά δεξαμενών

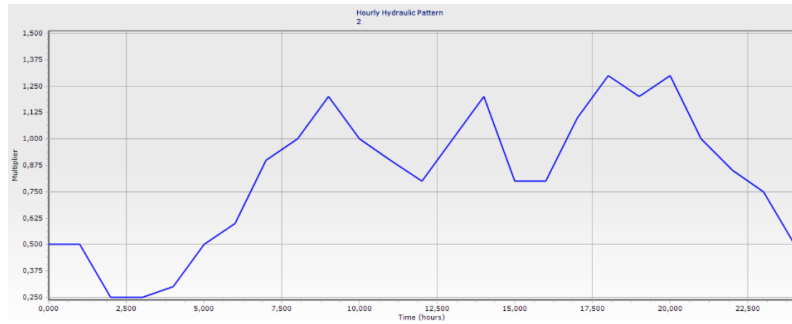
Για τη σωστή λειτουργία των δεξαμενών και των ρεζερβουάρ έχουν δημιουργηθεί τέσσερις κανόνες (controls), οι οποίοι ρυθμίζουν την λειτουργία των αγωγών που τα συνδέουν, με βάση τη στάθμη των δεξαμενών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5 για την δεξαμενή PTM ο αγωγός 121 κλείνει εφόσον η στάθμη της είναι μεγαλύτερη των 5 μέτρων ενώ, ο αγωγός θα ανοίξει για στάθμη μικρότερη του 1^{ος} μέτρου. Αντίστοιχα για την δεξαμενή D4, ο αγωγός 56 κλείνει για στάθμη μεγαλύτερη των 5 μέτρων και ανοίγει για στάθμη μικρότερη του ενός μέτρου. Οι κανόνες παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.5, όπως απεικονίζονται το WaterGems.

If	If Type	If Element ID	If Element	If Setting	If Operator	Value
If	Tank	5856	PTM	Level (m)	>	5,00
If	Tank	5856	PTM	Level (m)	<	1,00
If	Tank	5855	D4	Level (m)	>	5,00
If	Tank	5855	D4	Level (m)	<	1,00

Then	Then Element Type	Then Element ID	Then Element	Then Setting	Then Value
Then	Pipe	7172	121	Pipe Status	Closed
Then	Pipe	7172	121	Pipe Status	Open
Then	Pipe	8492	56	Pipe Status	Closed
Then	Pipe	8492	56	Pipe Status	Open

Εικόνα 3.5 Κανόνες λειτουργίας των δεξαμενών

Όπως προαναφέρθηκε, οι κόμβοι του δικτύου χωρίζονται σε υδρόμετρα και σε απλούς κόμβους σύνδεσης αγωγών. Εφαρμόζονται ωριαία patterns με σκοπό να προσομοιωθούν οι μεταβολές στη ζήτηση του νερού εντός 24ώρου. Ορίζονται τιμές για τον πολλαπλασιαστή (Multiplier) ο οποίος πολλαπλασιάζεται με την βασική ζήτηση που έχει οριστεί και ως αποτέλεσμα προκύπτει η τελική ζήτηση νερού για κάθε υδρόμετρο του δικτύου. Έχουν οριστεί δύο pattern ζήτησης, το pattern 1 που αφορά τους απλούς κόμβους του δικτύου με πολλαπλασιαστή μηδέν ώστε η ζήτηση να είναι πάντοτε μηδενική και το pattern 2 για τα υδρόμετρα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.6.



Διάγραμμα 3.1 Ωριαίο Pattern ζήτησης

Time from Start (hours)	Multiplier
1,000	0,500
2,000	0,250
3,000	0,250
4,000	0,300
5,000	0,500
6,000	0,600
7,000	0,900
8,000	1,000
9,000	1,200
10,000	1,000
11,000	0,900
12,000	0,800
13,000	1,000
14,000	1,200
15,000	0,800
16,000	0,800
17,000	1,100
18,000	1,300
19,000	1,200
20,000	1,300
21,000	1,000
22,000	0,850
23,000	0,750
24,000	0,500

Εικόνα 3.6 Πολλαπλασιαστές του Pattern 2

Η εισαγωγή των δεδομένων μέσης ημερήσιας ζήτησης έγινε από αρχείο πραγματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν τον Απρίλιο του 2024 για το δίκτυο του Ηρακλείου. Έγινε αντιστοίχιση των συχνοτήτων των υδρομέτρων με τους κωδικούς που χρησιμοποιήθηκαν ως ονομασίες στο WaterGems και στη συνέχεια αντιστοίχιση των τιμών κατανάλωσης. Οι τιμές έχουν μετατραπεί από μηνιαίες ογκομετρήσεις (L/month) για κάθε υδρόμετρο, σε ημερήσιες καταναλώσεις (m^3/day). Κατά την επεξεργασία των δεδομένων εφαρμόστηκε φίλτρο ώστε να εισαχθούν τιμές μόνο στους κόμβους/υδρόμετρα που ακολουθούν pattern 2, ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή τιμών στους απλούς κόμβους του δικτύου (pattern 1). Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως λόγω της χρήσης πραγματικών δεδομένων κατανάλωσης, σε αρκετά υδρόμετρα δεν κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της μέσης ημερήσιας ζήτησης. Συγκεκριμένα σε 1.588 υδρόμετρα δεν συλλέχθηκαν τιμές ζήτησης για τον μήνα Απρίλιο. Τέλος, η περιοχή που αφορά το δίκτυο αποτελείται από κατοικίες, πολυκατοικίες, ξενοδοχεία, τουριστικά

μαγαζιά κ.ά. άρα αναμένεται να παρουσιαστεί μεγάλο εύρος τιμών ζήτησης. Επομένως το δίκτυο είναι έτοιμο να πραγματοποιήσει την πρώτη προσομοίωση για 72 ώρες.

Για την πληρέστερη απεικόνιση των διακυμάνσεων της ζήτησης και της πίεσης στους κόμβους/υδρόμετρα καθώς και της ροής στους αγωγούς του δικτύου καθορίστηκαν οι παρακάτω κλίμακες των οποίων η επιλογή βασίστηκε σε προσέγγιση που είχε εφαρμοστεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία στο παρόν δίκτυο με χρήση ίδιου λογισμικού αλλά με διαφορετικά δεδομένα και διαφορετική προσέγγιση μελέτης[6]:

Πίνακας 3.1 Κλίμακα ζήτησης

Τιμή \leq (m ³ /day)	Χρώμα
0,0000	Black
0,2880	Pink
0,5760	Light Pink
0,8640	Magenta
1,1520	Dark Purple
Μεγαλύτερες τιμές	Red

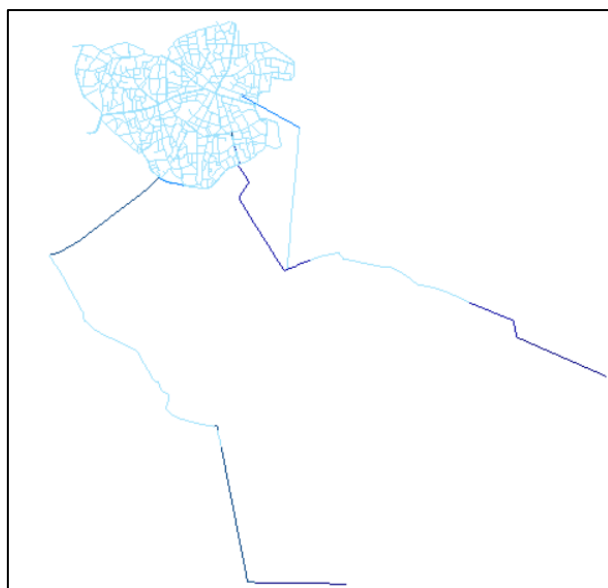
Πίνακας 3.2 Κλίμακα πίεσης

Τιμή \leq (kPa)	Χρώμα
150	Blue
300	Green
450	Yellow
600	Orange
Μεγαλύτερες τιμές	Red

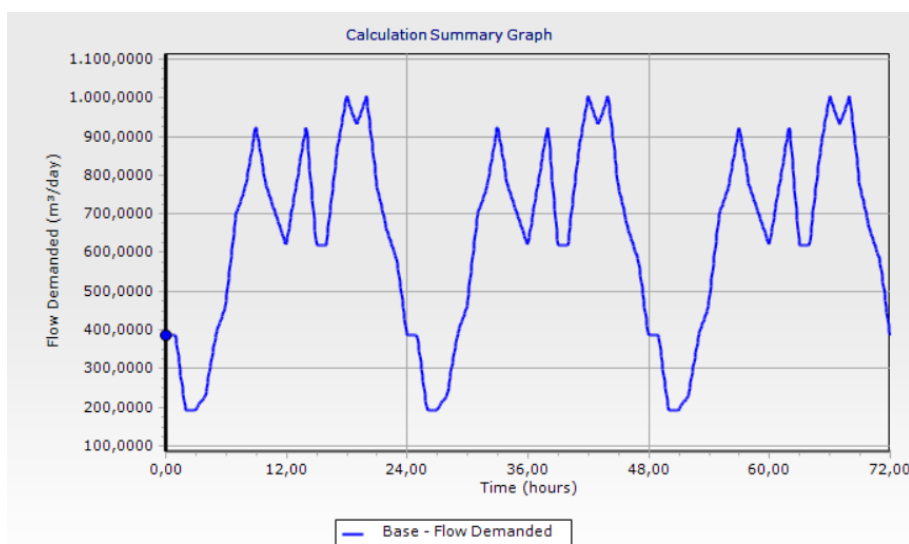
Πίνακας 3.3 Κλίμακα ροής

Τιμή \leq (m ³ /day)	Χρώμα
36,0000	Light Blue
72,0000	Light Blue
108,0000	Light Blue
144,0000	Blue
720,0000	Dark Blue
Μεγαλύτερες τιμές	Dark Blue

