



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Βελτιστοποίηση χωροθέτησης αισθητήρων ποιότητας σε δίκτυα ύδρευσης

Ειρήνη Αναγνωστοπούλου

Επιβλέπων: Επικ. Καθηγητής Χ. Μακρόπουλος

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

Βελτιστοποίηση χωροθέτησης αισθητήρων ποιότητας σε δίκτυα ύδρευσης

Μεταπτυχιακή εργασία

Ειρήνη Αναγνωστοπούλου

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

ΔΠΜΣ “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”

Το περιεχόμενο της ανά χείρας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Μακρόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή στον τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα μεταπτυχιακής εργασίας. Επιπλέον, τον ευχαριστώ για τις καίριες επισημάνσεις και τη στήριξη του κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Γιάννη Τσουκαλά, Υποψήφιο Διδάκτορα, για την αμέριστη βοήθειά του, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η επιτυχής ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, μου παρείχε συνεχή καθοδήγηση και πολύτιμες συμβουλές για τη διεκπεραίωση της εργασίας αλλά και για τη μελλοντική μου εξέλιξη.

Με εκτίμηση,

Ειρήνη Αναγνωστοπούλου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	v
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	viii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ix
EXTENDED ABSTRACT	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	3
2. Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης.....	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Εφαρμογές στους υδατικούς πόρους	4
2.3 Προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης	4
2.3.1 Εισαγωγή	4
2.3.2 Pareto βέλτιστο μέτωπο	7
2.3.3 Κλασικές Μέθοδοι για επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης.....	9
2.4 Γενετικοί Αλγόριθμοι	12
2.4.1 Εισαγωγή	12
2.4.2 Δομή και υπολογιστική διαδικασία Γενετικών Αλγόριθμων.....	14
2.4.3 Ο ταχύς και εκλεκτικός Γενετικός Αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (NSGA-II).....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	23
3. Δίκτυα Ύδρευσης.....	23

3.1	Θεωρητική προσέγγιση.....	23
3.1.1	Δομή δικτύων ύδρευσης.....	23
3.1.2	Είδη δικτύων ύδρευσης.....	25
3.1.3	Λειτουργικές απαιτήσεις δικτύων ύδρευσης.....	26
3.1.4	Βασικές αρχές της υδραυλικής στα δίκτυα ύδρευσης.....	27
3.1.5	Μοντέλα προσομοίωσης και επίλυσης δικτύων ύδρευσης.....	29
3.2	Λογισμικό EPANET.....	31
3.2.1	Σύντομη περιγραφή.....	31
3.2.2	Δυνατότητες του λογισμικού.....	32
3.2.3	Μέθοδος επίλυσης δικτύων ύδρευσης στο EPANET.....	33
3.2.4	Προσομοίωση δικτύου με χρήση EPANET.....	34
3.2.5	Περιβάλλον εργασίας του EPANET.....	38
3.2.6	Βήματα χρήσης.....	41
3.2.7	Εφαρμογές λογισμικού EPANET.....	45
3.3	Δίκτυα αισθητήρων.....	46
3.3.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	47
3.3.2	The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN).....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	53
4.	Μεθοδολογία βελτιστοποίησης χωροθέτησης ποιοτικών αισθητήρων.....	53
4.1	Εισαγωγή.....	53
4.2	Μεθοδολογία.....	53
4.2.1	Επιλογή αντικειμενικών συναρτήσεων.....	54
4.2.2	Δημιουργία σεναρίων έγχυσης χημικής ουσίας στο δίκτυο.....	56
4.2.3	Προσομοίωση σεναρίων στο EPANET.....	57
4.2.4	Υπολογισμός αντικειμενικών συναρτήσεων.....	58
4.2.5	Βελτιστοποίηση.....	58

4.2.6	Επαλήθευση αποτελεσμάτων	60
4.3	Σενάρια βελτιστοποίησης	61
4.4	Εφαρμογή σε δίκτυα ύδρευσης	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		65
5.	Αποτελέσματα.....	65
5.1	Βελτιστοποίηση.....	65
5.1.1	Δίκτυο 1: BWSN1	65
5.1.2	Δίκτυο 2: Ky3.....	73
5.1.3	Δίκτυο 3: Ky5.....	81
5.2	Επαλήθευση	89
5.2.1	Δίκτυο 1: BWSN1	89
5.2.2	Δίκτυο 2: Ky3.....	92
5.2.3	Δίκτυο 3: Ky5.....	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		99
6.	Συμπεράσματα - Προτάσεις	99
6.1	Συμπεράσματα	99
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....		102

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Σχέση μεταξύ του χώρου των λύσεων των μεταβλητών σχεδιασμού και του χώρου των λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων.....	6
Σχήμα 2.2: Γραφική απεικόνιση για 2 αντικειμενικές συναρτήσεις του βέλτιστου μετώπου Pareto και της σχέσης των λύσεων στον χώρο των λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων.....	8
Σχήμα 2.3: Γραφική απεικόνιση της μεθόδου των συντελεστών βαρύτητας.....	10
Σχήμα 2.4: Γραφική απεικόνιση της μεθόδου των περιορισμών.....	11
Σχήμα 2.5: Διασταύρωση γονέων σε δυαδικό πρόβλημα.....	17
Σχήμα 2.6: Μετάλλαξη στην τέταρτη θέση χρωμοσώματος δυαδικής αναπαράστασης.....	18
Σχήμα 2.7: Λογικό διάγραμμα ροής Γενετικού Αλγόριθμου.....	20
Σχήμα 2.8: Γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας του αλγορίθμου NSGA-II.....	21
Σχήμα 2.9: Η απόσταση συνωστισμού στον Γενετικό Αλγόριθμο NSGA-II.....	22
Σχήμα 3.1: Διάταξη δικτύων ύδρευσης.....	23
Σχήμα 3.2: Ακτινωτό δίκτυο.....	25
Σχήμα 3.3: Βροχωτό δίκτυο.....	26
Σχήμα 3.4: Αναπαράσταση δικτύου ύδρευσης στο EPANET.....	36
Σχήμα 3.5: Καμπύλη βαθμού απόδοσης αντλίας.....	37
Σχήμα 3.6: Χρονικό πρότυπο ζήτησης.....	37
Σχήμα 3.7: Βασικό περιβάλλον εργασίας στο EPANET.....	38
Σχήμα 3.8: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων.....	40
Σχήμα 3.9: Παράθυρο εξαγωγής αποτελεσμάτων.....	40
Σχήμα 3.10: Source Quality Editor.....	43
Σχήμα 4.1: Παράδειγμα μητρώου έγχυσης χημικής ουσίας.....	56
Σχήμα 4.2: Διάταξη Δικτύου 1 (BWSN1).....	62
Σχήμα 4.3: Διάταξη Δικτύου 2 (αριστερά) και Δικτύου 3 (δεξιά).....	63

Σχήμα 5.1: Μέτωπα Pareto για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 1 - Δίκτυο 1).	65
Σχήμα 5.2: Απεικόνιση θέσεων αισθητήρων σύμφωνα με επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto (Δίκτυο 1).	66
Σχήμα 5.3: Βέλτιστες λύσεις για $N = 10$ (Σενάριο 2 - Δίκτυο 1).	67
Σχήμα 5.4: Απεικόνιση θέσεων αισθητήρων σύμφωνα με επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto (Δίκτυο 1).	68
Σχήμα 5.5: Βέλτιστες λύσεις (Σενάριο 3 - Δίκτυο 1).	69
Σχήμα 5.6: Βέλτιστες λύσεις για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 4 - Δίκτυο 1).	69
Σχήμα 5.7: Διατάξεις θέσεων αισθητήρων που προτείνονται στο πλαίσιο του BWSN	72
Σχήμα 5.8: Μέτωπο Pareto ($Z_1^* - Z_4$) (Σενάριο 5 - Δίκτυο 1).	73
Σχήμα 5.9: Μέτωπα Pareto για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 1 - Δίκτυο 2).	74
Σχήμα 5.10: Βέλτιστες λύσεις για $N = 15$ (Σενάριο 2 - Δίκτυο 2).	75
Σχήμα 5.11: Απεικόνιση θέσεων αισθητήρων σύμφωνα με επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto (Δίκτυο 2).	76
Σχήμα 5.12: Βέλτιστες λύσεις ($Z_1 - Z_2 - Z_4$) (Σενάριο 3 - Δίκτυο 2).	77
Σχήμα 5.13: Βέλτιστες λύσεις για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 4 - Δίκτυο 2). ..	78
Σχήμα 5.14: Μέτωπο Pareto (Σενάριο 5 - Δίκτυο 2).	80
Σχήμα 5.15: Μέτωπα Pareto για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 1 - Δίκτυο 3). ...	81
Σχήμα 5.16: Απεικόνιση θέσεων αισθητήρων σύμφωνα με επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto (Δίκτυο 3).	82
Σχήμα 5.17: Βέλτιστες λύσεις για $N = 40$ (Σενάριο 2 - Δίκτυο 3).	83
Σχήμα 5.18: Βέλτιστες λύσεις ($Z_1 - Z_2 - Z_4$) (Σενάριο 3 - Δίκτυο 3).	84
Σχήμα 5.19: Βέλτιστες λύσεις για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 4 - Δίκτυο 3). ..	85
Σχήμα 5.20: Μέτωπο Pareto (Σενάριο 5 - Δίκτυο 3).	88
Σχήμα 5.21: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για $N = 5$ (Σενάριο 1 - Δίκτυο 1)	89

Σχήμα 5.22: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 10 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 1)	90
Σχήμα 5.23: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 20 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 1)	90
Σχήμα 5.24: Σύγκριση βέλτιστων λύσεων και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 4 - Δίκτυο 1)	91
Σχήμα 5.25: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 5 - Δίκτυο 1)	91
Σχήμα 5.26: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 5 Σενάριο 1 - Δίκτυο 2).....	92
Σχήμα 5.27: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 15 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 2)	93
Σχήμα 5.28: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 30 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 2)	93
Σχήμα 5.29: Σύγκριση βέλτιστων λύσεων και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 4 - Δίκτυο 2)	94
Σχήμα 5.30: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 5 - Δίκτυο 2)	94
Σχήμα 5.31: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 15 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 3)	95
Σχήμα 5.32: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 30 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 3)	96
Σχήμα 5.33: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 40 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 3)	96
Σχήμα 5.34: Σύγκριση βέλτιστων λύσεων και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 4 - Δίκτυο 3)	97
Σχήμα 5.35: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 5 - Δίκτυο 3)	97

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Βιολογικό πρότυπο και γενετικοί αλγόριθμοι (πηγή: Γεωργιλάκης, 2004).....	12
Πίνακας 4-1: Παράμετροι γενετικού αλγορίθμου.....	60
Πίνακας 4-2: Σενάρια βελτιστοποίησης	61
Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικοί χρόνοι προσομοίωσης.	63
Πίνακας 4-4: Σενάρια με μεταβολή του πλήθους αισθητήρων.	64
Πίνακας 5-1: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 1 και τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Σενάριο 2).	67
Πίνακας 5-2: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 1 για τις λύσεις που σημειώθηκαν (Σενάριο 1 & 4).	70
Πίνακας 5-3: Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Δίκτυο 1).	71
Πίνακας 5-4: Κοινές θέσεις παρούσας μελέτης με προτάσεις BWSN (Δίκτυο 1).	72
Πίνακας 5-5: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 2 και τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Σενάριο 2).	75
Πίνακας 5-6: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 2 για τις λύσεις που σημειώθηκαν (Σενάριο 1 & 4).	78
Πίνακας 5-7: Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Δίκτυο 2).	80
Πίνακας 5-8: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 3 και τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Σενάριο 2).	83
Πίνακας 5-9: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 3 για τις λύσεις που σημειώθηκαν (Σενάριο 1 & 4).	86
Πίνακας 5-10: Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Δίκτυο 3).	87

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι να αναπτύξει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την βέλτιστη χωροθέτηση των αισθητήρων ποιότητας σε δίκτυα ύδρευσης, προκειμένου να ανιχνευθεί η τυχαία ή σκόπιμη εισαγωγή χημικής ουσίας στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, μέσω του οποίου συνδέθηκε το λογισμικό προσομοίωσης δικτύων EPANET με τον πολυκριτηριακό γενετικό αλγόριθμο του Matlab.

Πρώτο στάδιο ήταν η επιλογή των αντικειμενικών συναρτήσεων (objective functions), που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Οι συναρτήσεις που επιλέχθηκαν είναι ο αναμενόμενος χρόνος και η πιθανότητα ανίχνευσης, ο αναμενόμενος όγκος νερού που καταναλώθηκε μέχρι την ανίχνευση, το πλήθος αισθητήρων και μία δεύτερη προσέγγιση του χρόνου ανίχνευσης.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν σενάρια έγχυσης χημικής ουσίας στο δίκτυο, τα οποία καλύπτουν κάθε πιθανό χρονικό διάστημα για την εισαγωγή της μέσα στο χρόνο προσομοίωσης (π.χ. 48 h) και κάθε κόμβο του δικτύου. Επόμενο στάδιο ήταν η υδραυλική προσομοίωση και η προσομοίωση ποιότητας νερού τριών δικτύων μέσω του EPANET για τα σενάρια που επιλέχθηκαν, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Στο επόμενο στάδιο, εφαρμόστηκε ο γενετικός αλγόριθμος του Matlab θεωρώντας τρία σενάρια για κάθε δίκτυο με διαφορετικό αριθμό αισθητήρων και προέκυψαν τα μέτωπα Pareto ή οι βέλτιστες επιφάνειες για κάθε σενάριο. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της επαλήθευσης με στόχο την εκτίμηση της απόδοσης των λύσεων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση σε άλλα τυχαία σενάρια επίθεσης στο δίκτυο.

Τόσο η διαδικασία της επαλήθευσης όσο και η σύγκριση των αποτελεσμάτων για το Δίκτυο 1 με τα αποτελέσματα των μελετών του BWSN αποδεικνύουν ότι η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε οδηγεί σε αξιόπιστα δίκτυα αισθητήρων, που ανταποκρίνονται πολύ καλά σε ποικίλα σενάρια επίθεσης, επιτυγχάνοντας ικανοποιητικές τιμές για όλα τα κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη, όπως ο χρόνος και η πιθανότητα ανίχνευσης.

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

Water distribution systems are among the most critical infrastructure because of their vital role. In recent years, the security of these infrastructures has attracted the interest of researchers and state agencies due to the terrorist events that took place worldwide.

The introduction of a chemical into the network can potentially be detected by placing a number of sensors in the distribution network. By installing monitoring stations across the network is created a detection and early warning system (Early Warning Detection System - EWDS). Its purpose is to reliably recognize a contamination episode (deliberate or accidental) in sufficient time so that it can be treated effectively. However, equipping each network node is prohibitively costly and therefore the optimization of the sensor placement in water networks becomes a crucial problem.

The scope of this postgraduate thesis is the development of a methodological framework for the optimal design of quality sensors placement in water distribution systems. More specifically, the methodology was developed in Matlab – programming, linked to EPANET software and utilized the Matlab multicriteria genetic algorithm. First step is the selection of the objective functions, used in the optimization process. Then a matrix of contamination events is constructed, which cover every possible time period for introducing the chemical during the simulation time (e.g. 48 h) and each node of the network. Next stage is the hydraulic and water quality simulation of three model networks via EPANET, the results of which were used for the calculation of objective functions. Finally, we apply Matlab genetic algorithm considering three scenarios for each network with different number of sensors and as a result are Pareto fronts for each scenario. Last stage is the process of validation in order to assess the performance of the solutions resulting from the optimization in other random attack scenarios.

2. Optimization Algorithms

Optimization is the process of identifying the extrema (maximum or minimum value) of a function. In particular, the process of identifying the total extremum of the function in the decision space is known as global optimization, while the process of detecting a local extremum in an area of decision space is called local optimization.

When an optimization problem models a physical problem involving only one objective function, the process of finding the optimal solution is called single objective optimization. While when an optimization problem involves more than one objective functions, the process of finding one or more optimal solutions are known as multi-criteria optimization.

Def. 1: (Multiobjective Optimization Problem) A general MOP includes a set of n parameters (decision variables), a set of k objective functions, and a set of m constraints. Objective functions and constraints are functions of the decision variables. The optimization goal is to

$$\begin{array}{ll}
 \text{maximize} & \mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})) \\
 \text{subject to} & \mathbf{e}(\mathbf{x}) = (e_1(\mathbf{x}), e_2(\mathbf{x}), \dots, e_m(\mathbf{x})) \leq \mathbf{0} \\
 \text{where} & \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbf{X} \\
 & \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_k) \in \mathbf{Y}
 \end{array}$$

and \mathbf{x} is the decision vector, \mathbf{y} is the objective vector, \mathbf{X} is denoted as the decision space, and \mathbf{Y} is called the objective space. The constraints $\mathbf{e}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$ determine the set of feasible solutions.

Def. 2: (Feasible Set) The feasible set \mathbf{X}_f is defined as the set of decision vectors \mathbf{x} that satisfy the constraints $\mathbf{e}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{X}_f = \{\mathbf{x} \in \mathbf{X} \mid \mathbf{e}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}\}$$

The image of \mathbf{X}_f , i.e., the feasible region in the objective space, is denoted as

$$\mathbf{Y}_f = \mathbf{f}(\mathbf{X}_f) = \cup_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f} \{\mathbf{f}(\mathbf{x})\}$$

Def. 3: (Pareto Optimality) A decision vector $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f$ is said to be non dominated regarding a set $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{X}_f$ if

$$\nexists \alpha \in \mathbf{A}: \alpha \succ \mathbf{x}$$

If it is clear within the context which set \mathbf{A} is meant, it is simply left out. Moreover, \mathbf{x} is said to be Pareto optimal if \mathbf{x} is non dominated regarding \mathbf{X}_f .