Η προσομοίωση ολοκληρώνεται και δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα για τη ροή του δικτύου καθώς και η τελική μορφή του δικτύου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7:

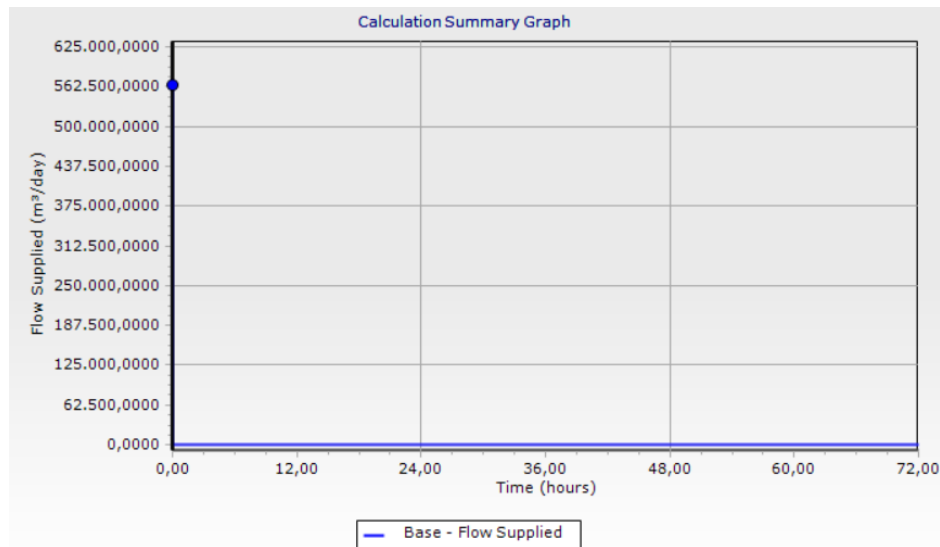


Εικόνα 3.7 Εφαρμογή της κλίμακας ροής στο δίκτυο



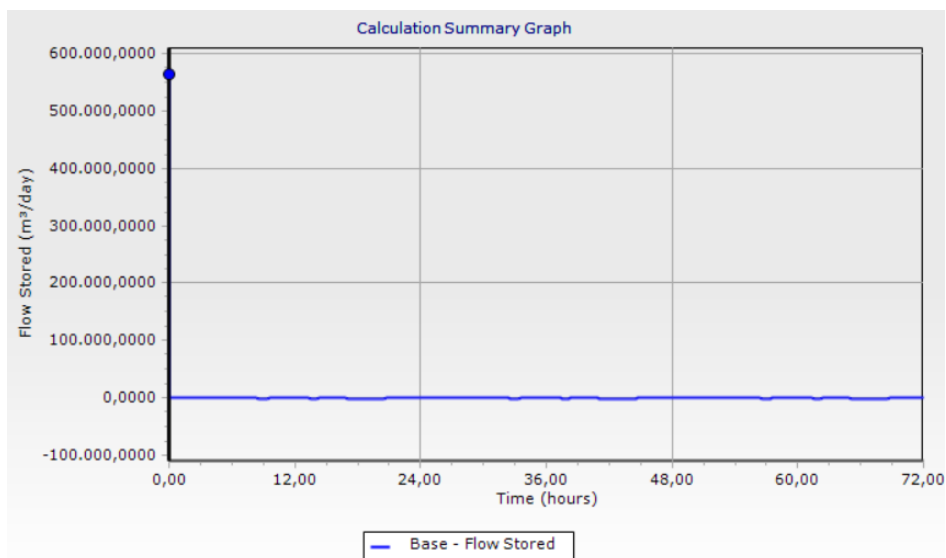
Διάγραμμα 3.2 Ζητούμενη ροή του δικτύου

Όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.2, η ζητούμενη ροή του δικτύου παρουσιάζει αυξομειώσεις λόγω του pattern 2 που έχει εφαρμοστεί στα υδρόμετρα και επαναλαμβάνεται για τρία 24ωρα (72 ώρες). Οι υψηλές καταναλώσεις εμφανίζονται στις ώρες αιχμής, πρωινές και απογευματινές, ενώ χαμηλές τιμές κατανάλωσης δίνονται για τις νυχτερινές ώρες. Οι τιμές φτάνουν έως και 1.000.000 m³/ημέρα γεγονός που συμβαδίζει με την αυξημένη χρήση νερού σε οικιακές και εμπορικές δραστηριότητες κατά τις ώρες αιχμής. Οι χαμηλότερες καταναλώσεις σημειώνονται μεταμεσονύχτιες ώρες, όπου η ροή πέφτει κάτω από 200.000 m³/ημέρα γεγονός φυσιολογικό για τις ώρες αυτές. Η υψηλότερη ζήτηση δίνει πενταπλάσια τιμή από την χαμηλότερη, κάτι που επισημαίνει την ανάγκη αντοχής του δικτύου σε έντονες ημερήσιες διακυμάνσεις.



Διάγραμμα 3.3 Παρεχόμενη ροή στο δίκτυο

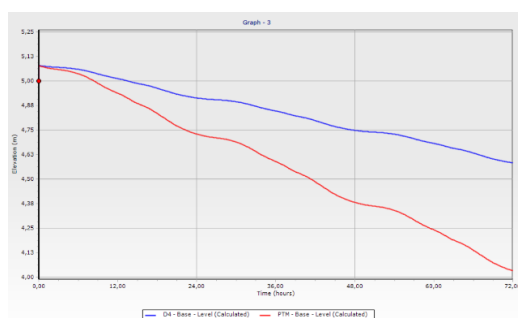
Στο Διάγραμμα 3.3 παρουσιάζεται η παρεχόμενη ροή του δικτύου. Η αρχική υψηλή τιμή $562.500 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ δίνεται από τα ρεζερβουάρ προς τις δεξαμενές οι οποίες βάσει των κανόνων που έχουν εφαρμοστεί δεν γεμίζουν ξανά μέχρι η στάθμη τους να φτάσει σε συγκεκριμένο όριο. Επομένως, συμπεραίνεται πως για τις 72 ώρες προσομοίωσης η παρεχόμενη ροή είναι μηδενική καθώς η αρχική ποσότητα που δόθηκε καλύπτει τις ανάγκες ζήτησης για το συγκεκριμένο διάστημα.



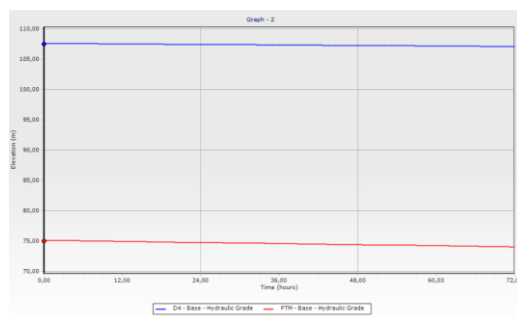
Διάγραμμα 3.4 Αποθηκευμένη ροή στο δίκτυο

Η αποθηκευμένη ροή του δικτύου, απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.4 και αφορά την αποθήκευση νερού που γίνεται στις δεξαμενές του δικτύου. Η αρχική τιμή $580.000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ δίνεται λόγω της τροφοδοσίας από τα ρεζερβουάρ και στη συνέχεια παρουσιάζονται αρνητικές τιμές καθώς οι δεξαμενές δεν δέχονται ξανά νερό. Στις αρνητικές τιμές παρατηρούνται μικρές αυξομειώσεις οι οποίες επαναλαμβάνονται για τις επόμενες 48 ώρες της προσομοίωσης.