Classical methods for generating the Pareto-optimal set aggregate the objectives into a single, parameterized objective function by analogy to decision making before search. Two representatives of this class of techniques are the weighting method and the constraint method.

Weighting Method

The original MOP is converted to an SOP by forming a linear combination of the objectives:

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \mathbf{y} = f(\mathbf{x}) = w_1 f_1(\mathbf{x}) + w_2 f_2(\mathbf{x}) + \cdots + w_k f_k(\mathbf{x}) \\ \text{subject to} \quad & \mathbf{x} \in \mathbf{X}_f \end{aligned}$$

The w_i are called weights and, without loss of generality, normalized such that $\sum w_i = 1$. Solving the above optimization problem for a certain number of different weight combinations yields a set of solutions.

On condition that an exact optimization algorithm is used and all weights are positive, this method will only generate Pareto-optimal solutions which can be easily shown. Assume that a feasible decision vector \mathbf{a} maximizes f for a given weight combination and is not Pareto optimal. Then, there is a solution \mathbf{b} which dominates \mathbf{a} , i.e., without loss of generality $f_1(\mathbf{b}) > f_1(\mathbf{a})$ and $f_i(\mathbf{b}) \geq f_i(\mathbf{a})$ for $i = 2, \dots, k$. Therefore, $f(\mathbf{b}) > f(\mathbf{a})$, which is a contradiction to the assumption that $f(\mathbf{a})$ is maximum.

Constraint Method

Another technique which is not biased towards convex portions of the Pareto optimal front transforms $k - 1$ of the k objectives into constraints. The remaining objective, which can be chosen arbitrarily, is the objective function of the resulting SOP:

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \mathbf{y} = f(\mathbf{x}) = f_h(\mathbf{x}) \\ \text{subject to} \quad & e_i(\mathbf{x}) = f_i(\mathbf{x}) \geq \varepsilon_i, \quad (1 \leq i \leq k, i \neq h) \\ & \mathbf{x} \in \mathbf{X}_f \end{aligned}$$

The lower bounds, ε_i , are the parameters that are varied by the optimizer in order to find multiple Pareto-optimal solutions.

Genetic Algorithms

Genetic algorithms are the most popular optimization technique of evolutionary algorithms category and based on mechanisms of genetics and evolution observed in living organisms. The main idea of a genetic algorithm is the maintenance of a population of solutions and its development over time, where new populations generated.

The development, which followed the last decades is rapid and today the GAs are considered more robust than existing direct search methods since they are able to combine elements of direct and stochastic search techniques . An important characteristic is the speed and reliability of a search since they maintain a population of possible solutions on which they experiment, unlike other approaches which process only one part of the search space.

GAs have been the most commonly applied Evolutionary Algorithms within water resources planning and management literature. Although there is no universal definition, GAs are characterized by the following elements:

1. Generation of an initial population of potential solutions, each identified as a chromosome;
2. Computation of the objective function value, or fitness metric, of each solution and subsequent ranking of chromosomes according to this metric;
3. Some aspect of chromosome ranking and selection of candidate solutions to participate in a mating operator, where information from two or more parent solutions are combined to create offspring solutions;
4. Mutation of each individual offspring to maintain diversity and prevent premature convergence to local optima. These elements are repeated in sequential generations until a suitable solution is obtained.

Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)

First, a combined population $R_t = P_t \cup Q_t$ formed. The population R_t will be of size $2N$. Then, the population R_t is sorted according to non-domination. The new parent population P_{t+1} is formed by adding solutions from the first front till the size exceeds N . Thereafter, the solutions of the last accepted front are sorted according to $\geq n$ the first N points are picked. This is how the population P_{t+1} of size N is constructed. This population of size N is now used for selection, crossover and mutation to create a new population Q_{t+1} of size N .

3. Water distribution systems

Water network is a system of pipes under pressure, which receives water from a small number of sources (entry points) and leads to multiple destination points (exit points or consumers). Essentially distributes the treated water from the tanks into multiple destination points (consumers) in an urban area.

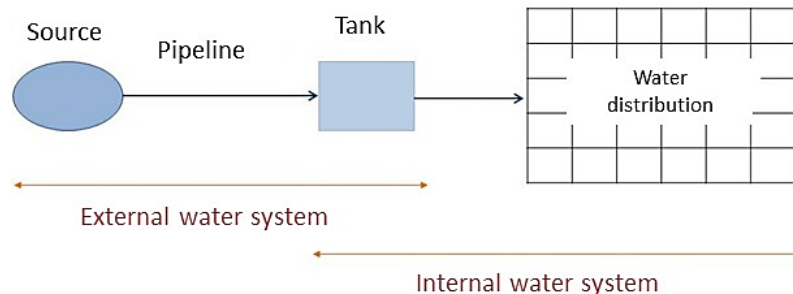


Figure 1: Water distribution system layout

Basic principles of network operation

- Insurance of required water supply at each point in the network with adequate speed.
- Limitation of maximum pressures.
- Maintenance pressure within acceptable limits.
- Protection of water system against water hammer.

EPANET software

Full-featured and accurate hydraulic modeling is a prerequisite for doing effective water quality modeling. EPANET contains a state-of-the-art hydraulic analysis engine that includes the following capabilities:

- places no limit on the size of the network that can be analyzed
- computes friction head loss using the Hazen-Williams, Darcy- Weisbach, or Chezy-Manning formulas
- includes minor head losses for bends, fittings, etc.
- models constant or variable speed pumps
- computes pumping energy and cost
- considers multiple demand categories at nodes, each with its own pattern of time variation
- models pressure-dependent flow issuing from emitters (sprinkler heads).

In addition to hydraulic modeling, EPANET provides the following water quality modeling capabilities:

- models the movement of a non-reactive tracer material through the network over time
- models the movement and fate of a reactive material as it grows (e.g., a disinfection by-product) or decays (e.g., chlorine residual) with time
- models the age of water throughout a network
- models reactions both in the bulk flow and at the pipe wall
- uses n-th order kinetics to model reactions in the bulk flow
- uses zero or first order kinetics to model reactions at the pipe wall
- allows for time-varying concentration or mass inputs at any location in the network.

Sensor networks

For the last decade there has been increasing interest in the development of sensor networks to cope with both deliberate and accidental hazard's intrusions into water distribution systems. Optimization models and solution algorithms have been developed for identifying the most efficient sensor locations. These optimization models and solution algorithms have involved simplifying assumptions about design objectives, network contaminant transport, sensor response, event detection, emergency response, installation and maintenance costs, etc.

More recently a special session entitled "Battle of the Water Sensors Network" (BWSN 2006) was dedicated to this issue during the conference of Water Distribution Systems Analysis (2006) held in Cincinnati. The special session included 14 papers addressing this problem and the researchers provided solutions to this problem using different methods and different points of view. All the teams were asked to develop designs according to a set of rules, which defined the design performance metrics and the characteristics of the contamination events. Teams were free to develop their designs and methodologies, yet, for comparison, all outcome designs were evaluated using identical procedures.

Contributed sensor network designs were evaluated using the following four quantitative design objectives:

1. Expected Time of Detection (Z_1).
2. Expected Population Affected prior to Detection (Z_2).
3. Expected Consumption of Contaminated Water prior to Detection (Z_3).
4. Detection likelihood (Z_4).

4. Methodology

Briefly, the developed methodology comprises the following six steps:

1. Selection of suitable objective functions.
2. Construction of chemical injection matrix.
3. Simulation of scenarios with EPANET.
4. Calculation of objective functions.
5. Optimization.
6. Validation.

Selection of suitable objective functions

The objective functions used for optimization in this thesis are the following:

1. *Expected Time of Detection (Z_1)*

For a particular episode of pollution, the detection time is the time elapsed since the start of the contamination event, to the first identified presence of a nonzero contaminant concentration. The time of first detection, t_j , refers to the j th sensor location. The time of detection for the sensor network for a particular contamination event, t_d , is the minimum among all sensors present in the design.

The objective function to be minimized is the expected value computed over the assumed probability distribution of contamination events

$$Z_1 = E(t_d),$$

where $E(t_d)$ denotes the mathematical expectation of the minimum detection time t_d . Since undetected events had no detection times, they were not included in the analysis.

2. *Detection likelihood (Z_2)*

Given a sensor network design (i.e., number and locations) the detection likelihood (i.e., the probability of detection) is estimated by

$$Z_2 = \frac{1}{S} \sum_{r=1}^S d_r$$

where $d_r=1$ if contamination scenario r is detected, and zero otherwise; and S denotes the total number of the contamination scenarios considered. Z_2 is to be maximized.

3. *Expected Consumption of Contaminated Water prior to Detection (Z_3)*

Z_3 = expected volume of contaminated water consumed prior to detection

$$Z_3 = E(V_d),$$

where V_d denotes the total volumetric water demand that exceeds a predefined hazard concentration threshold C ; and $E(V_d)$ = mathematical expectation of V_d . As for the expected population affected, key assumptions are that no water is delivered after detection and undetected events are not counted. Z_3 is to be minimized.

4. Number of sensors (Z_4)

To assess the size of the change in the objective functions as the likelihood or the detection time the number of sensors was introduced as a variable in some optimization scenarios. It should also be noted that since the cost of a sensor network depends on the number of sensors, it would be interesting to investigate it.

5. Expected Time of Detection (Z_1^*) (second approach)

The Z_1^* is estimated using the same type but the first detection time of each scenario is calculated differently. More specifically, in the absence of episode detection, we set detection time equal the time of simulation. This function implicitly includes the possibility of detection.

Construction of chemical injection matrix

Contaminant intrusions occurred at network nodes, with an injection flow rate of 125 L/h, contaminant concentration of 230,000 mg/L and injection duration of 2 h. The contaminant was assumed conservative after injection. Each contamination scenario involved a single injection location, which may occur at any network node and begin at any time with equal probability.

Under these assumptions a binary matrix is constructed ($n \times m$), where the lines (n) refer to the network nodes and the columns (m) at simulation time. The matrix takes values 0 and 1, which refer to infected and uninfected nodes respectively.

Simulation of scenarios with EPANET

The hydraulic simulation of networks was held with EPANET (version 2.00.12).

In this thesis initial chemical concentration were set equal to zero and the introduction of the chemical is done through the Source Quality editor of EPANET.

The following sizes were calculated from simulation and stored in matrixes:

- Basic hydraulic parameters such as the hydraulic load and pressure.
- Time series of water demand at each node.
- Time series of the concentration of the chemical, which has been selected (eg chlorine) in each node.

- The time and the node in which chemical substance is imported.

Optimization

Optimization was performed with multicriteria genetic algorithm of Matlab, which is a variation of the GA NSGA-II and optimizes simultaneously more than one criteria. The selected parameters are presented in Table 1.

Table 1: Parameters used in GA

Parameters	Value
Population size	100
Generation Number	200
Function tolerance	10^{-6}
Pareto fraction	0.7
Crossover ratio	0.8
Mutation ratio	0.2

Validation

Finally, given the best solutions, an attempt is made to assess how the results obtained by optimization respond to other random injection scenarios. Note that is not performed again the step of optimization, so the solutions do not create front Pareto.

Optimization scenarios

In the process of optimization, the objective functions were not optimized simultaneously, because or in some cases it is not computationally feasible either the aim was to evaluate sensitiveness and robustness of each objective function .

More specifically, five scenarios were held, which are divided into two groups and are described in the following table

Table 2: Optimization scenarios

Scenario	Objective functions
1	Time of Detection (Z_1) – Detection likelihood (Z_2)
Group 1	2
	Time of Detection (Z_1) – Detection likelihood (Z_2) - Consumption of Contaminated Water prior to Detection (Z_3)

	3	Time of Detection (Z_1) – Detection likelihood (Z_2) – Number of sensors (Z_4)
Group 2	4	Time of Detection (Z_1^*) – Detection likelihood (Z_2)
	5	Time of Detection (Z_1^*) – Number of sensors (Z_4)

Test Networks

The aim was to cover a wide range of system features, based on morphology and elements (such as the number of tanks, pumps and sources) they contain. Three model networks were chosen. Namely: Net 1: BWSN1, Net 2: Ky3, Net 3: Ky5. For each network, multiple scenarios were explored by varying the number of sensors in order to assess if and how the solutions are affected. The following table lists the investigated scenarios. The maximum number of sensors assumed that does not exceed 20% of the number of nodes in the network.

Table 3: Selected values of sensors number

Network	Sensors number
1	5, 10, 20
2	5, 15, 30
3	15, 30, 40

5. Results

Due to large number of scenarios and analysis made in this thesis, in this section some indicative results are presented for the selected networks.

Network 1

Fig.2 shows the Pareto fronts for three values of the number of sensors (N) and some characteristic solutions are shown with numbers (Scenario 1). The tradeoff between the 2 objectives is as follows: the ideal sensors locations for maximizing the detection likelihood (objective 2) are the most downstream nodes of the water system. This sensor layout conflicts with the need to detect the pollution events as soon as possible (objective 1) due to the long time delays associated with the contamination transport to the most downstream

areas of the system. It is obvious that by increasing the number of sensors, the prices of objective functions increase.

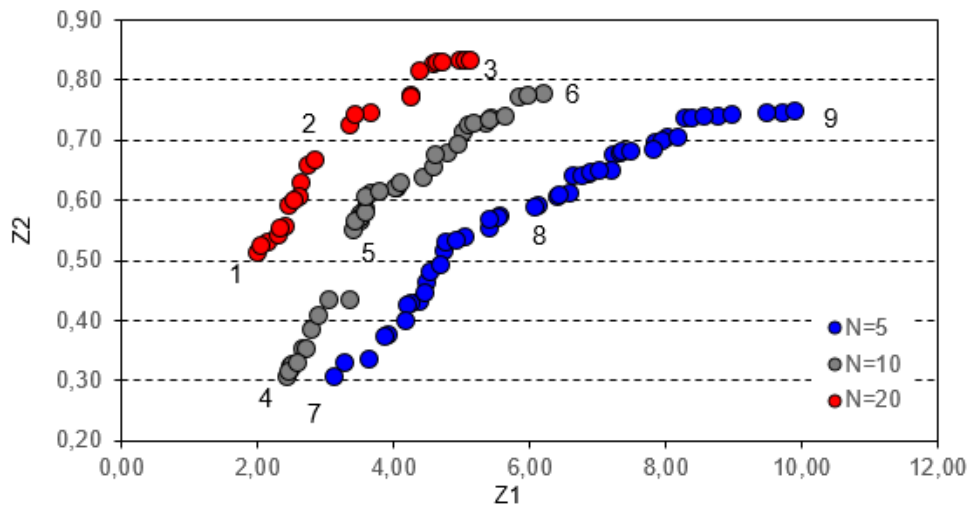


Figure 2: Pareto fronts (Scenario 1 – Net 1)

The layout of sensors location for solution 2, 4 and 9 are shown in Fig. 3.

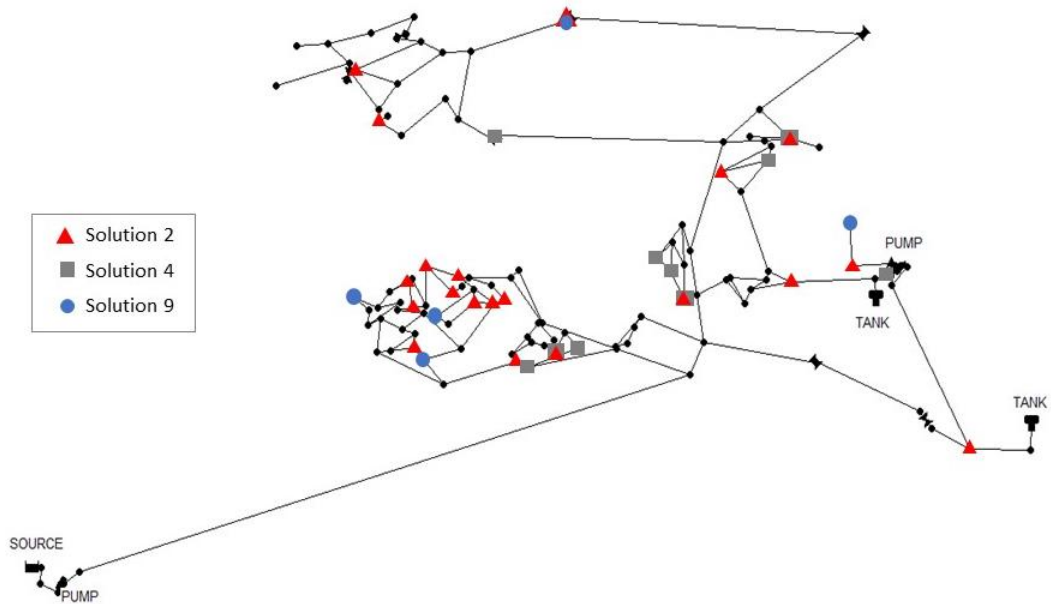


Figure 3: Solutions layout (Scenario 1 – Net 1)

Fig. 4 shows a comparison between the solutions layout of Scenario 1 and Scenario 2.