Αποτελέσματα δεξαμενών PTM και D4



(α) Στάθμη



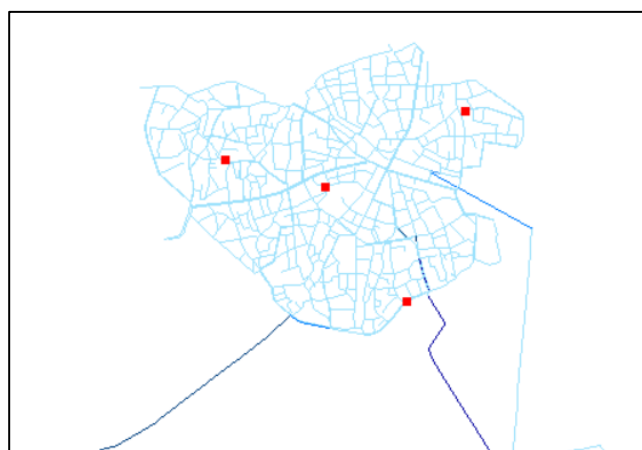
(β) Υδραυλική κλίση

Διάγραμμα 3.5 Δεξαμενές PTM (κόκκινο) & D4 (μπλε)

Όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.5(α), οι δύο δεξαμενές ξεκινούν με τη στάθμη του νερού να βρίσκεται στα 5 μέτρα και παρουσιάζεται σταδιακή πτώση της στάθμης σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η δεξαμενή PTM που εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα καμπύλης, αδειάζει πιο γρήγορα, φτάνοντας στα 4,03 μέτρα ενώ η δεξαμενή D4 με μπλε χρώμα, παρουσιάζει μικρότερη πτώση και σταθεροποιείται στα 4,58 μέτρα. Η PTM δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση, καθώς εξυπηρετεί μεγαλύτερο κομμάτι του δικτύου σε σχέση με την D4. Στο Διάγραμμα 3.5(β) απεικονίζεται η υδραυλική κλίση των δεξαμενών, οι οποίες έχουν ξανά την ίδια αντιστοιχία χρωμάτων. Η υδραυλική κλίση αντιπροσωπεύει το υδραυλικό φορτίο πίεσης που μπορεί να προσφέρει η δεξαμενή στο δίκτυο. Και οι δύο δεξαμενές παρουσιάζουν σχεδόν σταθερή υδραυλική κλίση με ελάχιστες αυξομειώσεις, γεγονός που δηλώνει σταθερή πίεση στο δίκτυο και επαρκή τροφοδοσία.

Υδρόμετρα

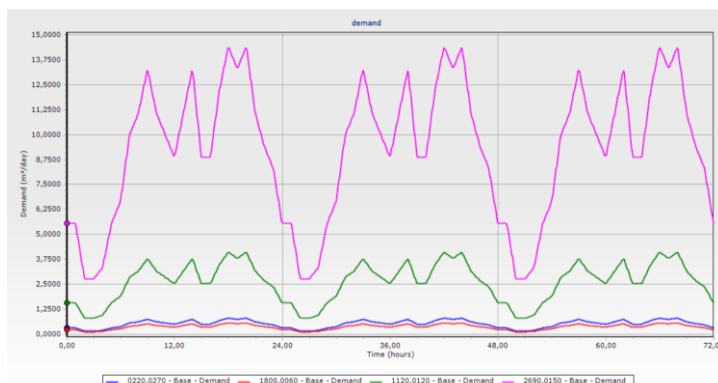
Επιλέχθηκαν τέσσερα υδρόμετρα με εμφανή διαφορά στις τιμές ζήτησης, και το κάθε ένα από αυτά να ανήκει σε διαφορετική ζώνη του δικτύου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8 Η τοποθεσία των υδρομέτρων που επιλέχθηκαν

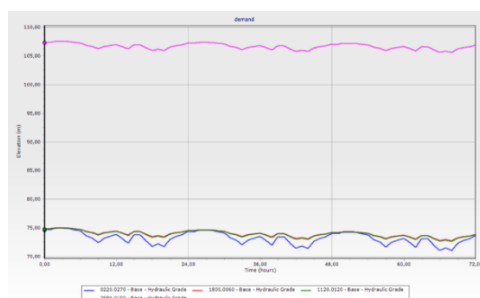
Στο Διάγραμμα 3.6 απεικονίζονται τα τέσσερα υδρόμετρα, τα οποία παρουσίασαν την υψηλότερη τιμή τους τις απογευματινές ώρες αιχμής και

συγκεκριμένα στις 6 μ.μ., με το υδρόμετρο 2690.0150 να δίνει τη μέγιστη τιμή 14,3673 m³/ημέρα το οποίο βρίσκεται στη Ζώνη 2 και τη μικρότερη τιμή ζήτησης να τη δίνει το υδρόμετρο 1800.0060 με τιμή 0,5607 m³/ημέρα και ανήκει στη Ζώνη 4. Τα υδρόμετρα 1120.0120 της Ζώνης 1 και 0220.0270 της Ζώνης 3 δίνουν ενδιάμεσες τιμές την ώρα αιχμής, 4,0998 και 0,7990 m³/ημέρα αντίστοιχα.

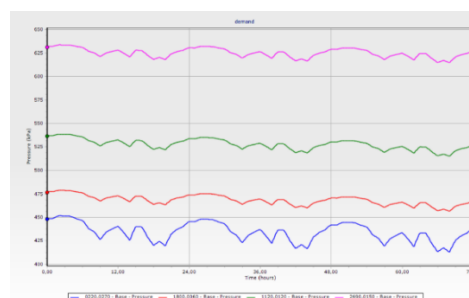


Διάγραμμα 3.6 Ζήτηση

Στη συνέχεια απεικονίζεται το Διάγραμμα 3.7 με (α) τον υδραυλικό βαθμό και (β) την πίεση των υδρομέτρων. Οι πιέσεις είναι υψηλές, 400kPa – 650kPa στα συγκεκριμένα υδρόμετρα και παρουσιάζουν διακυμάνσεις στον ημερήσιο κύκλο ζήτησης, οι οποίες είναι ήπιες καθώς δεν εμφανίζονται έντονες πτώσεις που να οδηγούν σε προβληματική υδροδότηση. Το κάθε υδρόμετρο έχει διαφορετικό επίπεδο πίεσης ανάλογο με την υψομετρική του θέση και την απόστασή του από τη δεξαμενή. Από τις υψηλές τιμές πίεσης συμπεραίνεται πως τα υδρόμετρα αυτά δεν αντιμετωπίζουν κίνδυνο ανεπαρκούς παροχής. Ωστόσο, οι τιμές ≥ 600 kPa θεωρούνται υψηλές και μπορεί να οδηγήσουν σε απώλειες. Για τις τιμές του υδραυλικού βαθμού παρατηρείται πως οι καμπύλες παραμένουν σχεδόν σταθερές, με μικρές διακυμάνσεις λόγω του ημερήσιου προφίλ ζήτησης, γεγονός που υποδηλώνει ότι το δίκτυο λειτουργεί με επαρκές υδραυλικό φορτίο, χωρίς απότομες πτώσεις ή αυξήσεις. Παρότι τα υδρόμετρα προέρχονται από διαφορετικές ζώνες, αυτά που ανήκουν στις Ζώνες 1, 3 και 4 εμφανίζουν παρόμοιες τιμές υδραυλικής κλίσης, που σημαίνει ότι λειτουργούν σε συγκρίσιμο επίπεδο πίεσης. Αντίθετα το υδρόμετρο με την υψηλότερη τιμή υδραυλικού βαθμού, ανήκει στη Ζώνη 2 και η τιμή του επηρεάζεται από την θέση του ως προς τη δεξαμενή.



(α) Υδραυλική κλίση

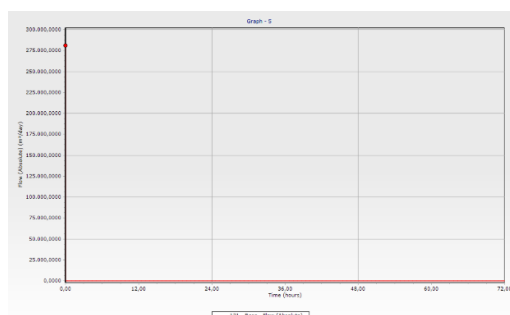


(β) Πίεση

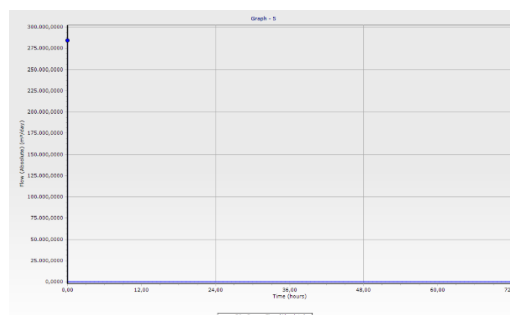
Διάγραμμα 3.7 Υδρόμετρα 2690.0150, 0220.0270, 1800.0060 & 1120.0120

Αγωγοί 121 και 56

Οι αγωγοί 121 και 56 είναι αυτοί που συνδέουν τα ρεζερβουάρ με τις δεξαμενές και όπως φαίνονται στα Διαγράμματα 3.8 (α) και (β) αντίστοιχα, ακολουθούν τους κανόνες τροφοδοσίας των δεξαμενών, ανοίγουν στην αρχή της προσομοίωσης ώστε να γεμίσουν οι δεξαμενές με νερό και μόλις επιτευχθεί αυτό κλείνουν. Την χρονική στιγμή μηδέν της προσομοίωσης η ροή είναι 280.976,7370 m³/ημέρα για τον αγωγό 121 ο οποίος καταλήγει στη δεξαμενή PTM και 284.083,1217 m³/ημέρα για τον αγωγό 56 ο οποίος φτάνει στην δεξαμενή D4. Αυτές οι ποσότητες νερού καλύπτουν το δίκτυο ως προς τη μέση ημερήσια ζήτηση των υδρομέτρων για τρία 24ωρα, επομένως οι αγωγοί δεν ανοίγουν ξανά και έτσι η ροή τους μηδενίζεται για τις υπόλοιπες ώρες της προσομοίωσης.