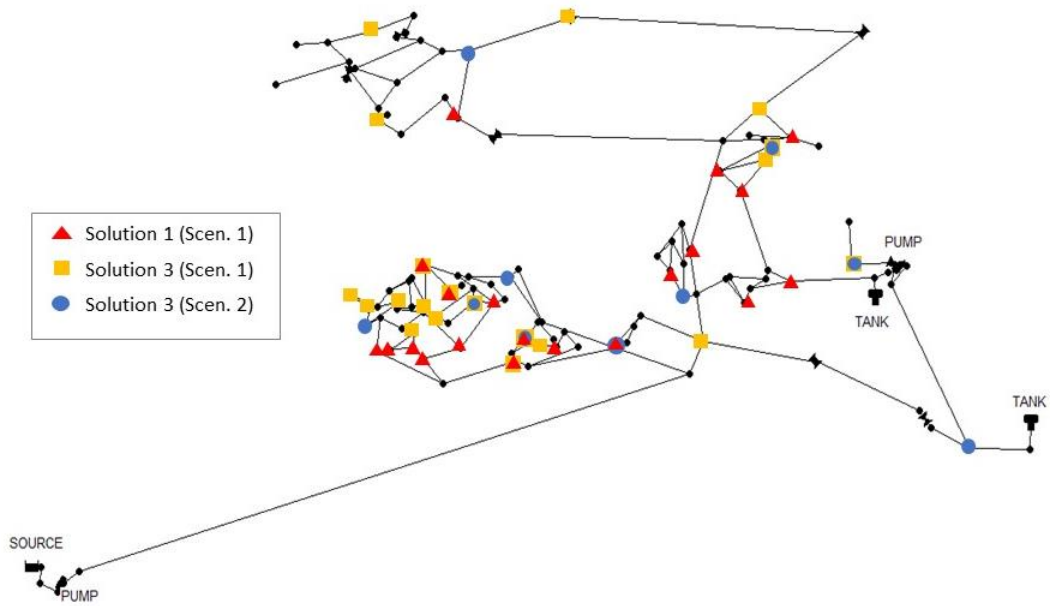


Figure 4: Solutions layout (Scenario 1, 2 – Net 1)

Network 2

Fig. 5 shows the solutions of the Scenario 3, which optimizes Z_1 , Z_2 and Z_4 . It is clear that increasing the number of sensors (Z_4), the detection time is reduced (Z_1) and increases the probability (Z_2). Also, we observe that for small values of Z_4 i.e. small number of sensors, the solutions have high dispersion while increasing the variable Z_4 solutions converge.

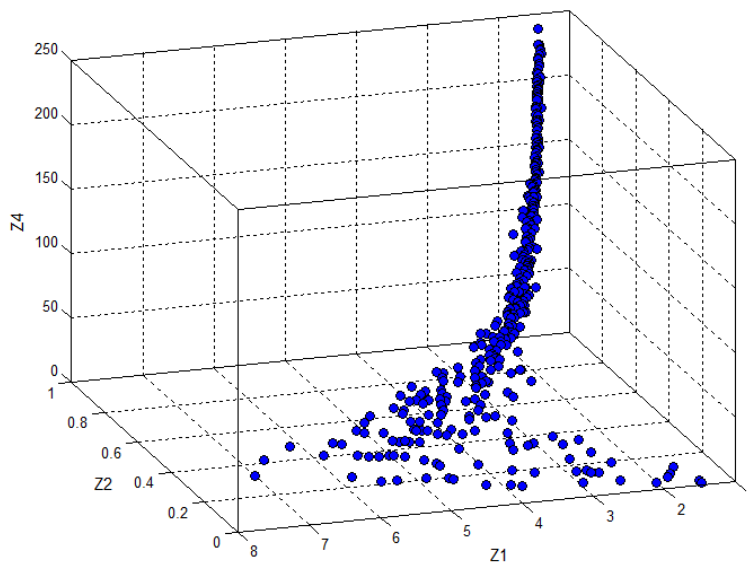


Figure 5: Best solutions (Scenario 3 – Net 2)

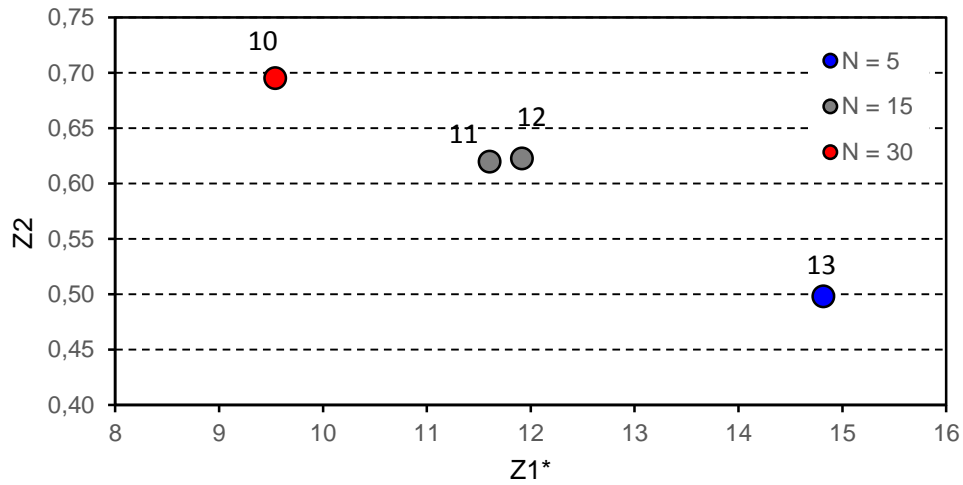


Figure 6: Best solutions (Scenario 4 – Net 3)

In Scenario 4, we have one or two best solutions per event rather Pareto front, as in Scenario 1, because objective functions Z_1^* and Z_2 are equivalent and the algorithm can optimize simultaneously with a solution both functions. It is noted that for a network with more sensors, there is a clear improvement in the performance of functions.

Network 3

In Fig.7 is apparent that for high values of the variable Z_4 , the time Z_1^* significantly reduced. However, it is observed that prices Z_4 greater than 200 the change of time is negligible.

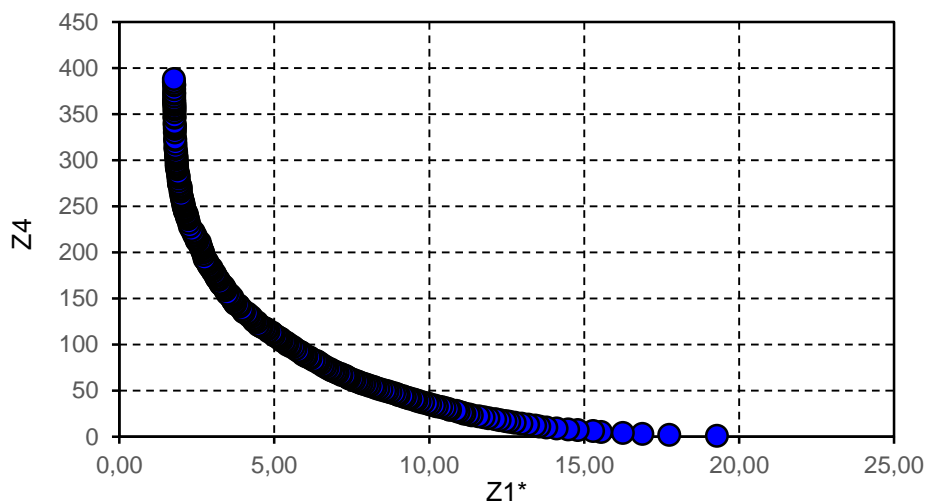


Figure 7: Pareto front (Scenario 5 – Net 3)

Fig. 8 shows the positions of the sensors resulting from the solution 4, which gives the worst value of Z_2 and the best value of Z_1 and the solution 6, which gives the worst value of Z_1 and the best value of Z_2 . It is observed that the positions of the solution 4 is slightly more concentrated than the solution 6, which covers several corner nodes of the network.

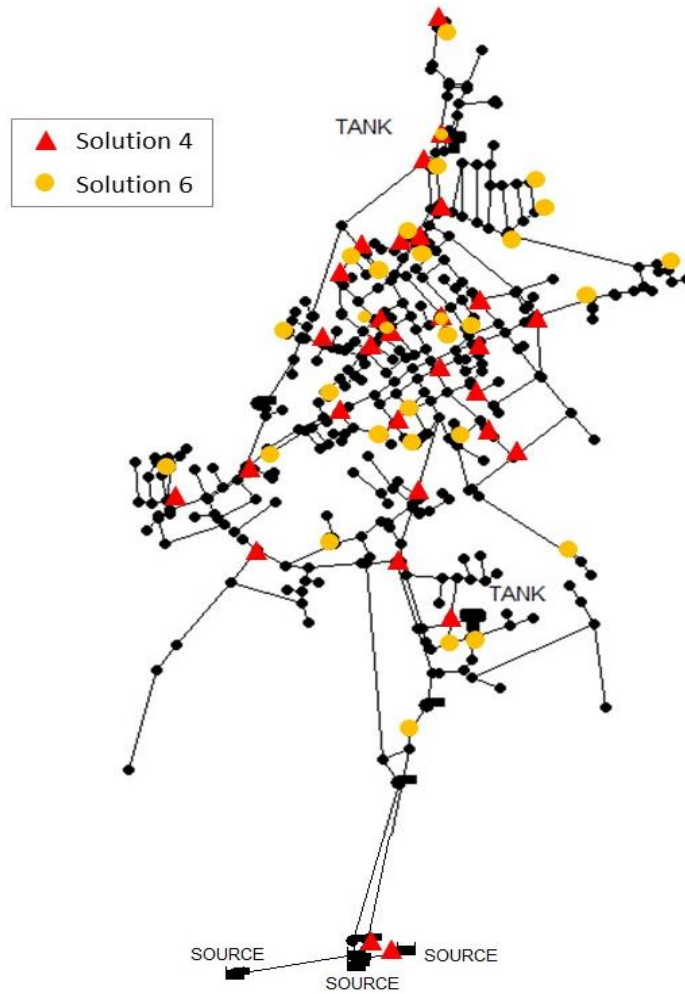


Figure 8: Solutions layout (Scenario 1 – Net 3)

Validation

Fig. 11, 12 and 13 show the comparison between optimization and validation results for the three networks. For the process of verification generally Networks 1 and 2 solutions correspond very well to other chemical injection scenarios. In the case of Network 3, the solutions have worse performance.

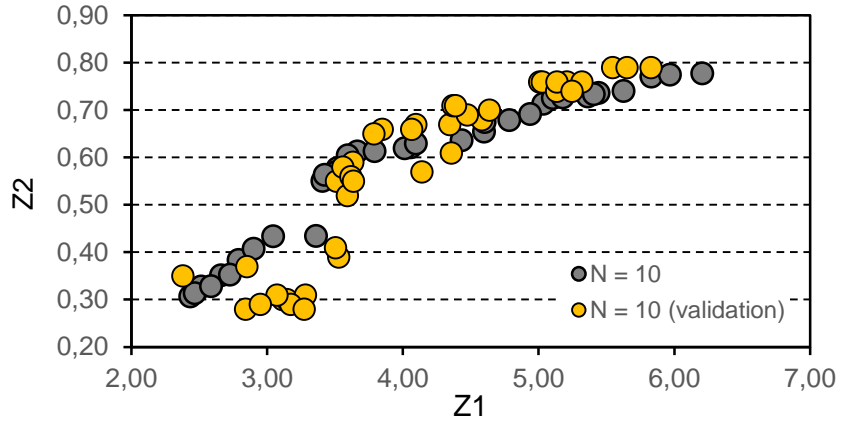


Figure 9: Comparison between Pareto front and validation results (Scenario 1 – Net 1)

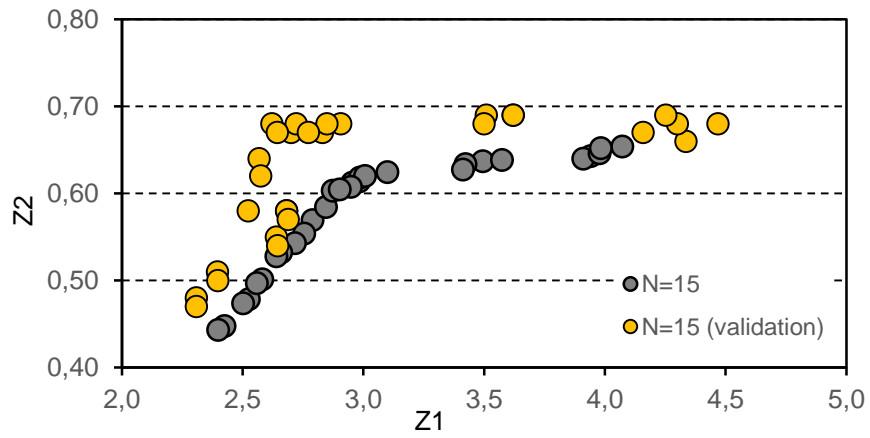


Figure 10: Comparison between Pareto front and validation results (Scenario 1 – Net 2)

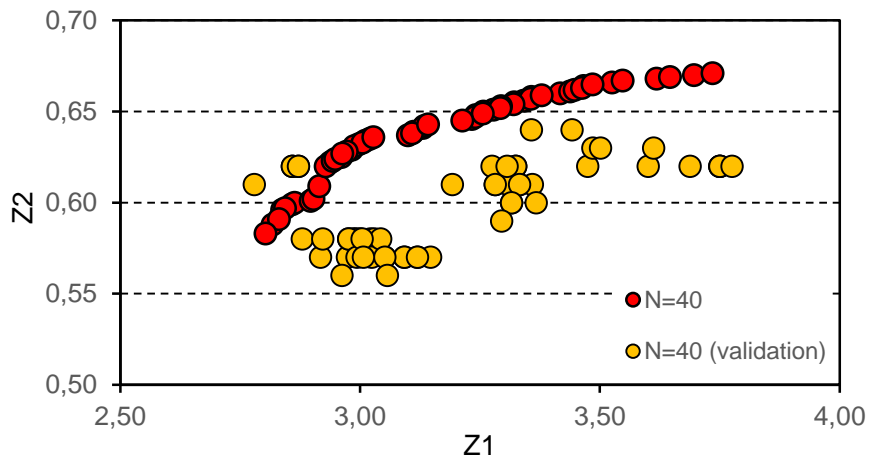


Figure 11: Comparison between Pareto front and validation results (Scenario 1 – Net 3)

6. Conclusions

In conclusion, in this thesis a methodological framework was developed for the optimal design of quality sensors placement in water distribution systems, using the multicriteria genetic algorithm of Matlab. Both the validation and the comparison of them with the BWSN results prove that the methodology estimates logical and reliable results as regards the layout of sensors. The most important conclusions from the research were the following:

- For all scenarios is observed that increasing the number of sensors, improves significantly the values of objective functions and thus increase the effectiveness and the robustness of EWDS.
- As regards the layout of the solutions in the network, for Scenario 1, it is observed that locations that minimize the detection time are relatively concentrated in the network. Instead, the positions of the solutions, which maximize the probability of detection is more spread in the network and in some cases in more upstream regions.
- In the case of Scenario 2, it seems that the introduction of the function Z_3 (Consumption of Contaminated Water prior to Detection) in the optimization, place the sensors in locations near sources, tanks and corner nodes of the network.
- In the case of Scenario 3, with increasing the number of sensors (Z_4), the detection time is reduced (Z_1) and increases the probability (Z_2).
- In the case of Scenario 4, we have one to three solutions for each case. This occurs as objectives functions Z_1 and Z_2^* are equivalent and algorithm is able optimize both simultaneously with a solution. Furthermore, the objective Z_1^* contains implicitly the likelihood of detection (Z_2) and as a result the calculation of Z_2 can be omitted and the computational burden is reduced.
- For the process of verification generally Networks 1 and 2 solutions correspond very well to other chemical injection scenarios. In the case of Network 3, the solutions demonstrate worse performance (compared to Network 1 and 2) although, they are still able to provide adequate infrastructure security against potential contamination scenarios.

Focusing on the proposed methodology, we can propose some ideas for further development. It would be interesting to be considered chemical injection scenarios with different duration (eg 1h, 3h) and different probability of occurrence, as in the present study were equally. Finally, they could be introduced restrictions for the positions of sensors, giving priority to nodes with high demand or near sensitive areas, resulting in more targeted search algorithm and thus reduced computational time.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, κρίσιμες υποδομές είναι οι εγκαταστάσεις ή τα δίκτυα, τα οποία, εάν διαταραχθούν, θα επηρέαζαν σε σημαντικό βαθμό την υγεία, την ασφάλεια ή την οικονομική ευμάρεια των πολιτών (Commission, 2004). Λόγω του ζωτικού τους ρόλου τα δίκτυα ύδρευσης συγκαταλέγονται στις κρίσιμες υποδομές, μαζί με τα συστήματα παραγωγής ενέργειας και τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Τα τελευταία χρόνια, η ασφάλεια αυτών των υποδομών έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον ερευνητών και κρατικών φορέων λόγω των τρομοκρατικών γεγονότων, που έλαβαν χώρα παγκοσμίως.