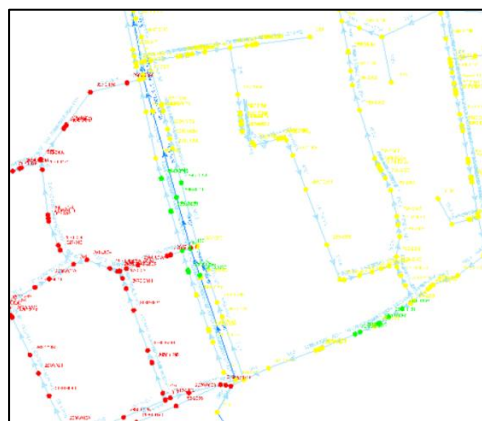
(α) Αγωγός 121



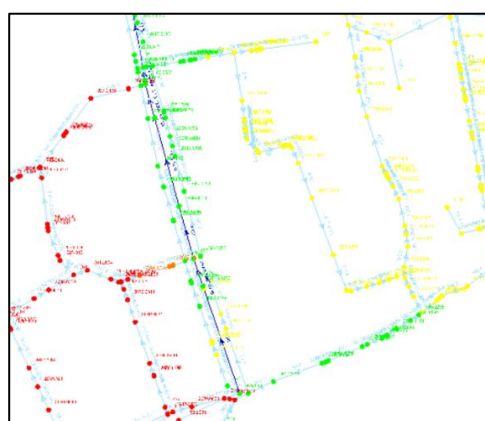
(β) Αγωγός 56

Διάγραμμα 3.8 Ροή αγωγών

Μεταβολές ζήτησης, πίεσης και ροής σε περιοχή του δικτύου



(α) 3h

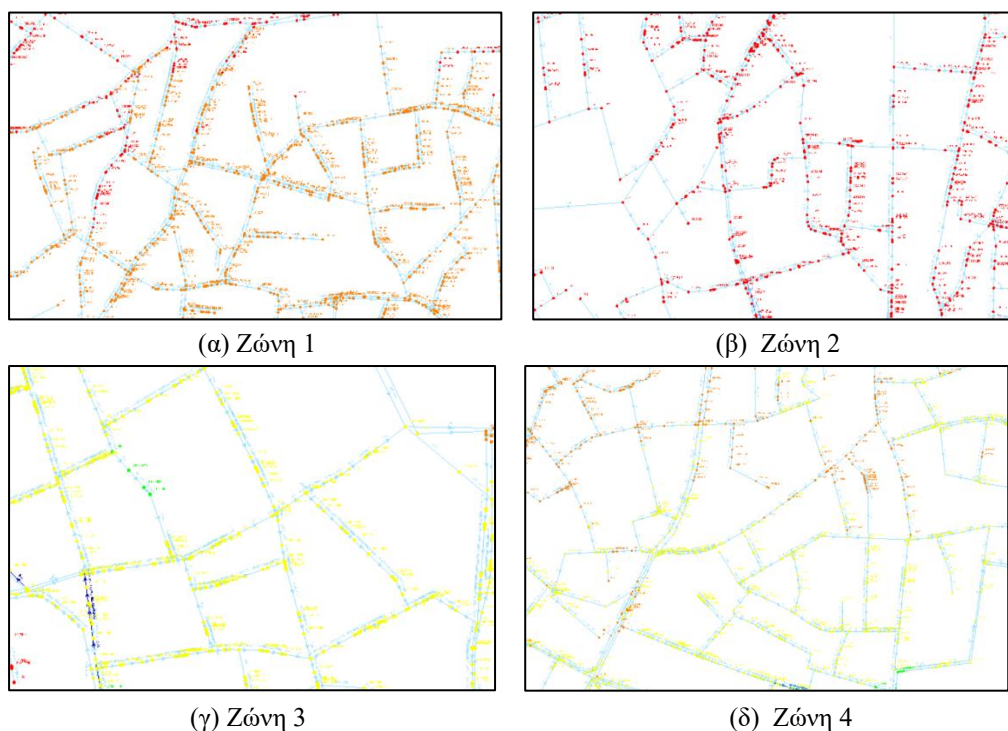


(β) 65h

Εικόνα 3.9 Μεταβολές πίεσης και ροής

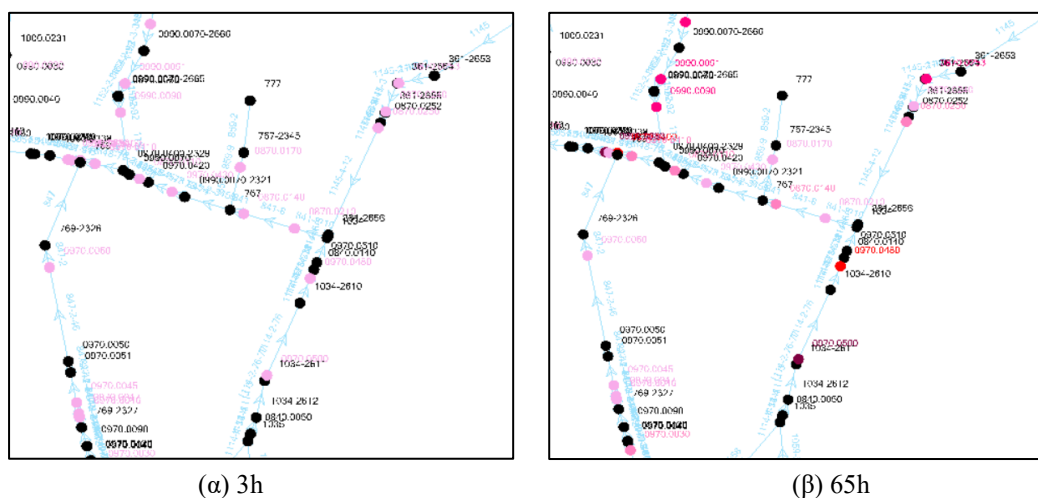
Οι μεταβολές που παρουσιάζονται μέσω της χρωματικής κλίμακας που τέθηκε παραπάνω απεικονίζονται για την 3^η και 65^η ώρα στις Εικόνες 3.9 (α) και (β) για ένα τμήμα του δικτύου. Παρόλο που οι μεταβολές δεν είναι έντονες καθώς ορισμένοι κόμβοι/υδρόμετρα διατηρούν σχεδόν αμετάβλητες τιμές πίεσης και ροής, το δίκτυο παρουσιάζει αλλαγές ανάμεσα στις δύο ώρες, με την 65^η ώρα να είναι ώρα αιχμής για τη ζήτηση που απαιτείται από το δίκτυο.

Δεδομένου ότι οι μεταβολές πίεσης και ροής στο σύνολο του δικτύου δεν είναι έντονες, παρατηρείται πως παρά τις μικρές αλλαγές, κάθε ζώνη του δικτύου για το διάστημα των 72 ωρών, παρουσιάζει σταθερότητα στην αποτύπωση των χρωματικών κλιμάκων. Στην πλειονότητα των κόμβων/υδρομέτρων κάθε ζώνης κυριαρχεί συγκεκριμένο χρώμα κλίμακας, γεγονός που αντανακλά την επικράτηση ενός σαφούς εύρους τιμών πίεσης. Αυτό υποδηλώνει ότι το δίκτυο διατηρεί ισορροπημένες συνθήκες λειτουργίας, χωρίς σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των χρονικών στιγμών που εξετάστηκαν.



Εικόνα 3.10 Μεταβολές πίεσης και ροής

Στη Ζώνη 1 επικρατεί το πορτοκαλί χρώμα με εύρος πίεσης 450 έως 600 kPa, στη Ζώνη 2 επικρατεί το κόκκινο χρώμα, που αφορά τιμές πίεσης μεγαλύτερες από 600kPa, ενώ στις Ζώνες 3 και 4 επικρατεί το κίτρινο χρώμα για τιμές πίεσης από 300 έως 450 kPa.



Εικόνα 3.11 Μεταβολές ζήτησης

Παρουσιάζονται και οι μεταβολές των υδρομέτρων ως προς τη ζήτηση του δικτύου στις Εικόνες 3.11 (α) και (β), για την 3^η και 65^η ώρα, σε διαφορετικό τμήμα του δικτύου. Οι μεταβολές στη χρωματική κλίμακα ζήτησης είναι έντονες σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου, ανεξαρτήτως της Ζώνης στην οποία ανήκουν οι κόμβοι/υδρόμετρα. Οι κόμβοι με μαύρο χρώμα, αποτελούν είτε υδρόμετρα στα οποία δεν συλλέχτηκαν τιμές κατανάλωσης, επομένως τους δόθηκε η τιμή μηδέν, είτε απλούς κόμβους σύνδεσης αγωγών με μηδενική κατανάλωση.

3.2. Εντοπισμός διαρροών με χρήση του Darwin Calibrator

Για την προσομοίωση εύρεσης διαρροών έγινε χρήση του εργαλείου Darwin Calibrator όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Χρειάστηκε η εισαγωγή τιμών υδραυλικής κλίσης (Hydraulic Grade) όλων των κόμβων του δικτύου και τιμών ροής (Discharge) των αγωγών 121 και 56, οι οποίοι συνδέουν το ρεζερβουάρ με την δεξαμενή. Χρησιμοποιήθηκαν περιορισμοί, ώστε οι αγωγοί αυτοί να παρουσιάζονται κλειστοί σε όλες της ώρες που εφαρμόστηκε η προσομοίωση, καθώς είναι ανοιχτοί μόνο την ώρα μηδέν όπως προαναφέρθηκε. Η επιλογή των ωρών στις οποίες εφαρμόστηκε η προσομοίωση έγινε με στόχο τη σύγκριση αποτελεσμάτων με τιμές από προσομοίωση στις ίδιες ώρες, που έγινε σε διπλωματική εργασία που έχει προηγηθεί [6]. Σκοπός ήταν να εκτιμηθεί εάν η εισαγωγή πραγματικών δεδομένων στο δίκτυο επηρεάζει τα αποτελέσματα του calibration, καθώς στη διπλωματική με την οποία έγινε σύγκριση τιμών δεν δόθηκαν πραγματικά δεδομένα ζήτησης, αλλά μία τιμή για όλα τα υδρόμετρα του δικτύου. Η προσομοίωση γίνεται για τις πολύ πρωινές ώρες, ώστε να πραγματοποιείται η ελάχιστη δυνατή κατανάλωση στα υδρόμετρα.

Ο γενετικός αλγόριθμος του Darwin Calibrator, δίνει αποτελέσματα για το μέγεθος και τη θέση όπου υπάρχει πιθανή απώλεια νερού, με ρύθμιση του συντελεστή εκπομπής (emitter coefficient) στους κόμβους του δικτύου. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζει, συμπεριλαμβάνεται το Fitness του αλγορίθμου, δηλαδή πόσο καλή ήταν η σύγκλιση του μοντέλου, το πλήθος και η θέση των κόμβων που εμφανίζουν πιθανή διαρροή, καθώς και το μέγεθος του συντελεστή εκπομπής για κάθε έναν από αυτούς. Για την κατανοητή παρουσίαση των θέσεων των πιθανών διαρροών δημιουργήθηκε χρωματική κλίμακα για τον συντελεστή εκπομπής.

Πίνακας 3.4 Κλίμακα συντελεστή εκπομπής

Τιμή $\leq (L/min/(mH_2O)^n)$	Χρώμα
0,000	Μαύρο
0,100	Λευκό
0,200	Κίτρινο
0,300	Κίτρινο-Πράσινο
0,400	Πράσινο
0,500	Κόκκινο

- **Στις 3 ώρες**

Η προσομοίωση στις 3 π.μ. έδωσε εξαιρετικά μικρό Fitness 0,037 βεβαιώνοντας την καλή σύγκλιση του μοντέλου και 55 κόμβους με πιθανότητα διαρροής, από τους οποίους οι 6 παρουσίασαν τη μέγιστη πιθανότητα με τιμή του συντελεστή εκπομπής 0,500 (L/min/(m*H₂O)ⁿ). Τα αποτελέσματα που έδωσε η προσομοίωση χωρίς πραγματικά δεδομένα ζήτησης ήταν για 59 κόμβους με Fitness 11,705. Από τη σύγκριση των δύο εκτιμάται πως η χρήση πραγματικών δεδομένων επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς υπήρξε μόνο ένας κοινός κόμβος με πιθανότητα διαρροής.

- **Στις 28 ώρες**

Η προσομοίωση έδωσε και πάλι αρκετά μικρό Fitness 0,547 και 78 κόμβους στις 28 ώρες, με την ώρα της προσομοίωσης να είναι στις 4 π.μ.. Τα αποτελέσματα για την βαθμονόμηση χωρίς πραγματικά δεδομένα έδωσαν Fitness 0,875 και 60 κόμβους με πιθανότητα διαρροής. Ωστόσο βρέθηκαν 33 κοινοί κόμβοι με πιθανότητα διαρροής ανάμεσα στις δύο προσομοιώσεις.

- **Στις 53 ώρες**

Η προσομοίωση έδωσε το μεγαλύτερο μέχρι στιγμής Fitness 3,973 και 81 κόμβους για τις 5 π.μ. ενώ η βαθμονόμηση χωρίς πραγματικά δεδομένα έδωσε Fitness 2,805 και 76 κόμβους με πιθανότητα διαρροής. Βρέθηκαν 40 κοινοί κόμβοι μεταξύ των δύο.

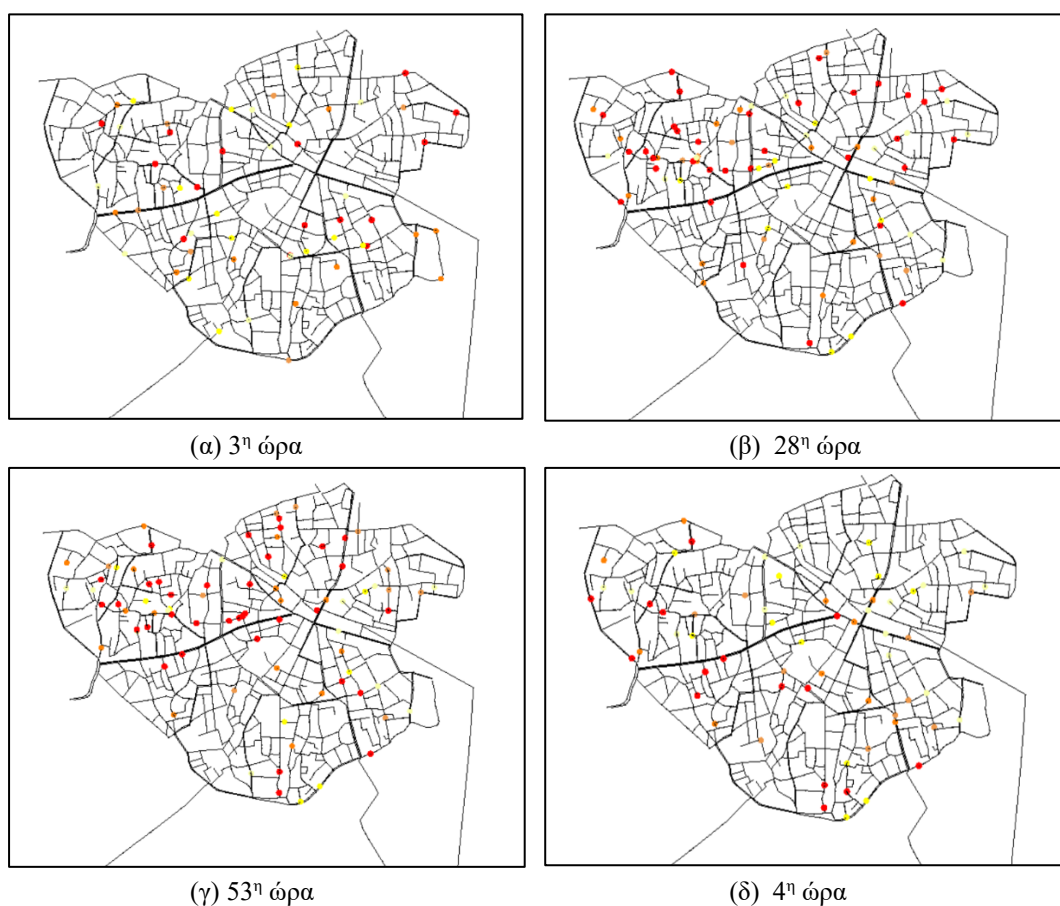
Το Darwin Calibrator επηρεάζεται σημαντικά από τα δεδομένα εισόδου. Το Fitness μπορεί να μειωθεί σημαντικά και να δίνει καλύτερη προσαρμογή στα αποτελέσματα του μοντέλου, ωστόσο αυτό δεν επιτυγχάνεται για όλες τις χρονικές στιγμές. Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων δείχνουν πως η αξιοπιστία της προσομοίωσης εξαρτάται από την ποιότητα και την πληρότητα των δεδομένων, καθώς η προσθήκη πραγματικών τιμών ζήτησης είχε το μειονέκτημα αρκετά υδρόμετρα να λάβουν μηδενική τιμή ζήτησης καθώς δεν ήταν επιτυχής η συλλογή δεδομένων από αυτά. Η συμφωνία στους κόμβους με πιθανότητα διαρροής βελτιώνεται με το χρόνο, γεγονός που δείχνει πως το μοντέλο τείνει σε πιο σταθερή εικόνα. Αυτό παρουσιάζεται καλύτερα με τη σύγκριση της 28^{ης} ώρας και της 4^{ης} ώρας.