Τέτοια γεγονότα μπορεί να είναι μία άμεση επίθεση σε μία από τις βασικές κατασκευές, όπως τα φράγματα, οι μονάδες επεξεργασίας και οι δεξαμενές αποθήκευσης, η απενεργοποίηση του συστήματος εμποπτικού ελέγχου του νερού, γεγονός που ίσως έχει ως αποτέλεσμα διακοπές νερού ή ανεπάρκεια στην παροχή επεξεργασμένου νερού και η σκόπιμη χημική ή βιολογική πρόσμειξη σε κόμβο του συστήματος. Η εισαγωγή μίας χημικής ουσίας στο δίκτυο μπορεί δυνητικά να ανιχνευθεί τοποθετώντας έναν αριθμό αισθητήρων στο δίκτυο διανομής. Με την εγκατάσταση σταθμών παρακολούθησης σε όλο το δίκτυο δημιουργείται ένα σύστημα ανίχνευσης και έγκαιρης προειδοποίησης (Early Warning Detection System – EWDS). Στόχος του είναι να αναγνωρίζει αξιόπιστα ένα επεισόδιο μόλυνσης (σκόπιμο ή τυχαίο) στην πηγή ή στο δίκτυο διανομής, σε επαρκή χρόνο, ώστε να μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά, δηλαδή να μειωθούν ή και να αποφευχθούν οι επιπτώσεις. Ωστόσο, εξοπλίζοντας κάθε κόμβο του δικτύου είναι απαγορευτικά δαπανηρό και συνεπώς η βελτιστοποίηση των θέσεων εγκατάστασης των αισθητήρων γίνεται ένα πρόβλημα ζωτικής σημασίας.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναπτύξει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την βέλτιστη χωροθέτηση των αισθητήρων ποιότητας σε δίκτυα ύδρευσης. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, μέσω του οποίου συνδέθηκε το λογισμικό του EPANET με τον πολυκριτηριακό γενετικό αλγόριθμο του Matlab. Πρώτο στάδιο ήταν η επιλογή των αντικειμενικών συναρτήσεων (objective functions), που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Οι συναρτήσεις που επιλέχθηκαν είναι ο αναμενόμενος χρόνος ανίχνευσης και

μία δεύτερη προσέγγισή του, η πιθανότητα ανίχνευσης και ο αναμενόμενος όγκος νερού που καταναλώθηκε μέχρι την ανίχνευση. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν σενάρια έγχυσης χημικής ουσίας στο δίκτυο, τα οποία καλύπτουν κάθε πιθανό χρονικό διάστημα μέσα στο χρόνο προσομοίωσης (π.χ. 48 h) και κάθε κόμβο του δικτύου. Επόμενο στάδιο ήταν η υδραυλική προσομοίωση και η προσομοίωση ποιότητας νερού τριών δικτύων μέσω του EPANET για τα σενάρια που επιλέχθηκαν, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων. Τέλος, εφαρμόστηκε ο γενετικός αλγόριθμος του Matlab θεωρώντας τρία σενάρια για κάθε δίκτυο με διαφορετικό αριθμό αισθητήρων και προέκυψαν τα μέτωπα Pareto. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις δεν βελτιστοποιήθηκαν ταυτόχρονα αλλά σε συνδυασμούς. Τελευταίο στάδιο ήταν η διαδικασία της επαλήθευσης (validation) με στόχο την εκτίμηση της απόδοσης των βέλτιστων λύσεων σε άλλα τυχαία σενάρια επίθεσης στο δίκτυο.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή του αντικειμένου και του στόχου της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται γενικά οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και οι εφαρμογές τους σε προβλήματα υδατικών πόρων. Επιπλέον, αναλύονται βασικές έννοιες της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθούν γενικά οι γενετικοί αλγόριθμοι και ειδικότερα ο NSGA - II.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μία θεωρητική προσέγγιση των δικτύων ύδρευσης, όπου περιγράφεται η δομή τους, τα είδη, οι λειτουργικές απαιτήσεις, οι βασικές αρχές της υδραυλικής και τα μοντέλα προσομοίωσης των δικτύων. Στη συνέχεια, αναλύεται εκτενώς το λογισμικό υδραυλικής προσομοίωσης δικτύων EPANET και τέλος γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα δίκτυα αισθητήρων.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν για τη ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την εκτίμηση της βέλτιστης τοποθέτησης ποιοτικών αισθητήρων σε δίκτυα ύδρευσης. Επιπλέον, περιγράφονται τα δίκτυα ύδρευσης, στα οποία εφαρμόστηκε η μεθοδολογία και τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης και της επαλήθευσης.

Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

2.1 Εισαγωγή

Βελτιστοποίηση (optimization) ονομάζεται η διαδικασία εντοπισμού των ακροτάτων μιας συνάρτησης. Ειδικότερα, η διαδικασία εντοπισμού του ολικού ακρότατου (μεγίστου ή ελαχίστου) της συνάρτησης στο πεδίο ορισμού είναι γνωστή ως ολική βελτιστοποίηση (global optimization), ενώ η διαδικασία εντοπισμού ενός τοπικού ακρότατου σε μια περιοχή του πεδίου καλείται τοπική βελτιστοποίηση (local optimization).

Η έννοια της βελτιστοποίησης εφαρμόζεται σε προβλήματα λήψης αποφάσεων (decision-making) και προϋποθέτει μια διαδοχή από εναλλακτικές επιλογές (alternatives) και αξιολογήσεις (evaluations) των επιπτώσεων κάθε επιλογής. Κάθε επιλογή που ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος καλείται εφικτή (feasible). Το σύνολο των εφικτών επιλογών καλείται εφικτός χώρος ή χώρος αποφάσεων (decision space) ή χώρος αναζήτησης (search space) .

Αν κάθε εφικτή επιλογή μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο μεταβλητών ελέγχου (control variables) $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ και αν σε κάθε τέτοια περιγραφή μπορεί να αντιστοιχιστεί ένα μέτρο επίδοσης (performance measure), τότε ως βέλτιστη (optimal) λαμβάνεται η απόφαση που μεγιστοποιεί το εν λόγω μέτρο. Η μαθηματική έκφραση του μέτρου επίδοσης καλείται αντικειμενική ή στοχική συνάρτηση (objective function) και συμβολίζεται $f(\mathbf{x})$. Το μέτρο επίδοσης μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα κριτήρια, οπότε η στοχική συνάρτηση είναι, αντίστοιχα, βαθμωτή ή διανυσματική. Τα βασικά εργαλεία βελτιστοποίησης συστημάτων είναι τα εξής (Μακρόπουλος & Ευστρατιάδης 2012):

- Μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης
- Αλγόριθμοι γραμμικής βελτιστοποίησης
- Αλγόριθμοι δικτυακής βελτιστοποίησης
- Μέθοδοι αναζήτησης τοπικών ακροτάτων
- Τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης
- Κλασικοί γενετικοί αλγόριθμοι
- Υβριδικοί εξελικτικοί αλγόριθμοι

2.2 Εφαρμογές στους υδατικούς πόρους

Η βελτιστοποίηση ως μέσο λήψης αποφάσεων χαρακτηρίζεται από ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών για την επίλυση προβλημάτων μεταξύ των οποίων και τα προβλήματα υδατικών πόρων. Τα εν λόγω προβλήματα σχετίζονται με δίκτυα ύδρευσης, δίκτυα ακαθάρτων, αντιπλημμυρικών έργων ή και σε έργα μεγαλύτερης κλίμακας, όπως ο σχεδιασμός υδροσυστημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης έγκειται στην ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού, που μπορεί να φτάνουν και το 50%, όπως στην περίπτωση του δικτύου της Αθήνας ή στην ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας μέσω της βέλτιστης λειτουργίας των αντλιών. Άλλο ένα πρόβλημα που άπτεται του πεδίου εφαρμογής της βελτιστοποίησης είναι η επιδιόρθωση των δικτύων ακαθάρτων με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας μέσω της ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση συνήθως επιδιώκεται ο ελάχιστος αριθμός διακοπών λειτουργίας του δικτύου λόγω αποφράξεων.

Εκτός από τα προβλήματα λειτουργίας των δικτύων, η βελτιστοποίηση επιλύει προβλήματα σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων και σχεδίων. Τα αντιπλημμυρικά έργα σχεδιάζονται για πλημμυρικά επεισόδια με διάφορες περιόδους επαναφοράς και στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους και των κοινωνικών επιπτώσεων.

Τέλος, ο σχεδιασμός νέων υδροσυστημάτων ή η ένταξη νέων έργων σε υφιστάμενο σύστημα, όπως ταμειυτήρες, ΥΗΣ ή υδραγωγεία) απαιτεί χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Αρχικά, διερευνώνται η γενική διάταξη και τα χαρακτηριστικά των νέων έργων, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του συστήματος και στη συνέχεια βελτιστοποιούνται τα βασικά ενεργειακά και οικονομικά μεγέθη, ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη λύση.

2.3 Προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

2.3.1 Εισαγωγή

Όταν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μοντελοποιεί ένα φυσικό πρόβλημα που εμπεριέχει μόνο μία αντικειμενική συνάρτηση, η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης καλείται *μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση*. Υπάρχουν αναλυτικοί και ευρετικοί αλγόριθμοι μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Επιπρόσθετα αρχές ντετερμινιστικής αναζήτησης περιέχονται σε έναν αλγόριθμο, όπως και αρχές στοχαστικής αναζήτησης, οι οποίες επιτρέπουν στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης να βρίσκουν γενικά βέλτιστες λύσεις περισσότερο αξιόπιστα.

Όταν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης εμπεριέχει περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις, η διαδικασία εύρεσης μίας ή περισσότερων βέλτιστων λύσεων είναι γνωστή ως *πολύ-κριτηριακή βελτιστοποίηση*.

Ορισμός 1: (Πρόβλημα πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης) Ένα γενικό πρόβλημα πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης περιλαμβάνει n μεταβλητές σχεδιασμού, k αντικειμενικές συναρτήσεις και m περιορισμούς. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί είναι συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδιασμού. Άρα η μαθηματική διατύπωση ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης λαμβάνει την παρακάτω μορφή (Zitzler, 1999):

$$\begin{aligned} \max \quad & \mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})) \\ \text{με περιορισμούς:} \quad & \mathbf{e}(\mathbf{x}) = (e_1(\mathbf{x}), e_2(\mathbf{x}), \dots, e_m(\mathbf{x})) \leq \mathbf{0} \\ \text{όπου:} \quad & \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbf{X} \\ & \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_k) \in \mathbf{Y} \end{aligned}$$

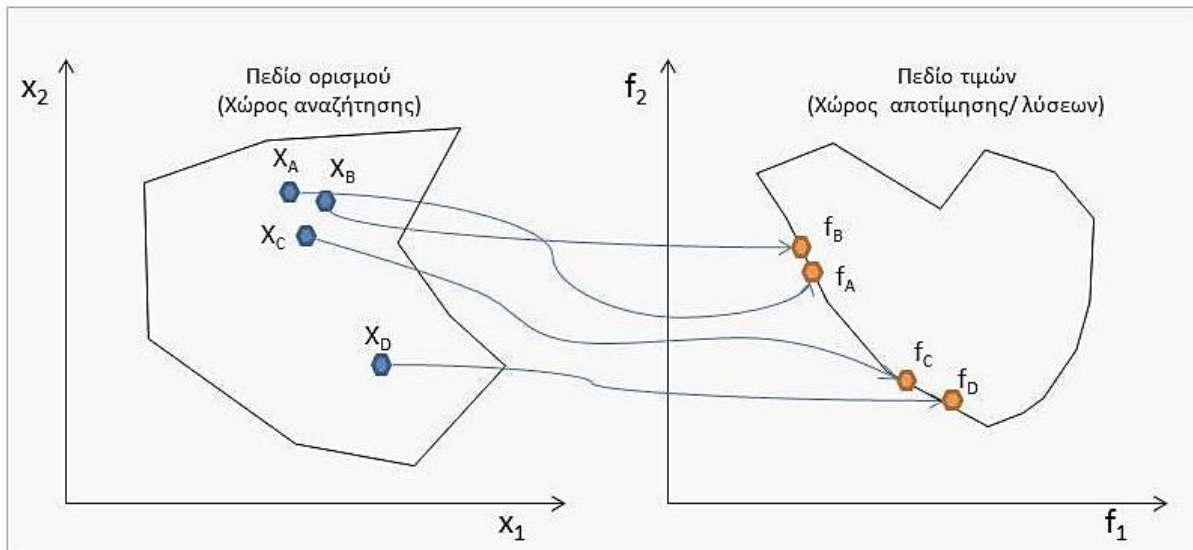
Ως \mathbf{x} τίθεται το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού, \mathbf{y} το διάνυσμα των αντικειμενικών συναρτήσεων, \mathbf{X} ο χώρος των λύσεων των μεταβλητών σχεδιασμού και \mathbf{Y} ο χώρος των λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι περιορισμοί $\mathbf{e}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$ καθορίζουν τις επιτρεπτές λύσεις.

Ορισμός 2: (Σύνολο λύσεων) Το σύνολο \mathbf{X}_f αποτελεί το σύνολο των διανυσμάτων των μεταβλητών σχεδιασμού \mathbf{x} που ικανοποιούν τους περιορισμούς $\mathbf{e}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{X}_f = \{\mathbf{x} \in \mathbf{X} \mid \mathbf{e}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}\}$$

Η απεικόνιση του \mathbf{X}_f , δηλαδή το σύνολο των επιτρεπτών λύσεων ορίζεται ως:

$$\mathbf{Y}_f = \mathbf{f}(\mathbf{X}_f) = U_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f} \{\mathbf{f}(\mathbf{x})\}$$



Σχήμα 2.1: Σχέση μεταξύ του χώρου των λύσεων των μεταβλητών σχεδιασμού και του χώρου των λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων

Στην μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση το σύνολο των επιτρεπτών λύσεων είναι διατεταγμένο σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση f . Για δύο λύσεις $a, b \in X_f$ είναι είτε $f(a) \geq f(b)$, είτε $f(b) \geq f(a)$. Ο στόχος είναι να βρεθεί η λύση ή οι λύσεις που μεγιστοποιούν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f (Cohon, 1985).

Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση η κατάσταση αλλάζει: το X_f δεν διατάσσεται συνολικά αλλά μερικά (Pareto, 1896). Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2 για ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.

Σπανίως στα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στο σύνολο των διανυσμάτων των μεταβλητών σχεδιασμού X_f που (ταυτόχρονα) να μεγιστοποιεί (ή ελαχιστοποιεί) όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Για το λόγο αυτό, σε τέτοιου είδους προβλήματα δεν αναζητούμε ένα μοναδικό σημείο αλλά ένα σύνολο από «συμβιβασμένα» σημεία. Επομένως, η ιδέα της βέλτιστης λύσης είναι διαφορετική στα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης από ότι στα προβλήματα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ο ορισμός της ιδέας αυτής, αρχικά εκφράστηκε από τον Francis Ysidro Edgeworth και αργότερα γενικεύτηκε από τον Vilfredo Pareto (Κουμούσης, 2012).

2.3.2 Pareto βέλτιστο μέτωπο

Λέμε ότι ένα διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}_f$ είναι Pareto βέλτιστο αν δεν υφίσταται άλλο διάνυσμα $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f$ τέτοιο ώστε $f_i(\mathbf{x}) \geq f_i(\mathbf{x}^*)$ για όλα τα $i = 1, 2, \dots, k$ και $f_j(\mathbf{x}) > f_j(\mathbf{x}^*)$ για τουλάχιστον ένα j .

Με άλλα λόγια, ο ορισμός αυτός λέει ότι το διάνυσμα \mathbf{x}^* είναι βέλτιστο κατά Pareto αν δεν υπάρχει άλλο εφικτό διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f$ τέτοιο ώστε να αυξάνει τη τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς παράλληλα να μειώνει τη τιμή μίας άλλης αντικειμενικής συνάρτησης. Ωστόσο, η ιδέα του Pareto σχεδόν πάντα δεν δίνει μία μοναδική λύση στο πρόβλημα, αλλά ένα σύνολο λύσεων γνωστό ως Pareto βέλτιστο σύνολο. Τα διανύσματα \mathbf{x}^* που ανήκουν στο Pareto βέλτιστο σύνολο δεν κυριαρχούνται από κανένα άλλο διάνυσμα $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f$.

Στο Σχήμα 2.2 τα κόκκινα σημεία αντιπροσωπεύουν τις βέλτιστες λύσεις κατά Pareto, οι οποίες είναι άσχετες μεταξύ τους και καμία από αυτές δε μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη από τις άλλες. Το σύνολο αυτών των λύσεων καλείται Pareto βέλτιστο μέτωπο ή επιφάνεια (Pareto optimal front or surface) (Goldberg, 1989).

Στόχος της βελτιστοποίησης στο παράδειγμα του Σχήματος 2.2 είναι η ελαχιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων f_1 και f_2 . Το σύνολο των λύσεων A, B, C και D αποτελεί το μέτωπο Pareto. Πρόκειται δηλαδή για σημεία, που ως προς το A, παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση για ένα κριτήριο και χειρότερη για ένα άλλο (αδιάφορα ως προς το A), αλλά δεν ανήκουν στις περιοχές αδιάφορων λύσεων καθότι κάτω από αυτά δεν υπάρχουν άλλα σημεία με ικανοποιητικότερη επίδοση, που να δίνουν δηλαδή μέτρα επίδοσης μικρότερα για τις δύο συναρτήσεις (κριτήρια) σε σχέση με το A ($f_A > f$). Το σύνολο των εν λόγω σημείων ονομάζεται σύνολο μη κυριαρχούμενων (non-dominated) ή μη κατώτερων (non-inferior) σημείων, και είναι γνωστό ως σύνολο Pareto βέλτιστων σημείων (Pareto set) αποτελώντας προφανώς ένα υποσύνολο του πεδίου ορισμού της συνάρτησης. Τα σημεία του συνόλου Pareto είναι αδιάφορα μεταξύ τους, ενώ κάθε ένα από αυτά είτε κυριαρχεί, είτε είναι αδιάφορο ως προς κάθε άλλο σημείο του εφικτού χώρου αναζήτησης.

Η υποπεριοχή πάνω δεξιά από το σημείο A (πράσινο χρώμα) περιλαμβάνει λύσεις που κυριαρχούνται από την επιλογή αναφοράς (λύση A) δηλαδή παρουσιάζουν χειρότερα (μεγαλύτερα) μέτρα επίδοσης για τα δύο κριτήρια από τη λύση A. Επιπλέον, οι λύσεις πάνω αριστερά και κάτω δεξιά (μωβ χρώμα) χαρακτηρίζονται ως αδιάφορες ως προς τη λύση A, καθώς οι λύσεις αυτές είναι μεν καλύτερες από την A για ένα κριτήριο, αλλά χειρότερες ως προς το άλλο. Στην περίπτωση που προκύπτουν λύσεις πάνω στις γραμμές του πράσινου τετραγώνου που τέμνονται με το A, η εκάστοτε λύση είναι χειρότερη από την A για το ένα μόνο κριτήριο και ίση ως προς το άλλο και τότε λέγεται ότι η λύση A κυριαρχεί ασθενώς ως προς τη λύση αυτή.



Σχήμα 2.2: Γραφική απεικόνιση για 2 αντικειμενικές συναρτήσεις του βέλτιστου μετώπου Pareto και της σχέσης των λύσεων στον χώρο των λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Η έννοια της κυριαρχίας επιτρέπει τον χαρακτηρισμό ορισμένων λύσεων ως βέλτιστων, σύμφωνα με τους ακόλουθους ορισμούς:

«Ένα εφικτό σημείο x^* στο χώρο αναζήτησης είναι βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει κανένα άλλο εφικτό σημείο x , τέτοιο ώστε $f(x) \leq f(x^*)$, δηλαδή δεν υπάρχει εφικτό σημείο που κυριαρχεί επ' αυτού» ή

«Το σημείο x^* είναι βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει εφικτό σημείο x το οποίο να μπορεί να βελτιώσει το ένα κριτήριο f_1 , χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει το άλλο κριτήριο f_2 » (Ευστρατιάδης, 2008).

Στην πολυκριτηριακή λοιπόν βελτιστοποίηση σκοπός είναι ο εντοπισμός ενός αντιπροσωπευτικού αριθμού μη κατώτερων λύσεων με βάση τις οποίες είναι δυνατή μια προσεγγιστική χάραξη του μετώπου Pareto και ειδικότερα στην περίπτωση ελαχιστοποίησης στην οποία αναφερόμαστε, το μέτωπο αυτό είναι επιθυμητό να βρίσκεται όσο το δυνατόν εγγύτερα στην αρχή των αξόνων, να προσεγγίζει δηλαδή το ολικό μέτωπο Pareto, που περιλαμβάνει το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων του πεδίου τιμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι για να επιτευχθεί η προσέγγιση του ολικού μετώπου Pareto, θα πρέπει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να έχει τέτοια χαρακτηριστικά και να του δίνεται ο απαραίτητος χρόνος, ώστε να

μην αφήνει ανεξερεύνητες περιοχές του χώρου αναζήτησης και συνεπώς να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά μέτωπα Pareto, που ορίζονται σε αντιστοιχία με τα τοπικά ακρότατα των μονοκριτηριακών προβλημάτων (Παναγόπουλος, 2011).

2.3.3 Κλασικές Μέθοδοι για επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης

Οι κλασικές μέθοδοι για τη δημιουργία του Pareto βέλτιστου συνόλου συγχωνεύουν τις αντικειμενικές συναρτήσεις σε μία παραμετρική αντικειμενική συνάρτηση με εισαγωγή ενός πλήθους παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτής της συνάρτησης καθορίζονται αρχικά και δεν μπορούν να τροποποιηθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Για να δημιουργηθεί το Pareto βέλτιστο σύνολο χρειάζονται διάφορες επιλύσεις με διαφορετικές παραμέτρους.

- Οι συναρτήσεις συναθροίσεως (Aggregating Functions) και η μέθοδος των συντελεστών βαρύτητας (Weighting Method)

Το αρχικό πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (MOP) μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης (SOP), σχετίζοντας γραμμικά ή μη γραμμικά τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας προσέγγισης αποτελεί η μέθοδος των συντελεστών βαρύτητας, όπου η νέα ενιαία αντικειμενική συνάρτηση είναι ένα γραμμικό άθροισμα του συνόλου των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η μαθηματική έκφραση της παραπάνω μεθόδου είναι η ακόλουθη:

$$\max \mathbf{y} = f(\mathbf{x}) = w_1 f_1(\mathbf{x}) + w_2 f_2(\mathbf{x}) + \dots + w_k f_k(\mathbf{x})$$

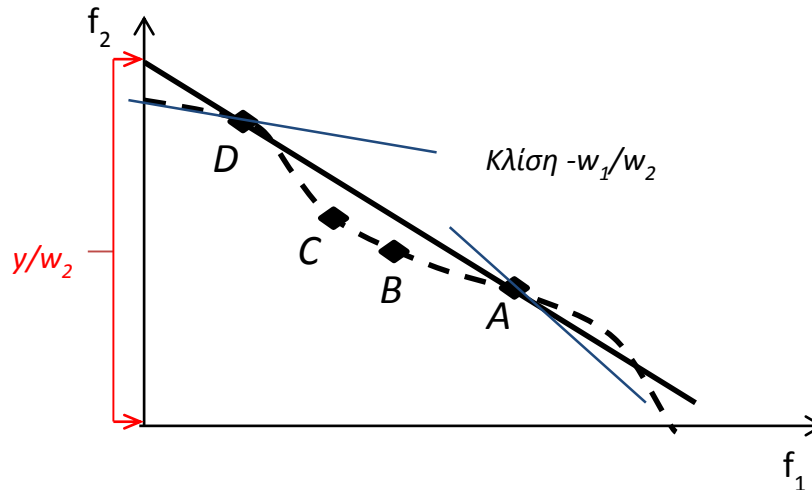
όπου $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f$

Τα w_i καλούνται συντελεστές βαρύτητας και ισχύει $\sum w_i = 1$.

Επιλύοντας το παραπάνω πρόβλημα με διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας προκύπτει το Pareto βέλτιστο σύνολο. Επειδή οι συντελεστές βαρύτητας είναι θετικοί, τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής (Pareto βέλτιστες λύσεις) είναι εύκολο να απεικονιστούν.

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου των συντελεστών βαρύτητας είναι ότι δεν μπορεί να παράγει όλες τις Pareto βέλτιστες λύσεις σε όλες τις μη κυρτές επιφάνειες ανεξαρτήτως των συνδυασμών συντελεστών βαρύτητας που θα χρησιμοποιηθούν. Για καθορισμένα βάρη w_1, w_2 η λύση \mathbf{x} μεγιστοποιεί την $\mathbf{y} = w_1 f_1(\mathbf{x}) + w_2 f_2(\mathbf{x})$, η οποία γράφεται και ως

$f_2(x) = -\frac{w_1}{w_2} f_1(x) + \frac{y}{w_2}$. Έτσι ορίζεται μια ευθεία με κλίση $-\frac{w_1}{w_2}$ στον αντικειμενικό χώρο των λύσεων και σταθερό όρο $\frac{y}{w_2}$ (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Γραφική απεικόνιση της μεθόδου των συντελεστών βαρύτητας

Γραφικά η βέλτιστη λύση θα προκύψει αν μετακινήσουμε την ευθεία αυτή προς τα πάνω, ώστε κανένα διάνυσμα της αντικειμενικής συνάρτησης να είναι πιο πάνω από αυτή, αλλά τουλάχιστον ένα να είναι πάνω της (στο παράδειγμα μας τα σημεία A και D). Τα σημεία B και C ποτέ δε θα μεγιστοποιήσουν την f . Αν αυξηθεί η κλίση, το σημείο D μεγιστοποιεί την f (πάνω μπλε γραμμή), ενώ αν μειωθεί η κλίση το σημείο A μεγιστοποιεί την f αφού δίνει μεγαλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση από ότι τα B, D (κάτω μπλε γραμμή).

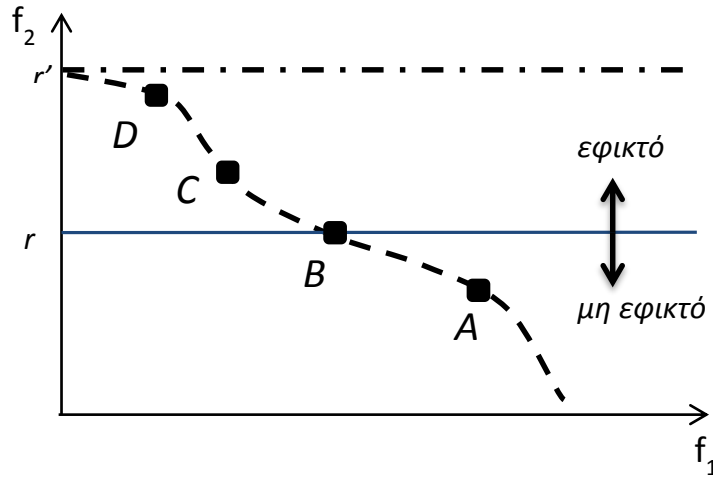
Αξίζει να σημειώσουμε ότι στη περίπτωση που οι αρχικές αντικειμενικές συναρτήσεις συσχετιστούν μη γραμμικά το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί. Παρόλα αυτά, οι ερευνητές που ασχολούνται με την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση δείχνουν περιορισμένο ενδιαφέρον όσον αφορά τη κατασκευή αλγορίθμων που επιλύουν τα προβλήματά τους με χρήση συναρτήσεων συναθροίσεως. Για το λόγο αυτό οι μέθοδοι αυτοί δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς (Zitzler, 1999).

- Η μέθοδος των περιορισμών (Constraint Method)

Σύμφωνα με τη μέθοδο των περιορισμών για την εύρεση του Pareto βέλτιστου συνόλου $k-1$ αντικειμενικές συναρτήσεις (από k συνολικά) μετατρέπονται σε περιορισμούς. Η εναπομένουσα αντικειμενική συνάρτηση, η οποία μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα, είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης (SOP) (Deb, 2001):

$$\begin{aligned} \max \quad & y = f(x) = f_h(x) \\ \text{με περιορισμούς} \quad & e_i(x) = f_i(x) \geq \varepsilon_i, \quad (1 \leq i \leq k, i \neq h) \\ & x \in X_f \end{aligned}$$

Το κατώτερο όριο ε_i είναι η παράμετρος που ορίζεται διαφορετικά σε κάθε επίλυση έτσι ώστε να βρεθούν οι Pareto βέλτιστες λύσεις.



Σχήμα 2.4: Γραφική απεικόνιση της μεθόδου των περιορισμών

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, η μέθοδος των περιορισμών μπορεί να βρει λύσεις που συνδέονται με μη κυρτά τμήματα της καμπύλης. Θέτοντας $h = 1$ και $2\varepsilon = r$ (μπλε γραμμή) κάνει τη λύση, που αντιπροσωπεύεται από το A μη επιτρεπτή λόγω των περιορισμών, ενώ η λύση που αντιπροσωπεύεται από το B μεγιστοποιεί την f σε σχέση με όλες τις άλλες λύσεις.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αν το κατώτατο όριο δεν επιλεγεί επιτυχώς ($2\varepsilon = r'$), το σύνολο των επιτρεπτών λύσεων θα είναι κενό και δεν θα υπάρχει λύση του προβλήματος της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Για να αποφευχθεί το παραπάνω θα πρέπει ένα εύρος τιμών για το ε_i να είναι γνωστό από πριν.

Αυτό που καθιστά τις κλασικές μεθόδους βελτιστοποίησης ελκυστικές και δημοφιλείς είναι η αξιοπιστία τους. Ωστόσο, σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα οι αλγόριθμοι μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης δεν εφαρμόζονται εύκολα. Οι μέθοδοι των συντελεστών βαρύτητας και περιορισμών δείχνουν ότι οι κλασικές μέθοδοι συνοδεύονται από προβλήματα όπως (Zitzler, 1999):

- Η μέθοδος των συντελεστών βαρύτητας είναι ευαίσθητη στο σχήμα του Pareto βέλτιστου μετώπου (Pareto optimal front).

- Χρειάζεται να γνωρίζουμε κάποια στοιχεία για το πρόβλημα πριν την επίλυση, που μπορεί να μην είναι διαθέσιμα.
- Οι κλασικές μέθοδοι απαιτούν αρκετές δοκιμές βελτιστοποίησης, ώστε να προκύψει μία εκτίμηση του Pareto μετώπου. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, οι οποίες εκτελούνται ανεξάρτητα, μπορεί να προκύψουν προβλήματα με αποτέλεσμα μεγαλύτερο υπολογιστικό φόρτο.

Πρόσφατα, οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms) καθώς και οι αλγόριθμοι Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence Algorithms) έχουν αποτελέσει μια εναλλακτική προσέγγιση σε προβλήματα βελτιστοποίησης και έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μπορούν να χειριστούν μεγάλους χώρους αναζήτησης λύσεων.
- Πολλές εναλλακτικές λύσεις μπορούν να αναπαραχθούν σε ένα βήμα επίλυσης.

2.4 Γενετικοί Αλγόριθμοι

2.4.1 Εισαγωγή

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν την πλέον δημοφιλή τεχνική βελτιστοποίησης στην κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων και βασίζονται στους μηχανισμούς της γενετικής και της εξέλιξης που παρατηρείται στους ζωντανούς οργανισμούς. Η κύρια ιδέα ενός γενετικού αλγορίθμου είναι η διατήρηση ενός πληθυσμού λύσεων και η εξέλιξή του με την πάροδο του χρόνου, όπου και δημιουργούνται νέοι πληθυσμοί. Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζεται μία αντιστοιχία στους όρους που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των βιολογικών προτύπων και των διαδικασιών των γενετικών αλγορίθμων.

Πίνακας 2-1: Βιολογικό πρότυπο και γενετικοί αλγόριθμοι (πηγή: Γεωργιλάκης, 2004)

ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ	ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ
Γονίδιο	Παράμετρος
Χρωμόσωμα	Υποψήφια λύση
Πληθυσμός	Σύνολο υποψήφιας λύσεων
Πιθανότητα επιβίωσης	Συνάρτηση βελτιστοποίησης
Μετάλλαξη	Τυχαία αναζήτηση λύσης
Διασταύρωση	Σύνθεση λύσεων

Γενιά	Ανακύκλωση
-------	------------

Την τελευταία δεκαετία, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως εργαλείο αναζήτησης και βελτιστοποίησης σε ποικίλα προβλήματα, τόσο στον τομέα των θετικών επιστημών, όσο και στο εμπόριο και στη μηχανική. Οι κυριότεροι λόγοι της μεγάλης επιτυχίας τους, είναι η ευρεία εφαρμοστικότητα τους, η ευκολία στη χρήση τους και η δυνατότητα περιεκτικής προοπτικής και απεικόνισης που διαθέτουν.

Η ιδέα των γενετικών αλγορίθμων συνελήφθη πρώτα από τον John Holland του πανεπιστημίου του Μίσιγκαν, στις αρχές της δεκαετίας του 70. Η εξελικτική θεωρία που ανέπτυξε ο Δαρβίνος, καθώς και οι μηχανισμοί της φυσικής επιλογής που εφαρμόζονται σε όλα τα είδη της φύσης, φάνηκαν ιδιαίτερα ελκυστικές στον John Holland, ο οποίος φαντάστηκε πως παρόμοιες τεχνικές θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε αλγόριθμους για υπολογιστές, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων.

Η εξέλιξη, που ακολούθησε τις τελευταίες δεκαετίες είναι ραγδαία και σήμερα οι ΓΑ θεωρούνται πιο εύρωστοι από τις υπάρχουσες μεθόδους άμεσης αναζήτησης αφού είναι σε θέση να συνδυάζουν στοιχεία και από άμεσες και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης (Nicklow et al., 2009). Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι η ταχύτητα και αξιοπιστία αναζήτησης μιας και διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Οι ΓΑ έχουν τη δυνατότητα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα, να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους (Michalewicz, 1996) , ενώ δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Οι ποσότητες πληροφορίας που επεξεργάζονται σε κάθε τους βήμα είναι δε μεγάλες αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Είναι λοιπόν προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο τη φυσικής Γενετικής. Έτσι, έχουμε έναν αρχικό *πληθυσμό*, ο οποίος αποτελεί τον αρχικό χώρο αναζήτησης. Τα μέλη αυτού του πληθυσμού ονομάζονται *άτομα* ή *γονότυπα*. Αρκετά συχνά, τα άτομα αυτά ονομάζονται επίσης *χρωμοσώματα*. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από διάφορα στοιχεία που ονομάζονται *γονίδια* ή *μεταβλητές απόφασης* και είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των χρωμοσωμάτων των απογόνων που προκύπτουν, με βάση τον αρχικό πληθυσμό. Κάθε γονότυπος (που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένα

μόνο χρωμόσωμα) αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Η διαδικασία διαμόρφωσης του γονότυπου ενός ατόμου συναρτήσσει των χαρακτηριστικών του καλείται *κωδικοποίηση* (encoding), ενώ η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών με βάση τον γονότυπο καλείται *αποκωδικοποίηση* (decoding). Η τελευταία παράγει το *φαινότυπο* (phenotype), που περιλαμβάνει το σύνολο των ορατών χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς του ατόμου, δηλαδή τη περιγραφή των εξωτερικών χαρακτηριστικών του (Goldberg, 1989).