- **Στις 4 ώρες**

Για τις 4 π.μ. την 4^η ώρα προσομοίωσης τα αποτελέσματα διαφέρουν από την 28^η ώρα. Δίνεται Fitness 0,961 και 63 κόμβοι με πιθανότητα διαρροής. Παρατηρείται λοιπόν πως για τα ίδια πραγματικά δεδομένα ζήτησης και την ίδια ώρα (4 π.μ.) τα αποτελέσματα διαφέρουν.

Αυτό συμβαίνει διότι κάθε ώρα της προσομοίωσης δεν είναι ανεξάρτητη. Αντιθέτως, εξαρτάται από το τι έχει συμβεί μέχρι εκείνη την χρονική στιγμή (προηγούμενες τιμές κατανάλωσης, στάθμες δεξαμενών, πιέσεις και ροές). Επομένως η 4^η ώρα προκύπτει μετά από λίγες ώρες λειτουργίας του μοντέλου με το σύστημα να

μην έχει προλάβει να φτάσει σε σταθερή κατάσταση (steady state). Την 28^η ώρα το δίκτυο έχει δουλέψει για 27 ώρες, οπότε η υδραυλική συμπεριφορά του έχει επηρεαστεί από τη συνεχή λειτουργία του και τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Η βαθμονόμηση που εφαρμόζεται λοιπόν, δεν είναι στατική αλλά εξαρτάται από το χρονικό πλαίσιο μέσα στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα. Τα αποτελέσματα δεν είναι απόλυτα σταθερά αλλά εξαρτώνται από τη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου και έτσι συμπεραίνεται πως για την ύπαρξη πιο αξιόπιστης εικόνας λειτουργίας του μοντέλου, είναι αναγκαία η χρήση δεδομένων σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και όχι απλά σε μεμονωμένες ώρες. Επομένως, η χρήση πραγματικών δεδομένων για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι απαραίτητη για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, ωστόσο το Darwin Calibrator παρουσιάζει ευαισθησία στην ποιότητα των δεδομένων και στις χρονικές στιγμές εφαρμογής των προσομοιώσεων. Στις Εικόνες 3.12 (α), (β), (γ) και (δ) παρουσιάζονται οι θέσεις των πιθανών διαρροών στο δίκτυο για τις αντίστοιχες ώρες που εφαρμόστηκε η προσομοίωση με πραγματικά δεδομένα ζήτησης.



Εικόνα 3.12 Πιθανές θέσης διαρροών

3.3. Μοντελοποίηση ποιότητας νερού

Η μοντελοποίηση ποιότητας του νερού σε δίκτυα ύδρευσης αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση του παρεχόμενου νερού. Στον παρόν δίκτυο εφαρμόστηκαν δύο σενάρια, ένα για την ανάλυση της συμπεριφοράς του υπολειμματικού χλωρίου έπειτα από διαδικασία χλωρίωσης στο δίκτυο και ένα για την αξιολόγηση της ηλικίας του νερού, ως δείκτης του χρόνου παραμονής του στο δίκτυο, στοιχείο που επηρεάζει άμεσα και την αποτελεσματικότητα της χλωρίωσης αλλά και την ποιότητα του παρεχόμενου νερού στους καταναλωτές.

Χλωρίωση

Η χλωρίωση του νερού πραγματοποιείται με δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη Δ.Ε.Υ.Α.Η. Η δεξαμενή D4 δέχεται νερό το οποίο υφίσταται χλωρίωση με προσθήκη διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου (NaOCl 12%) σε παροχή 60 mL/min, για μέση παροχή νερού της τάξης των 650 m³/h. Η δεξαμενή PTM υποδέχεται νερό από πολλαπλές πηγές, όπως την Τύλισο με προσθήκη NaOCl , την Ε.Ε.Ν. Αποσελέμη, όπου εφαρμόζεται χλωρίωση με αέριο χλώριο και NaOCl , με εκτιμώμενη συγκέντρωση ελεύθερου υπολειμματικού χλωρίου περίπου 0,4 mg/L. Τέλος από τον αγωγό Μαλίων, με παροχή 350 m³/h και προσθήκη 35 mL/min NaOCl .

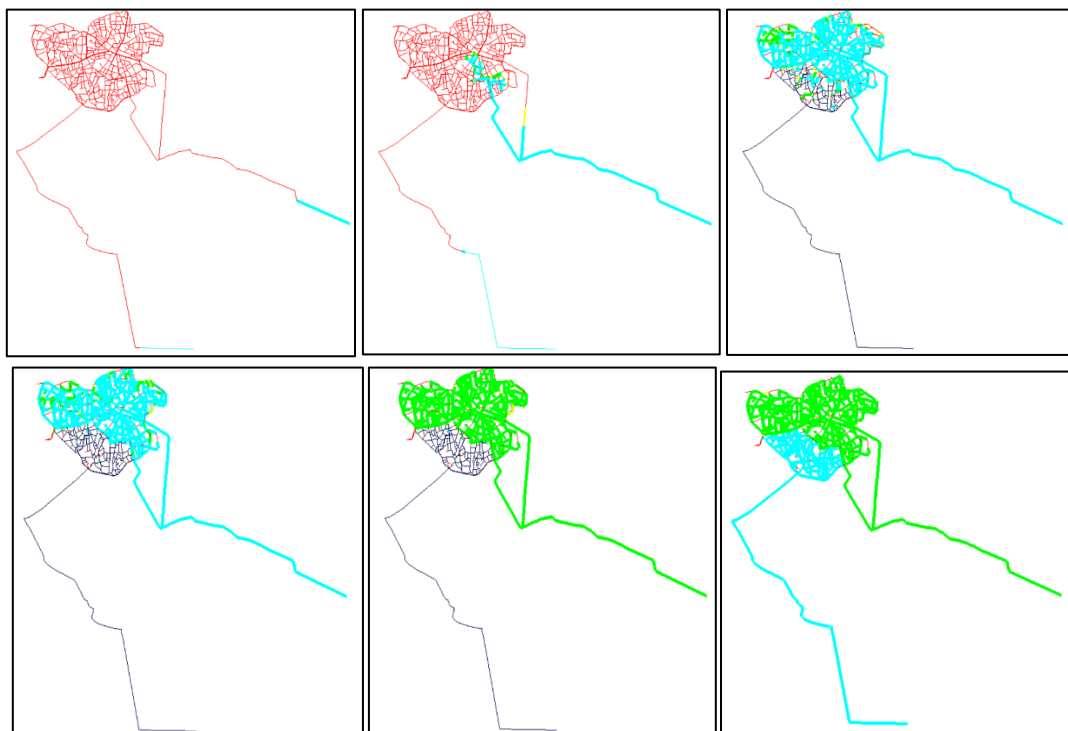
Για την προσομοίωση της χλωρίωσης του δικτύου τέθηκε μία σταθερή τιμή 0,72 m³/ημέρα για τα υδρόμετρα με τιμή μηδέν ώστε να έχουμε πιο γρήγορη μεταφορά του νερού μέσα στο δίκτυο. Δημιουργήθηκε νέο σενάριο δικτύου με ονομασία Chlorine και τέθηκε Calculation Type Constituent ενώ μέχρι στιγμής το δίκτυο έκανε προσομοίωση με Hydraulics Only. Για την δεξαμενή PTM και το ρεζερβουάρ της, δόθηκε initial concentration 0,4mg/L ενώ για την δεξαμενή D4 και το ρεζερβουάρ της, δόθηκε τιμή 0,65 mg/L. Επίσης σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση μεταφοράς χλωρίου είχε και το μοντέλο των δεξαμενών 2-Compartment Mix, μοντέλο με μία ζώνη που κάνει καλή ανάμειξη και μία ζώνη που λειτουργεί με την λογική First In First Out. Η επιλογή αυτή έγινε για να παρουσιαστεί μία συμβιβαστική προσέγγιση ως προς τη λειτουργία των δεξαμενών. Τέλος, επηρέασε σημαντικά και το Water Quality Time Step, καθώς βοηθά στην γρήγορη μετακίνηση του χλωρίου μέσα στο δίκτυο. Η κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

Πίνακας 3.5 Κλίμακα συγκέντρωσης χλωρίου

Τιμή ≤ (mg/L)	Χρώμα
0,09	
0,10	
0,20	
0,30	
0,40	
0,60	

Η κλίμακα δημιουργήθηκε έτσι, ώστε να παρουσιάζεται η επικινδυνότητα της χαμηλής συγκέντρωσης χλωρίου στο δίκτυο, με ιδανικές τιμές να είναι οι ενδιάμεσες. Οι υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης στα 0,6 mg/L δεν αποτελούν επικίνδυνη συγκέντρωση αλλά επηρεάζουν αρκετά την γεύση και την οσμή του νερού.