Κυρίαρχες λειτουργίες του φαινομένου της εξέλιξης στη φύση και οι οποίες περιέχονται σε έναν ΓΑ, είναι η πραγματοποίησή της σε στάδια που καλούνται *γενιές* (generations) και παράγονται με *αναπαραγωγή* (reproduction). Προϊόν της αναπαραγωγής, που γίνεται με *επιλογή* (selection), *διασταύρωση* (crossover) και *μετάλλαξη* (mutation) είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται από τους γονείς. Τα γονίδια που τελικά καθορίζουν το χαρακτηριστικό λέγονται *κυρίαρχα* (dominant) και τα άλλα *υπολειπόμενα* (recessive). Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου έχει την δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα, που είναι δηλαδή υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό και αποτελούν τις διαφορετικές καταστάσεις, που μπορεί να πάρει το γονίδιο λέγονται *αλληλόμορφα* (alleles). Κάθε μέλος της νέας γενιάς, δηλαδή κάθε νέα λύση που εντάσσεται στον πληθυσμό, ονομάζεται *απόγονος* (offspring), ενώ τα άτομα με βάση τα οποία έχει παραχθεί η λύση αυτή ονομάζονται *γονείς* (parents).

Κατά τις δύο πρώτες φάσεις της αναπαραγωγής επιλέγονται οι γονείς και ο τρόπος που θα διασταυρωθούν για την παραγωγή ενός απογόνου. Κατά την τρίτη φάση, τη φάση της μετάλλαξης, συμβαίνει με τυχαίο τρόπο μία αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων ενός οργανισμού. Η φάση αυτή αντιπροσωπεύει μια φυσική λειτουργία που γίνεται συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες, έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό που μερικές φορές, μπορεί να προκαλέσει βελτιώσεις. Τέλος, για τη δημιουργία της επόμενης γενιάς στους σύγχρονους αλγόριθμους τα πιο ισχυρά άτομα δεν υπόκεινται σε καμία μεταβολή δηλαδή σε καμία από τις ανωτέρω φάσεις, ώστε ο νέος πληθυσμός να αποκλείει με απόλυτη βεβαιότητα την πιθανότητα να είναι χειρότερος από τον προηγούμενο (Λυκοθανάσης, 2001).

2.4.2 Δομή και υπολογιστική διαδικασία Γενετικών Αλγόριθμων

Η λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με έναν ΓΑ περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά βήματα (Michalewicz, 1996):

- Γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος (κωδικοποίηση).
- Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων (αρχικοποίηση).
- Αξιολόγηση λύσεων μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης, που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος, κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητά τους μετά από αποκωδικοποίηση (αξιολόγηση).
- Χρήση γενετικών τελεστών (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη) που μετατρέπουν τη σύνθεση των απογόνων (αναπαραγωγή).
- Απόδοση τιμών σε διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο ΓΑ (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κ.λπ.) και ορισμός του κριτηρίου τερματισμού της υπολογιστικής διαδικασίας.

ΓΕΝΕΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ – ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Ο γενετικός αλγόριθμος αρχίζει με την επιλογή της κατάλληλης κωδικοποίησης που θα έχουν τόσο τα μέλη του αρχικού πληθυσμού όσο και το σύνολο των πιθανών λύσεων του εκάστοτε προβλήματος. Η αναπαράσταση των λύσεων πρέπει να γίνει με ένα μαθηματικό, φορμαλιστικό τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία από τον υπολογιστή. Εξάλλου, κωδικοποίηση υπάρχει και στο φυσικό μοντέλο (χρωμοσώματα) και μάλιστα όλες οι αλλαγές που παρατηρούνται στους οργανισμούς γίνονται πάνω στα κωδικοποιημένα χαρακτηριστικά των χρωμοσωμάτων. Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι να αναπαριστά με ικανοποιητικό τρόπο τα επιμέρους χαρακτηριστικά των λύσεων, ώστε να διευκολύνει τις επόμενες λειτουργίες του αλγορίθμου (κυρίως την επιλογή).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα είδη της κωδικοποίησης, που μπορούν να γίνουν από πρόβλημα σε πρόβλημα, είναι ποικίλα. Η πιο απλή είναι η κωδικοποίηση με δυαδικά ψηφία (bits): κάθε λύση αναπαρίσταται από μια δυαδική συμβολοσειρά (binary string) καθορισμένου μήκους. Πάντως, έχουν αναφερθεί ποικίλες μορφές κωδικοποιήσεων, που καθεμία εξαρτάται από το υπό εξέταση πρόβλημα. Η κυριότερη από αυτές είναι η κωδικοποίηση, στην οποία οι λύσεις αναπαρίστανται από συμβολοσειρά πραγματικών αριθμών. Πάντως καμιά δεν είναι αποτελεσματική για όλα τα προβλήματα, ενώ είναι πιθανό ένα πρόβλημα να επιδέχεται περισσότερες από μια κωδικοποιήσεις (Κωνσταντινίδης, 2009).

ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Η αρχικοποίηση είναι το βήμα στο οποίο ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός, πάνω στον οποίο θα λάβουν χώρα οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός διαλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, ενώ το μέγεθός του ορίζεται από το

χρήστη και εξαρτάται από τα χρονικά περιθώρια που έχει στη διάθεσή του. Ο αρχικός πληθυσμός περιλαμβάνει συγκεκριμένο αριθμό ατόμων ή χρωμοσωμάτων τα οποία διαφέρουν ως προς το γονότυπο. Μέσα σε έναν αρχικό πληθυσμό είναι δυνατόν το ίδιο χρωμόσωμα να υπάρχει περισσότερες της μίας φορές. Ο καθορισμός του αρχικού πληθυσμού από το χρήστη είναι συνήθως προαιρετικός, δηλαδή μπορεί ο ίδιος ο αλγόριθμος να 'γεννήσει' αρχικό πληθυσμό σεβόμενος πάντα τους περιορισμούς που διέπουν τις καταστάσεις τις οποίες μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές (αλληλόμορφα). Η υπολογιστική διαδικασία πάντως σε έναν εύρωστο ΓΑ μετά από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων οδηγεί συνήθως σε αποτέλεσμα που εξαρτάται ελάχιστα από τον αρχικό πληθυσμό (Παναγόπουλος, 2011).

ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ

Το τρίτο βασικό στοιχείο σύνδεσης ενός γενετικού αλγορίθμου με το πρόβλημα που λύνει είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή παίρνει ως είσοδο μια αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά και επιστρέφει μια τιμή (συνήθως πραγματική), που είναι ανάλογη του πόσο καλά λύνει το πρόβλημα η συγκεκριμένη συμβολοσειρά. Η τιμή αυτή αποτελεί και τον καθοριστικό παράγοντα επιβίωσης και πολλαπλασιασμού ή όχι του ατόμου. Η αντικειμενική συνάρτηση παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στο τεχνικό μοντέλο. Ουσιαστικά, είναι η μόνη πληροφορία που δέχεται ο αλγόριθμος για το πρόβλημα που λύνει. Είναι σημαντικό αυτή η συνάρτηση να είναι εύκολα υπολογίσιμη, ώστε να μην επιβραδύνει τους ρυθμούς της διαδικασίας (Κωνσταντινίδης, 2009).

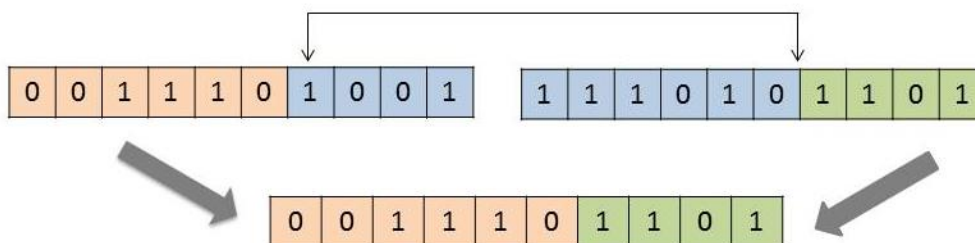
ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΤΕΛΕΣΤΕΣ

Η σημαντικότερη λειτουργία του ΓΑ είναι η αναπαραγωγή, κατά την οποία λαμβάνει χώρα ο κύριος όγκος της εργασίας του αλγορίθμου. Η δομή της αναπαραγωγικής διαδικασίας είναι σύνθετη και περιλαμβάνει την επιλογή, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη. Με την επιλογή, βρίσκει εφαρμογή στα πλαίσια του αλγορίθμου, ο νόμος της επιβίωσης του ικανότερου (survival of the fittest). Μέσω αυτής της διαδικασίας, καθορίζονται τα άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό τα οποία θα έχουν την ευκαιρία να λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και να κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Στόχος της λειτουργίας της επιλογής είναι να επιτρέπει εκθετική αύξηση των ικανότερων ατόμων και τελικά, μετά από αναπαραγωγή αρκετών γενιών, την επικράτησή τους (Παναγόπουλος, 2011).

Ο τελεστής αναπαραγωγής μπορεί να εκφραστεί σε αλγοριθμική βάση, με πολλούς τρόπους με τον πιο διαδεδομένο, αυτόν της εξαναγκασμένης ρουλέτας, στην οποία κάθε συμβολοσειρά ενός πληθυσμού αντιπροσωπεύεται σε ένα μέρος της ρουλέτας, σε αναλογία με την απόδοσή της. Η

διαδικασία της ρουλέτας ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ένα χρωμόσωμα χαμηλής απόδοσης να υπάρχει στην επόμενη γενιά αφού ελαχιστοποιείται το πλήθος αντιγράφων του (απογόνων) στη διαδικασία της επιλογής. Τα χρωμοσώματα που επιλέχθηκαν από αυτή τη διαδικασία αποθηκεύονται προσωρινά στη λεγόμενη *δεξαμενή ζευγαρώματος* (mating pool), όπου θα υποστούν περισσότερες γενετικές διαδικασίες (Goldberg, 1989).

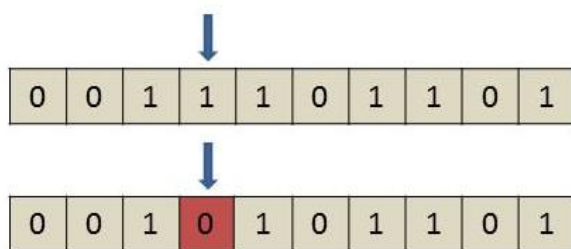
Στόχος της διασταύρωσης, που ακολουθεί, είναι η νέα γενιά που θα προκύψει μετά την εφαρμογή της να περιλαμβάνει άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους. Ένα ενδεικτικό της χρησιμότητας της διασταύρωσης είναι η ανακατεύθυνση της αναζήτησης σε νέες ανεξερεύνητες περιοχές του χώρου αναζήτησης. Έτσι, διευρύνεται το πεδίο δράσης του αλγόριθμου και αυξάνουν οι πιθανότητες επιτυχίας του, αφού τα ήδη αξιολογημένα χρωμοσώματα της δεξαμενής χρησιμοποιούνται για παραγωγή νέων προς αξιολόγηση. Τα νέα άτομα περιλαμβάνουν συνδυασμούς χαρακτηριστικών των γονέων τους και δεδομένου ότι οι γονείς ήταν τα πλέον ισχυρά άτομα, είναι πιθανότερο να προκύψουν επιτυχημένοι συνδυασμοί υψηλής ικανότητας. Η διασταύρωση λαμβάνει χώρα με πιθανότητα, τη λεγόμενη *πιθανότητα διασταύρωσης* (crossover probability), p_c , που καθορίζεται από το σχεδιαστή του ΓΑ. Συνήθως, αυτή η πιθανότητα ποικίλει από πρόβλημα σε πρόβλημα, ενώ είναι δυνατό και να αλλάζει κατά τον χρόνο τρεξίματος επηρεάζοντάς τον σε κάποιο βαθμό. Η τιμή $p_c=1$, σημαίνει συνεχή εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, άρα το ψάξιμο γίνεται με μικρό βήμα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η αναζήτηση να γίνει σε όλο το χώρο, άρα ο αλγόριθμος θα συγκλίνει στο βέλτιστο, αλλά πολύ αργά. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας μικρές τιμές της p_c το ψάξιμο κάνει άλματα, άρα ο αλγόριθμος είναι πιθανόν να συγκλίνει πιο γρήγορα. Χρησιμοποιώντας μεγάλο βήμα, υπάρχει ο κίνδυνος ο αλγόριθμος να ξεπεράσει το βέλτιστο και έτσι να αποκλίνει (Παναγόπουλος, 2011).



Σχήμα 2.5: Διασταύρωση γονέων σε δυαδικό πρόβλημα

Το υπόλοιπο μέρος του πληθυσμού που δεν λαμβάνει μέρος στη διασταύρωση ($1-p_c$), αντιγράφεται ως έχει στην επόμενη γενιά, όπου λαμβάνει χώρα η τελευταία φάση της αναπαραγωγικής διαδικασίας, η μετάλλαξη. Η μετάλλαξη δρα μεμονωμένα σε κάποια

χρωμοσώματα μεταβάλλοντας αυθαίρετα την κατάσταση ενός γονιδίου (αλληλόμορφο). Στη δυαδική αναπαράσταση αυτό σημαίνει ότι το 0 γίνεται 1 και το αντίστροφο, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη αναπαράσταση ότι η κατάσταση του γονιδίου μεταπίπτει σε κάποια άλλη δυνατή μορφή με βάση πάντα το πεδίο ορισμού της μεταβλητής. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει τυχαία με μικρή πιθανότητα, τη λεγόμενη *πιθανότητα μετάλλαξης* (mutation probability), p_m , η οποία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.1 – 1% ώστε να μην επιβραδύνεται η πορεία σύγκλισης. Στην περίπτωση δηλαδή που η συχνότητα αυτή είναι μεγάλη, υπάρχει ο κίνδυνος ο ΓΑ να εκφυλίζεται σε τυχαίο ψάξιμο. Το ποσοστό 1% δηλώνει ότι από τα 10 χρωμοσώματα του νέου πληθυσμού με μήκος π.χ. 10 γονιδίων, μόνο το 1 γονίδιο θα υποστεί μετάλλαξη (Παναγόπουλος, 2011).



Σχήμα 2.6: Μετάλλαξη στην τέταρτη θέση χρωμοσώματος δυαδικής αναπαράστασης

Ωστόσο, υπάρχει πάντα η περίπτωση, λόγω της τυχαιότητας της όλης πορείας, ούτε η διασταύρωση, ούτε η μετάλλαξη να δημιουργήσουν άτομο που θα βελτιώνει την αντικειμενική συνάρτηση και άρα θα δημιουργεί έναν πληθυσμό (σύνολο ατόμων) με καλύτερη επίδοση. Υπάρχουν δε περιπτώσεις που η επίδοση αυτή μπορεί να είναι και χειρότερη από την προηγούμενη. Για την άρση αυτού του μειονεκτήματος στην αναπαραγωγική διαδικασία, όλοι πλέον οι αλγόριθμοι νεότερης γενιάς ενσωματώνουν το στοιχείο του εκλεκτισμού ή ελιτισμού (elitism), που εισήγαγε ο De Jong (1975). Πρόκειται για μία απλή διαδικασία όπου το καλύτερο ή καλύτερα χρωμοσώματα από άποψη επίδοσης αποθηκεύονται στη μνήμη της διαδικασίας και συγκαταλέγονται χωρίς άλλο κριτήριο ή διαδικασία επιλογής στο νέο πληθυσμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να κινείται αυστηρά μονοτονικά προς το βέλτιστο χωρίς να κάνει ‘πισωγυρίσματα’ (Παναγόπουλος, 2011).

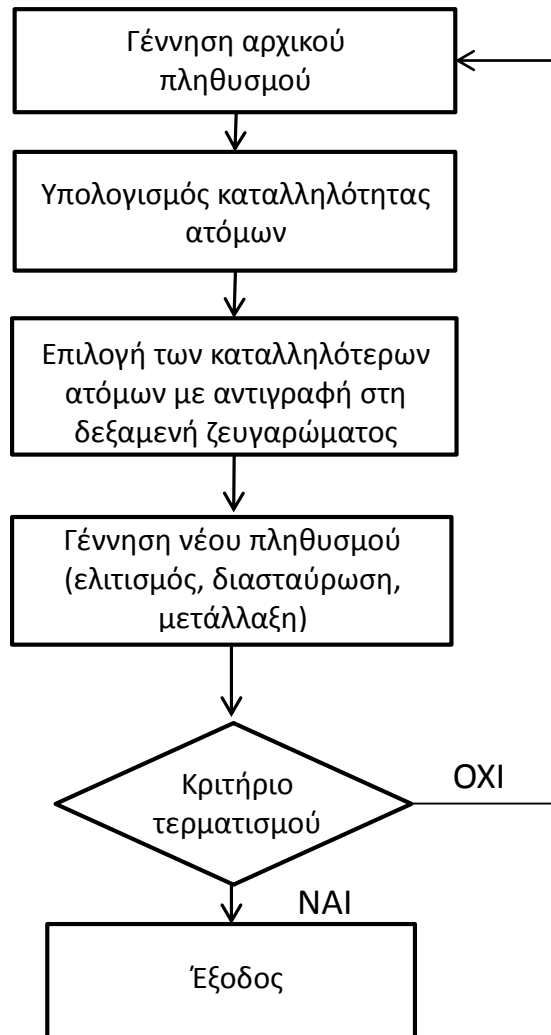
ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ – ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου, εκτός από τον προσδιορισμό των γενετικών τελεστών, περιλαμβάνει τον καθορισμό του μεγέθους του πληθυσμού και του κριτηρίου τερματισμού της αναζήτησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι μεγάλος

πληθυσμός συνεπάγεται μεγάλη ικανότητα αναζήτησης του εφικτού χώρου αλλά ταυτόχρονα μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποιος κανόνας που να συσχετίζει το μέγεθος του πληθυσμού με το κάθε πρόβλημα, αλλά γενικά ισχύει ότι ο πληθυσμός πρέπει να έχει μέγεθος αυστηρά μεγαλύτερο του αριθμού των μεταβλητών με μία τάση ο λόγος μεταξύ των δύο να μειώνεται όσο οι μεταβλητές πληθαίνουν.

Όσον αφορά το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αυτό μπορεί να είναι ένας συγκεκριμένος και μεγάλος αριθμός γενιών, ένα ανώτατο όριο που εκφράζει το ποσοστό βελτίωσης της αντικειμενικής συνάρτησης μετά από συγκεκριμένο αριθμό παραγωγής γενιών, ή ακόμα ένα ανώτατο όριο χρόνου, όπου δεν παρατηρείται η ελάχιστη επιθυμητή βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης. Επειδή σε μία διαδικασία αναζήτησης ο ΓΑ πολύ πιθανόν να κάνει κάποιο άλμα στη βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης μετά από αρκετό χρόνο, δηλαδή μετά από πολλές συνεχόμενες επαναλήψεις όπου δεν παρουσίαζε σημαντική πρόοδο, θεωρείται ότι το πιο εγγυημένο κριτήριο τερματισμού για την προσέγγιση της ολικά βέλτιστης λύσης/λύσεων είναι η δημιουργία ενός αρκετά μεγάλου αριθμού γενιών (Παναγόπουλος, 2011).

Μία σύνοψη της διαδικασίας των γενετικών αλγορίθμων, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



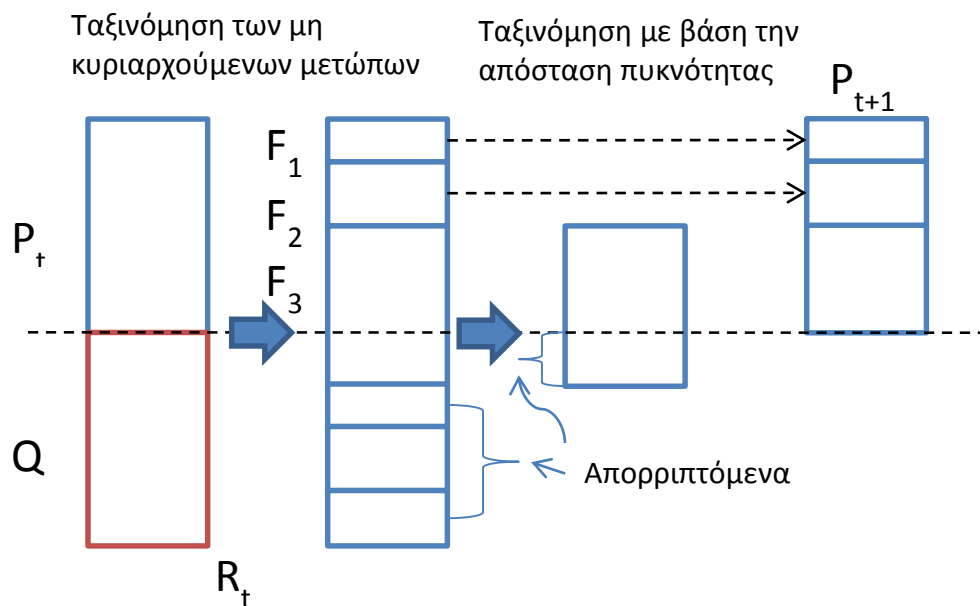
Σχήμα 2.7: Λογικό διάγραμμα ροής Γενετικού Αλγόριθμου

2.4.3 Ο ταχύς και εκλεκτικός Γενετικός Αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (NSGA-II)

Ο Kalyanmou Deb σε συνεργασία με τους μαθητές του ανέπτυξαν το 2000 έναν ελιτιστικό γενετικό αλγόριθμο, που βασίζεται στην Pareto-κυριαρχία, επονομαζόμενος και NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm). Ο αλγόριθμος αυτός δεν χρησιμοποιεί μόνο μία στρατηγική διατήρησης του ελίτ συνόλου, αλλά και ένα μηχανισμό διατήρησης της ποικιλομορφίας του πληθυσμού.

Αρχικά, δημιουργούμε τον αρχικό πληθυσμό P_t . Με βάση τον πληθυσμό αυτό, δημιουργείται ο πληθυσμός των απογόνων Q_t , με την εφαρμογή των γενετικών τελεστών. Ωστόσο, αντί να βρούμε τα μη-κυριαρχούμενα μέτωπα μόνο του Q_t , οι δύο πληθυσμοί συνδυάζονται προκειμένου να σχηματίσουν το σύνολο R_t με μέγεθος $2N$. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία ταξινόμηση με

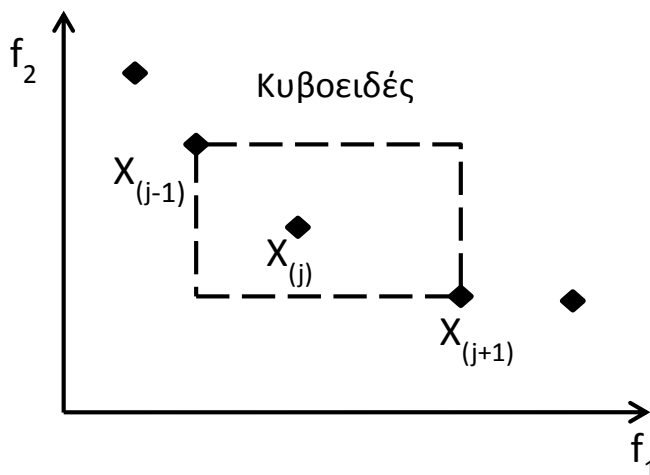
βάση την Pareto- κυριαρχία σε ολόκληρο τον πληθυσμό R_t . Η διαδικασία αυτή, αν και πιο επίπονη, μας επιτρέπει να ελέγξουμε όλα τα άτομα που έχουμε παράγει για την εύρεση των μη-κυριαρχούμενων μετώπων. Μόλις ολοκληρωθεί η ταξινόμηση, ο νέος πληθυσμός συμπληρώνεται από λύσεις διαφόρων μη- κυριαρχούμενων μετώπων. Η συμπλήρωση ξεκινά με τα άτομα του πρώτου μη-κυριαρχούμενου μετώπου, συνεχίζει με το δεύτερο και προχωράει μέχρι να συμπληρωθούν τα N άτομα του νέου πληθυσμού. Από τη στιγμή που το μέγεθος του R_t είναι $2N$, είναι αυτονόητο πως στο νέο πληθυσμό μεγέθους N , δεν θα συμπεριληφθούν όλα τα μέτωπα των λύσεων. Τα μέτωπα που δεν θα συμπεριληφθούν διαγράφονται. Επίσης, είναι δυνατόν να μη συμπεριληφθούν όλα τα μέλη του τελευταίου μετώπου λύσεων, που λαμβάνεται υπόψη κατά τη συμπλήρωση του νέου πληθυσμού. Αντί να απορριφθούν τυχαία κάποια μέλη του τελευταίου αυτού μετώπου, ακολουθείται μία στρατηγική υποπληθυσμών (niching strategy) και επιλέγονται εκείνα τα μέλη, που βρίσκονται στις λιγότερο πυκνές περιοχές του. Η στρατηγική αυτή, διασφαλίζει πως από τον πληθυσμό αυτόν, θα επιλεγεί ένα ποικιλόμορφο σύνολο και με αυτόν τον τρόπο, όταν ολόκληρος ο πληθυσμός τείνει να συγκλίνει προς το Pareto-βέλτιστο μέτωπο, η εξέλιξη του αλγόριθμου θα διασφαλίσει μία καλύτερη κατανομή των λύσεων (Deb et al., 2002).



Σχήμα 2.8: Γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας του αλγορίθμου NSGA-II (πηγή: Deb et al., 2002).

Η αξιολόγηση των λύσεων ως προς τη θέση τους πάνω στο μέτωπο Pareto γίνεται με τη χρήση ενός μέτρου σύγκρισης (d_i), τη λεγόμενη απόσταση συνωστισμού (crowding distance). Αυτό

σημαίνει ότι στην περίπτωση που οι δύο λύσεις είναι αδιάφορες, (ανήκουν στο ίδιο μέτωπο) επιλέγεται η λύση με μεγαλύτερη τιμή στο μέτρο αυτό, η λύση δηλαδή η οποία βρίσκεται σε λιγότερο γνωστή περιοχή του Pareto μετώπου. Πρόκειται για μία εκτίμηση της περιμέτρου του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου που σχηματίζεται, χρησιμοποιώντας τις γειτονικότερες λύσεις ως κορυφές. Στο Σχήμα 2.9 η απόσταση πυκνότητας της i -οστής λύσης εντός του μετώπου κυριαρχίας στο οποίο ανήκει (που σημειώνεται με τις μαύρες τελείες) ισούται με το μέσο πλευρικό μήκος του ορθογωνίου (που διαγράφεται από τις διακεκομμένες γραμμές). Η απόσταση συνωστισμού δηλαδή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγαλύτερου κυβοειδούς το οποίο περικλείει μόνο την υπό εξέταση λύση ορίζοντας ουσιαστικά το άθροισμα των διαφορών στις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων όλων των κριτηρίων μεταξύ δύο γειτονικών λύσεων. Σημειώνεται ότι το μέγεθος αυτό, αν και συνηθίζεται να μετράται στο φαινοτυπικό πεδίο, μπορεί να μετρηθεί και στο πεδίο τιμών. Στις λύσεις δε οι οποίες αποτελούν οριακές τιμές (π.χ. 0 και 1) ανατίθεται πολύ μεγάλη (άπειρη) απόσταση συνωστισμού ώστε να διατηρηθούν στο μέτωπο (Deb et al., 2002).



Σχήμα 2.9: Η απόσταση συνωστισμού στον Γενετικό Αλγόριθμο NSGA-II.

Δύο πιθανές λύσεις i και j συγκρίνονται στον αλγόριθμο NSGA-II με βάση τα δύο κριτήρια, της κυριαρχίας (r) και της απόστασης συνωστισμού (d) μέσα στον πληθυσμό. Εάν η λύση i έχει καλύτερη διάταξη, δηλαδή ανήκει σε χαμηλότερο επίπεδο μη κυριαρχίας, $r_i < r_j$, επιλέγεται. Διαφορετικά, η λύση i επιλέγεται εάν οι δύο λύσεις έχουν την ίδια διάταξη κυριαρχίας, αλλά η λύση i έχει καλύτερη τιμή απόστασης συνωστισμού από τη λύση j , δηλαδή $r_i = r_j$ και $d_i > d_j$. Η πρώτη συνθήκη διασφαλίζει πως οι επιλεγμένες λύσεις βρίσκονται σε καλύτερο μη κυριαρχούμενο μέτωπο και η δεύτερη ότι χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική διασπορά (spread) (Deb et al., 2002).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Δίκτυα Ύδρευσης

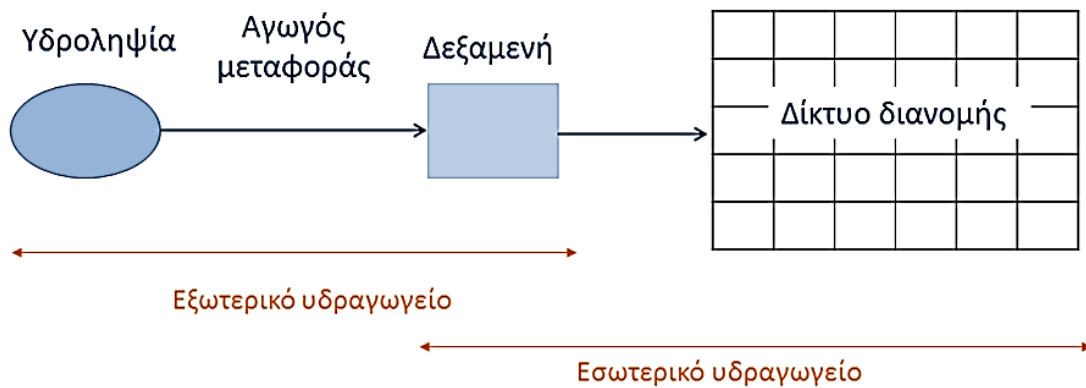
3.1 Θεωρητική προσέγγιση

Κάθε δίκτυο ύδρευσης αποτελεί ένα σύστημα αγωγών υπό πίεση, που παραλαμβάνει νερό από ολιγάριθμες πηγές (σημεία εισόδου) και το οδηγεί προς πολλαπλά σημεία προορισμού (σημεία εξόδου ή καταναλωτές). Ουσιαστικά διανέμει το επεξεργασμένο (καθαρό) νερό από τις δεξαμενές σε πολλαπλά σημεία προορισμού (καταναλωτές) μιας αστικής περιοχής (Κουτσογιάννης & Ευστρατιάδης 2015).

3.1.1 Δομή δικτύων ύδρευσης

Κάθε δίκτυο ύδρευσης αποτελείται από δύο ξεχωριστά μέρη:

1. Το εξωτερικό υδραγωγείο
2. Το εσωτερικό υδραγωγείο



Σχήμα 3.1: Διάταξη δικτύων ύδρευσης

Εξωτερικό υδραγωγείο

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

- ανοιχτούς αγωγούς βαρύτητας

- κλειστούς αγωγούς υπό πίεση, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε βαρύτητας είτε καταθλιπτικοί αγωγοί, δηλαδή να υποβοηθούνται από σύστημα άντλησης.
- κλειστούς αγωγούς, που λειτουργούν σαν αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια.

Εσωτερικό υδραγωγείο

Το εσωτερικό υδραγωγείο είναι το σύστημα διανομής νερού και περιλαμβάνει το άθροισμα των αγωγών που μεταφέρουν το νερό από τη δεξαμενή αποθήκευσης σε κάθε σημείο της υδροδοτημένης περιοχής. Εκτός από το δίκτυο αγωγών περιλαμβάνει και όλα τα υπόλοιπα έργα διανομής κατόπιν της δεξαμενής αποθήκευσης του νερού, όπως τις αντλίες, τις δικλείδες, τους ρυθμιστές πίεσης κ.τ.λ.. Οι δύο βασικές απαιτήσεις για το εσωτερικό υδραγωγείο είναι οι εξής:

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

Όσον αφορά τη δεξαμενή ρύθμισης ή αποθήκευσης είναι αυτή που οριοθετεί τα τμήματα του υδραγωγείου και για την διαστασιολόγησή της απαιτούνται πληροφορίες τόσο από το εξωτερικό όσο και από το εσωτερικό υδραγωγείο. Συνήθως, η δεξαμενή ρύθμισης έχει 24ωρη βάση λειτουργίας και ρυθμίζει τη σταθερή εισροή από τον αγωγό μεταφοράς νερού από την υδροληψία, ώστε να ανταποκρίνεται στην κυμαινόμενη, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατανάλωσης, εκροή προς το δίκτυο διανομής και ικανοποιεί τις εξής λειτουργίες:

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

Έτσι η παροχή σχεδιασμού για το εξωτερικό υδραγωγείο είναι η μέγιστη ημερήσια, ενώ η παροχή σχεδιασμού για το εσωτερικό υδραγωγείο είναι η μέγιστη ωριαία. Προφανώς η δεξαμενή ρύθμισης θα πρέπει μέσα στο εικοσιτετράωρο (αν η δεξαμενή ρύθμισης έχει εικοσιτετράωρη βάση λειτουργίας) να έχει τέτοιο όγκο (όγκος ρυθμίσεως) ώστε να μπορεί να αποδώσει τις παροχές αιχμής για τον οικισμό για σταθερή εισροή από το εξωτερικό υδραγωγείο (Κουτσογιάννης & Ευστρατιάδης 2015)

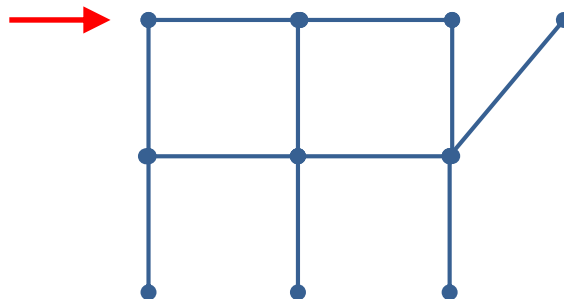
3.1.2 Είδη δικτύων ύδρευσης

Τα δίκτυα ύδρευσης, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο έχουν τοποθετηθεί οι αγωγοί τους, χωρίζονται σε ακτινωτά και βροχωτά ή κλειστά δίκτυα ύδρευσης.