Στις παρακάτω Εικόνες 3.13 παρουσιάζεται η μεταφορά του χλωρίου μέσα στο δίκτυο:



Εικόνα 3.13 Μεταφορά Χλωρίου για τις ώρες 0, 8, 20, 34, 35, 59-72 (από αριστερά προς δεξιά)

Η προσομοίωση της χλωρίωσης έγινε με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και τις παραμέτρους που καθορίστηκαν για το δίκτυο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το αποτέλεσμα δεν είναι απολύτως ιδανικό καθώς το χλώριο χρειάζεται 7 ώρες να φτάσει στα μέσα του δικτύου, ωστόσο σε αυτό επηρεάζουν οι τιμές ζήτησης, η παροχή νερού, η ταχύτητα ροής του ακόμη και ο σχεδιασμός του δικτύου στο λογισμικό με χρήση GIS. Ταυτόχρονα, η κατάσταση των αγωγών επηρεάζει σημαντικά τις απώλειες χλωρίου μέσα στο δίκτυο και παρά την προσπάθεια εισαγωγής ρεαλιστικών τιμών, ενδέχεται να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις από τα πραγματικά αποτελέσματα.

Ηλικία νερού (Water Age)

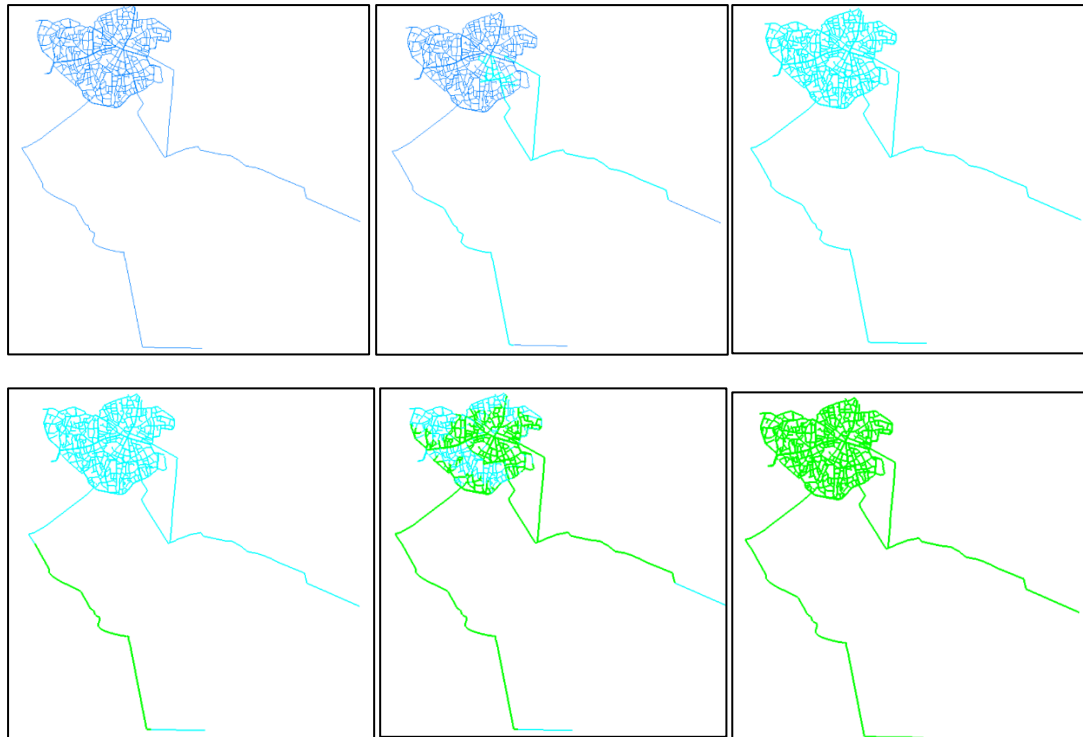
Η ηλικία του νερού στο δίκτυο ύδρευσης υπολογίζεται με βάση το χρόνο που το νερό παραμένει στο σύστημα από τη στιγμή που εισέρχεται μέχρι τη στιγμή που φτάνει στους καταναλωτές. Δημιουργήθηκε νέο σενάριο δικτύου με ονομασία Age και τέθηκε Calculation Type Age για την προσομοίωση προσδιορισμού της ηλικίας νερού. Στο παρόν δίκτυο για δεδομένα μέσης ημερήσιας ζήτησης Απριλίου 2024, οι δεξαμενές δεν γέμισαν ξανά για τις 72 ώρες προσομοίωσης, επομένως το νερό παρέμεινε για αρκετό χρονικό διάστημα μέσα στο δίκτυο χωρίς να ανανεωθεί, με αποτέλεσμα η

ηλικία νερού να αυξηθεί σημαντικά υποβαθμίζοντας την ποιότητά του, καθώς μειώνεται το χλώριο και αυξάνεται η πιθανότητα ανάπτυξης μικροοργανισμών. Η ηλικία νερού έχει άμεση σχέση με την ζήτηση και την κατανάλωση, καθώς υψηλότερη ζήτηση οδηγεί σε συχνότερη ανανέωση των δεξαμενών και έτσι μικρότερη παραμονή του νερού στο δίκτυο. Καταδεικνύεται λοιπόν, άμεση ανάγκη η συχνότερη ανανέωση και καλύτερη διαχείριση των δεξαμενών, ώστε να μειωθεί η ηλικία νερού και να εξασφαλιστεί η ποιότητά του. Δημιουργήθηκε κλίμακα από το WaterGems για την ηλικία νερού με βάση τις ώρες παραμονής του στο δίκτυο και τη διάρκεια της προσομοίωσης:

Πίνακας 3.6 Κλίμακα ηλικίας νερού

Τιμή ≤ hours	Χρώμα
14,4	Blue
28,8	Cyan
44,0	Green
65,0	Purple
72,0	Red

Στις παρακάτω Εικόνες 3.14, παρουσιάζεται η ηλικία νερού στο δίκτυο, με τη διαρκή εξέλιξή της κατά τη διάρκεια των 72 ωρών προσομοίωσης.





Εικόνα 3.14 Η ηλικία νερού στο δίκτυο για τις ώρες 0, 14, 15, 17, 24, 29, 33, 44, 45, 54, 66-72 (από αριστερά προς δεξιά)

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη μέσω του λογισμικού WaterGems στο υδατικό δίκτυο της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου. Στόχος ήταν να προσδιοριστεί εάν το δίκτυο αυτό είναι «έξυπνο», εάν έχει τις απαραίτητες και σύγχρονες εγκαταστάσεις ώστε να προσφέρεται η δυνατότητα πρόληψης απωλειών υδάτινων πόρων. Για την κατανόηση της έννοιας των «έξυπνων» δικτύων, έγινε αρχικά αναφορά στο δίκτυο των πραγμάτων IoT (Internet of Things). Ένα δίκτυο IoT, είναι αυτό που μπορεί μέσω ενός συστήματος διασυνδεδεμένων συσκευών και αισθητήρων, να ενημερώνει τους χρήστες σε πραγματικό χρόνο με σκοπό την αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής και ανάλυσης δεδομένων. Αναλύοντας τις εφαρμογές IoT σε υδατικά δίκτυα, παρουσιάζονται οι απαραίτητες προσθήκες που χρειάζεται να γίνουν σε ένα δίκτυο ώστε να θεωρηθεί «έξυπνο». «Έξυπνα» υδρόμετρα, αισθητήρες πίεσης και αναλυτές χλωρίου είναι κάποιες από τις δυνατότητες που προσφέρουν τα συστήματα IoT για τη βέλτιστη λειτουργία των δικτύων ύδρευσης.

Για την κατανόηση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, παρουσιάστηκαν οι σημαντικότερες λειτουργίες του προγράμματος WaterGems και στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν πειραματικά δίκτυα ύδρευσης, στα οποία και εφαρμόστηκαν ενδεικτικά κάποιες από αυτές. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν αφενός η εξοικείωση με τις λειτουργίες και τις ρυθμίσεις που προσφέρει το λογισμικό και αφετέρου η κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος καθώς μεταβάλλονται τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του. Η προσομοίωση στα πειραματικά δίκτυα, με εισαγωγή πραγματικών τιμών ζήτησης, έδειξε ότι το λογισμικό αποδίδει λογικά και ρεαλιστικά αποτελέσματα γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του και το εύρος των δυνατοτήτων του ως εργαλείο μελέτης και σχεδιασμού δικτύων ύδρευσης. Η εφαρμογή προσομοίωσης διαρροών εμφάνισε σταθερότητα, με τις ποσοτικές διαφοροποιήσεις να ερμηνεύονται στο πλαίσιο των αναμενόμενων αβεβαιοτήτων.

Στη συνέχεια, έγινε μελέτη στο δίκτυο της παλαιάς πόλης του Ηρακλείου. Από την αρχή της μελέτης παρατηρείται πως το δίκτυο, όντας βαρυτικό, είναι ενεργειακά αυτόνομο, καθώς δεν επιβαρύνεται από ανάγκες τροφοδότησης αντλιών. Με χρήση πραγματικών δεδομένων ζήτησης παρατηρήθηκε πως η υδραυλική συμπεριφορά του δικτύου αποτυπώνεται ρεαλιστικά στο λογισμικό. Εφαρμόστηκαν ξανά προσομοιώσεις εύρεσης διαρροών, όπου επιτεύχθηκε καλή σύγκλιση του μοντέλου, με ικανοποιητικές τιμές του δείκτη Fitness, γεγονός που επιβεβαιώνει την ικανότητα του λογισμικού να προσαρμόζεται στα πραγματικά δεδομένα και να εντοπίζει κόμβους με αυξημένη πιθανότητα διαρροής. Ωστόσο, οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν σε ορισμένα από τα αποτελέσματα δείχνουν πως η αξιοπιστία της προσομοίωσης εξαρτάται από την ποιότητα και την πληρότητα των δεδομένων, καθώς η προσθήκη πραγματικών τιμών ζήτησης είχε το μειονέκτημα αρκετά υδρόμετρα να λάβουν μηδενική τιμή, διότι δεν ήταν επιτυχής η συλλογή δεδομένων από αυτά. Ακόμη, εκτιμήθηκε πως τα αποτελέσματα δεν είναι απολύτως σταθερά, αλλά εξαρτώνται από τη δυναμική

συμπεριφορά του δικτύου, επομένως, κρίνεται αναγκαία η χρήση δεδομένων σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και όχι απλά σε μεμονωμένες ώρες, για καλύτερη απόδοση του μοντέλου. Η ανάλυση της ποιότητας του νερού ανέδειξε πως εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των παραμέτρων διάβρωσης και κατ' επέκταση από τη συνολική κατάσταση του δικτύου αγωγών καθώς και τις τιμές ζήτησης και κατανάλωσης νερού. Ωστόσο, το δίκτυο διατηρεί σταθερά επίπεδα χλωρίου εντός των αποδεκτών ορίων. Η ηλικία νερού αυξήθηκε σημαντικά στο δίκτυο, όμως, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή τιμών μέσης ημερήσιας ζήτησης που συλλέχθηκαν για ένα μήνα. Επομένως, σε μία προσομοίωση που τα υδρόμετρα θα στέλνουν συνεχώς δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για μεγάλο χρονικό διάστημα, τα αποτελέσματα θα είναι απολύτως ρεαλιστικά, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη μελέτη των υδατικών δικτύων με σύγχρονες τεχνολογίες που επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (SCADA).

Το WaterGems αποδείχθηκε ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο, για την κατανόηση και την ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου ύδρευσης, με τις όποιες ασυνέπειες να αποδίδονται κυρίως στην έλλειψη επαρκών πραγματικών δεδομένων και του χρόνου εφαρμογής των προσομοιώσεων, αναδεικνύοντας τη σημασία της συνεχούς και αξιόπιστης συλλογής μετρήσεων για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η ολοκληρωμένη μελέτη των υδραυλικών χαρακτηριστικών, των διαρροών και της ποιότητας του νερού σε ένα βαρυντικό δίκτυο όπως αυτό, αποτελεί βασικό βήμα για τη μετάβαση σε «έξυπνα» και ενεργειακά αυτόνομα υδατικά δίκτυα, που μπορούν με σύγχρονο εξοπλισμό και χρήση κατάλληλου λογισμικού να εξασφαλίσουν την προοπτική μιας αειφόρου διαχείρισης που διασφαλίζει την αποδοτική χρήση υδάτινων πόρων. Καθίσταται λοιπόν, αναγκαία η συνέχιση μελέτης στο παρόν δίκτυο, με πιο ολοκληρωμένα δεδομένα, ώστε να επιτευχθεί πιο ακριβείς προσομοίωση και να ενισχυθεί η πορεία προς πραγματικά έξυπνα και αειφόρα υδατικά δίκτυα που θα περιορίζουν στο μέγιστο δυνατό την απώλεια υδάτινων πόρων.

Βιβλιογραφία

- [1] “Τι είναι το Διαδίκτυο των Πραγμάτων; | IoT Επεξήγηση | SAP.” Accessed: Jul. 07, 2025. Available: <https://www.sap.com/greece/products/technology-platform/what-is-iot.html>
- [2] “Αισθητήρες IoT: Όλα όσα πρέπει να γνωρίζετε.” Accessed: Jul. 07, 2025. Available: <https://halodetect.com/el/blog/iot-sensors/>
- [3] “Smart Water Management with IoT: Benefits & Solutions.” Accessed: Jul. 07, 2025. Available: <https://webbylab.com/blog/iot-in-water-management/>
- [4] “Smart Water Management with IoT: Benefits & Solutions.” Accessed: Jul. 08, 2025. Available: <https://webbylab.com/blog/iot-in-water-management/>
- [5] O. Watergems, “PRODUCT DATA SHEET OpenFlows TM WaterGEMS ® Water Distribution Modeling and Management,” 2023.
- [6] Μ. Α. Γεωργία, “Έντοπισμός διαρροών και προτάσεις μείωσης του Μη Ανταποδοτικού Νερού στο δίκτυο ύδρευσης της Παλιάς Πόλης του Ηρακλείου.”
- [7] “What are HMI and SCADA systems and how are they used in industrial automation? | Vakoms.” Accessed: Jul. 22, 2025. Available: <https://vakoms.com/blog/what-are-hmi-and-scada-systems-and-how-are-they-used-in-industrial-automation/>
- [8] “SCADA Signals Setup.” Accessed: Jul. 22, 2025. Available: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-2689C11A7A74449EBE515FBF913F22FC.html>
- [9] “SCADAConnect Simulator.” Accessed: Jul. 22, 2025. Available: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-E8008FFA-6E0C-4A98-AAF6-C6CC742D5A71.html>
- [10] “OpenFlows | Water Infrastructure Forum - what is EPS mode in WaterGems - Communities.” Accessed: Jul. 22, 2025. Available: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=community_question&sys_id=c2db173b1b514210f3fc5287624bcba1
- [11] “Darwin Designer.” Accessed: Jul. 23, 2025. Available: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20WaterGEMS%20SS6-v1/en/9049.html>
- [12] “Darwin Designer Methodology.” Accessed: Jul. 23, 2025. Available: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20WaterGEMS%20SS6-v1/en/GUID-74EE25A2-ED60-486C-BD3F-29A9000AD8CE.html>

- [13] “Model Level 3: Cost-Benefit Trade-off Optimization”.
- [14] “Model Level 1: Least Cost Optimization.” Accessed: Jul. 23, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20WaterGEMS%20SS6-v1/en/GUID-7449F5C4-EA82-46F1-828E-E8FC920B0626.html>
- [15] “Model Level 2: Maximum Benefit Optimization.” Accessed: Jul. 23, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20WaterGEMS%20SS6-v1/en/GUID-D68B786F-4D0C-45AE-94DA-1353042C0A9E.html>
- [16] “Optimizing Pump Schedules Using Darwin Scheduler.” Accessed: Jul. 23, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20WaterGEMS%20SS6-v1/en/GUID-464D8116-1939-4EBE-8B9C-444D953CBE91.html>
- [17] “Darwin Scheduler.” Accessed: Jul. 23, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20WaterGEMS%20SS6-v1/en/9806.html>
- [18] “Using ModelBuilder to Transfer Existing Data”.
- [19] “Pipe Renewal Planner.” Accessed: Jul. 24, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/75000.html>
- [20] “Water Quality Analysis.” Accessed: Jul. 25, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-BA828BDA-8ED0-466F-81B3-F6C08413C3DD.html>
- [21] “Age Analysis.” Accessed: Jul. 25, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-9457F005-9536-48FF-BCEE-97754751FE05.html>
- [22] “Constituent Analysis.” Accessed: Jul. 25, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-16F2C62F-7201-407C-86F2-4932DE9EF3E2.html>
- [23] “Trace Analysis.” Accessed: Jul. 25, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/31021.html>
- [24] “Scenario Energy Cost Manager.” Accessed: Jul. 25, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20SewerCAD%20SS5-v1/en/9013.html>
- [25] “Energy Cost Results.” Accessed: Jul. 25, 2025. Available:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20SewerCAD%20SS5-v1/en/GUID-F2E0FECF-6C70-4E90-970F-DC5065AFB11A.html>

- [26] “Χάρτες | Χάρτες | Ο Τόπος μας | Δήμος Ηρακλείου.” Accessed: Sep. 18, 2025. Available: <https://www.heraklion.gr/ourplace/maps/map-of-heraklion.html>
- [27] “Χάρτης ύδρευσης Ηρακλείου - ΔΕΥΑΗ.” Accessed: Sep. 18, 2025. Available: <https://www.deyah.gr/xartis-udreusis-hrakleiou/>
- [28] “Φράγμα Αποσελέμη - Έργα Ενίσχυσης Ταμιευτήρα - Intrakat.” Accessed: Sep. 18, 2025. Available: <https://www.intrakat.gr/water-supply-of-heraklion-and-agios-nikolaos-from-aposelemis-dam-reinforcement-works-of-aposelemi-dam-reservoir-from-lassithi-plateau/>