Ακτινωτά δίκτυα ύδρευσης

Ακτινωτά δίκτυα ύδρευσης είναι τα δίκτυα τα οποία υδροδοτούνται από ένα μοναδικό σημείο (κεφαλή), στο οποίο δεν σχηματίζονται κλειστές διαδρομές αγωγών (βρόχοι). Κάθε σημείο εξόδου τροφοδοτείται μέσω μιας μοναδικής διαδρομής. Ουσιαστικά είναι τα δίκτυα στα οποία υπάρχει ένας κεντρικός αγωγός μεταφοράς και δευτερεύοντες αγωγοί ή τριτεύοντες που καταλήγουν στον κεντρικό αγωγό. Σε καμία περίπτωση δε σχηματίζεται βρόχος.

Το βασικό πλεονεκτήματα από τη χρήση ακτινωτών δικτύων ύδρευσης είναι η ελαχιστοποίηση του μήκους του δικτύου, και συνεπώς η ελαχιστοποίηση του κόστους των αγωγών. Τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι ότι παρουσιάζουν αυξημένες ενεργειακές απώλειες, ότι σε περίπτωση βλάβης απαιτείται απομόνωση των κατάντη κλάδων του δικτύου και επίσης απαιτούν έργα προστασίας έναντι υδραυλικού πλήγματος.



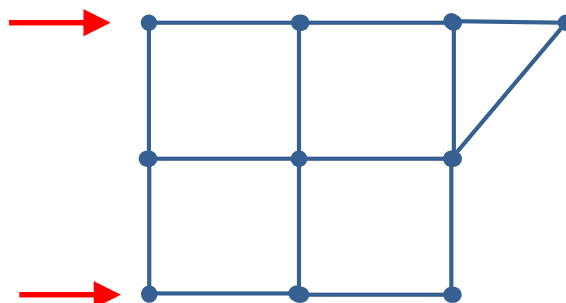
Σχήμα 3.2: Ακτινωτό δίκτυο

Βροχωτά δίκτυα ύδρευσης

Τα βροχωτά ή κλειστά δίκτυα ύδρευσης, είναι δίκτυα τα οποία τροφοδοτούνται από ένα ή περισσότερα σημεία, στα οποία σχηματίζονται κλειστές διαδρομές αγωγών. Σε κάθε σημείο οδηγούν άνω της μίας διαδρομές, με αφετηρία μια από τις κεφαλές του δικτύου.

Τα κλειστά δίκτυα ύδρευσης παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ακτινωτών δικτύων. Με τα κλειστά δίκτυα επιτυγχάνεται καλύτερη κυκλοφορία του νερού και αποφεύγεται ο κίνδυνος να εμφανιστεί κακής ποιότητας νερό από τη μη κυκλοφορία του νερού σε απόμακρα τμήματα των οικισμών, όπως ισχύει με τα ακτινωτά δίκτυα. Επίσης, παρατηρούνται μειωμένες ενεργειακές απώλειες και δεν ακυρώνουν τη λειτουργία της υδροδότησης των κατάντη κλάδων του δικτύου αν παρουσιαστεί μια βλάβη, εφόσον υπάρχουν εναλλακτικές δυνατότητες για την

κίνηση του νερού. Παρόλα αυτά στα κλειστά δίκτυα, σε αντίθεση με τα ακτινωτά παρουσιάζεται σημαντική αύξηση του μήκους του δικτύου, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση του κόστους κατασκευής. Το μειονέκτημά τους αυτό αντισταθμίζεται εν μέρει από τη χρήση μικρότερων διαμέτρων. Τέλος, τα κλειστά δίκτυα ύδρευσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία στην εποπτεία και τη διαχείριση (Καρκατσούλη, 2008).



Σχήμα 3.3: Βροχωτό δίκτυο

3.1.3 Λειτουργικές απαιτήσεις δικτύων ύδρευσης

- Εξασφάλιση της απαιτούμενης παροχής σε κάθε σημείο του δικτύου με ικανοποιητική ταχύτητα. Για τα εσωτερικά δίκτυα ύδρευσης η ταχύτητα του νερού θα πρέπει να κυμαίνεται κατά το δυνατόν στο παρακάτω όριο: 0.5 – 1.5 m/s. Για τα κλειστά δίκτυα ύδρευσης, υπάρχει μεγαλύτερη ελαστικότητα στα όρια για την ταχύτητα εφόσον στα κλειστά δίκτυα επιτυγχάνεται κυκλοφορία του νερού (Καρκατσούλη, 2008).
- Περιορισμός των μέγιστων πιέσεων. Για την προστασία των ευάλωτων σημείων του δικτύου (π.χ. συνδέσεις αγωγών), των εσωτερικών υδραυλικών εγκαταστάσεων και των οικιακών συσκευών, η πίεση σε όλο το μήκος του δικτύου δεν πρέπει να ξεπερνά ένα μέγιστο όριο. Γενικά το ανώτερο επιθυμητό όριο είναι 6- 7 atm (60- 70 ισοδύναμου ύψους νερού). Εφόσον δεν τηρείται το όριο των 6- 7 atm, απαιτείται η εφαρμογή αγωγών κατάλληλης αντοχής και η χρήση μειωτών πίεσης στην είσοδο της υδραυλικής εγκατάστασης κάθε κτηρίου.
- Διατήρηση της πίεσης εντός των αποδεκτών ορίων. Στις εσωτερικές υδραυλικές εγκαταστάσεις, η ελάχιστη πίεση εκροής των λήψεων κυμαίνεται από 0.4 έως 1.2 atm. Συνεπώς, στο υψηλότερο σημείο των κτηρίων πρέπει να εξασφαλίζεται ύψος πίεσης τουλάχιστον 4 m. Αν n είναι ο αριθμός των ορόφων ενός κτηρίου και θεωρώντας τυπικό ύψος ορόφου 3 m και υδραυλικές απώλειες 1 m ανά όροφο, προκύπτει ότι το ελάχιστο ύψος πίεσης στο έδαφος πρέπει να είναι ίσο με $4(n+1)$. Συχνά, αντί αυτής της εμπειρικής σχέσης, το

ελάχιστο όριο πίεσης ορίζεται από τον κανονισμό λειτουργίας του δικτύου ύδρευσης (π.χ. 2 atm στο δίκτυο της ΕΥΔΑΠ).

Η ανεπαρκής πίεση σε μία περιοχή του δικτύου αντιμετωπίζεται με:

1. Αύξηση του υψομέτρου τοποθέτησης της δεξαμενής (όχι πάντα εφικτό).
 2. Αντικατάσταση των κρίσιμων κλάδων ανάντη από αγωγούς μεγαλύτερης διαμέτρου (εναλλακτικά, τοποθέτηση παράλληλων ανακουφιστικών αγωγών).
 3. Τοποθέτηση αντλιών (μόνο αν έχουν εξαντληθεί άλλες εναλλακτικές λύσεις).
- Κατά τη λειτουργία του δικτύου, παρακολουθείται συστηματικά η δίαιτα κρίσιμων ποιοτικών παραμέτρων του νερού (κυρίως υπολειμματικό χλώριο), κατά τη διαδρομή του από τη μονάδα επεξεργασίας έως την κατανάλωση. Οι σχετικοί έλεγχοι γίνονται μέσω τακτικών δειγματοληψιών, καθώς και με την υποστήριξη εξειδικευμένων μοντέλων υδραυλικής και ποιοτικής προσομοίωσης. Στο επίπεδο του σχεδιασμού, πρέπει να αποφεύγεται η εφαρμογή πολύ μεγάλων διαμέτρων σε περιοχές με χαμηλές καταναλώσεις, που έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη υπερβολικά μικρών ταχυτήτων ροής για μακρά χρονικά διαστήματα.
 - Προστασία από υδραυλικό πλήγμα. Στην περίπτωση απότομης εκκίνησης ή διακοπής της ροής, υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης εξαιρετικά μεγάλων υποπιέσεων και υπερπιέσεων, που προκαλούν μεγάλες φθορές στο δίκτυο. Κίνδυνο πλήγματος αντιμετωπίζουν κατ' εξοχήν τμήματα που καταλήγουν σε τυφλό άκρο (ακτινωτά). Συνεπώς, η βροχωτή διάταξη των αγωγών, πέρα από λόγους ασφαλείας έναντι βλάβης, επιδιώκεται και για την αποφυγή υδραυλικών πληγμάτων (Κουτσογιάννης & Ευστρατιάδης 2015).

3.1.4 Βασικές αρχές της υδραυλικής στα δίκτυα ύδρευσης

- Βασικές εξισώσεις μόνιμης ροής στους κλειστούς αγωγούς υπό πίεση

Οι βασικές εξισώσεις που αναφέρονται στις αρχές διατήρησης της μάζας, της ενέργειας και της ορμής είναι οι εξής:

1. Αρχή της διατήρησης της μάζας (ή εξίσωση συνέχειας). Σε μόνιμη ροή το άθροισμα των παροχών που εισρέουν σε έναν κόμβο χωρίς αποθήκευση είναι ίσο με το άθροισμα των παροχών που εκρέουν:

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \quad (3.1)$$

2. Αρχή διατήρησης της ενέργειας. Το ύψος της γραμμής ενέργειας σε μία θέση 1 (H_1) είναι ίσο με το ύψος ενέργειας σε μία κατάντη θέση 2 (H_2) συν τις απώλειες ενέργειας (σε μονάδες μήκους) στη διαδρομή 1-2.

$$H_1 = H_2 + \sum h_{f,1-2} \quad (3.2)$$

Το ύψος ενέργειας H σε μονάδες μήκους σε κάθε θέση δίνεται από τον τύπο (3.3).

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}, \quad (3.3)$$

όπου z : το υψόμετρο θέσης

$p/\rho g$: το ύψος πίεσης

$V^2/2g$: το ύψος κινητικής ενέργειας.

- Υπολογισμός γραμμικών απωλειών στη μόνιμη ροή κατά Darcy- Weisbach

Όταν ένα σώμα κινείται και βρίσκεται σε επαφή με ένα άλλο, τότε στην επιφάνεια επαφής δημιουργείται δύναμη τριβής. Επομένως, για ένα κλειστό αγωγό ύδατος που μεταφέρει νερό μεταξύ δύο σημείων, αναπτύσσονται απώλειες ενέργειας που οφείλονται στις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται κατά την επαφή του κινούμενου υγρού με το στερεό τοίχωμα του αγωγού (Τσακίρης, 2010).

Η διατμητική τάση είναι συνάρτηση της ταχύτητας V , της πυκνότητας ρ , του ιξώδους μ του κινούμενου ρευστού, της διαμέτρου D και της τραχύτητας k του αγωγού:

$$\tau_0 = f(V, D, \rho, \mu, k) \quad (3.4)$$

Με βάση την διαστατική ανάλυση προκύπτει ο συντελεστής τριβής f :

$$\frac{8\tau_0}{\rho V^2} = f\left(\frac{VD\rho}{\mu}, \frac{k}{D}\right) \quad (3.5)$$

ή ισοδύναμα $\tau_0 = f \frac{\rho V^2}{8}$.

Συνεπώς ο συντελεστής τριβής f εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (3.6)$$

Και από τη σχετική τραχύτητα k/D .

Ο όρος $\nu = \mu/\rho$ ονομάζεται κινηματική συνεκτικότητα του νερού (ή κινηματικό ιξώδες), έχει διαστάσεις m^2/s και για τα ρευστά ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Καραλούλης, 2011).

Οι Darcy- Weisbach κατέληξαν στη σχέση που αποδίδει το γραμμικό ύψος απωλειών h_f σε συνάρτηση με τον συντελεστή τριβής f , της διαμέτρου του αγωγού και της ταχύτητας:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} , \quad (3.7)$$

όπου $f = f(Re, k/D)$: συντελεστής τριβής

Q: παροχή (m^3/s)

V: ταχύτητα (m/s)

L: μήκος αγωγού του οποίου οι απώλειες υπολογίζονται (m)

D: εσωτερική διάμετρος αγωγού (m)

Για μεγάλες τιμές του αριθμού Reynolds της ροής, ο συντελεστής τριβής f είναι σταθερός για δεδομένο υλικό και διάμετρο αγωγού.

Για μικρότερους αριθμούς Reynolds, ο συντελεστής f είναι συνάρτηση και του Re και δίνεται από τον (πεπλεγμένο) τύπο Colebrook – White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3.8)$$

- Υπολογισμός τοπικών απωλειών φορτίου

Εκτός από τις γραμμικές απώλειες, στα δίκτυα διανομής δημιουργούνται και τοπικές απώλειες, στις συνδέσεις των αγωγών και τις στροφές (τυπικές τοπικές απώλειες) και στις θέσεις των ειδικών συσκευών και διατάξεων (ειδικές τοπικές απώλειες).

Οι τοπικές απώλειες οφείλονται κυρίως στην ανάπτυξη στροβίλων αποκόλλησης της ροής και εκφράζονται με όρους ύψους κινητικής ενέργειας, ήτοι:

$$h_L = \frac{K_T V^2}{2g} , \quad (3.9)$$

όπου K_T : συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία της τοπικής μεταβολής διατομής και κατεύθυνσης και τα χαρακτηριστικά της ροής (αριθμός Reynolds) (Κουτσογιάννης & Ευστρατιάδης 2015).

3.1.5 Μοντέλα προσομοίωσης και επίλυσης δικτύων ύδρευσης

Το δίκτυο ύδρευσης ως μαθηματικό μοντέλο

Η προσομοίωση και επίλυση κάθε δικτύου διανομής νερού, πραγματοποιείται μέσω μιας μαθηματικής περιγραφής, δηλαδή μέσω της διατύπωσης εξισώσεων που αναφέρονται στην υδραυλική λειτουργία των συνιστωσών του δικτύου. Η μαθηματική περιγραφή κάθε δικτύου

πραγματοποιείται, αφού γίνει η δικτυακή απεικόνιση των συνιστωσών του φυσικού συστήματος ως συνιστώσες ενός εννοιολογικού μοντέλου γράφου (κόμβοι, κλάδοι). Συνιστώσες κάθε δικτύου διανομής νερού αποτελούν τα έργα αποθήκευσης νερού (δεξαμενές, υδατόπυργοι), τα έργα μεταφοράς νερού (αγωγοί υπό πίεση), οι διάφορες συσκευές ρύθμισης της ροής (δικλείδες, βαλβίδες) και τα έργα ρύθμισης της πίεσης (μειωτές πίεσης, αντλιοστάσια).

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

Με τον όρο *κλάδος* (αγωγός) νοείται κάθε στοιχείο μεταφοράς νερού μήκους L , που αποτελείται από σύστημα σωλήνων σε σειρά, ομοιόμορφης διαμέτρου D , κλάσης και τραχύτητας k_s , κατά μήκος του οποίου θεωρείται ενιαία (άγνωστη) παροχή Q (Κουτσογιάννης & Ευστρατιάδης 2015).

Εννοιολογική αναπαράσταση δικτύων διανομής

Η αναπαράσταση των δικτύων διανομής μέσω μοντέλων αποτελείται από τα εξής στάδια:

- **Σχηματοποίηση:** είναι η δικτυακή απεικόνιση των συνιστωσών του φυσικού συστήματος ως συνιστώσες ενός εννοιολογικού μοντέλου γράφου (κόμβοι, κλάδοι).
- **Μαθηματική περιγραφή:** είναι η διατύπωση εξισώσεων που αναφέρονται στην υδραυλική λειτουργία των συνιστωσών του δικτύου.
- **Περιγραφικά- γεωμετρικά δεδομένα:** είναι η τοπολογία του δικτύου, τα υψόμετρα των κόμβων, τα χαρακτηριστικά των αγωγών, δεξαμενών και άλλων ειδικών διατάξεων.
- **Αρχικές συνθήκες:** είναι οι στάθμες των δεξαμενών.
- **Φόρτιση δικτύου:** είναι η κατανάλωση νερού, η οποία μπορεί να τεθεί σταθερή ή χρονικά μεταβαλλόμενη, και επιμερισμένη στους κόμβους του δικτύου
- **Επίλυση δικτύου:** πραγματοποιείται με τον υπολογισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών ροής σε συνθήκες σταθερής (στιγμιαίας) κατανάλωσης.
- **Προσομοίωση δικτύου:** πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών επιλύσεων του δικτύου σε συνθήκες μεταβαλλόμενης κατανάλωσης (Κουτσογιάννης & Ευστρατιάδης 2015).

Δυνατότητες μοντέλων

Προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία ενός δικτύου ύδρευσης είναι η εξασφάλιση επαρκούς ποσότητας και ποιότητας νερού για την κάλυψη της κατανάλωσης, μέσα σε αποδεκτά όρια πίεσης. Τα υπολογιστικά πακέτα ανάλυσης και προσομοίωσης δικτύων, και τα σχετικά μαθηματικά μοντέλα που αυτά υποστηρίζουν, υποβοηθούν τον μελετητή που σχεδιάζει ή την υπηρεσία που διαχειρίζεται ένα δίκτυο ύδρευσης για την λήψη ορθολογικών αποφάσεων, από

τεχνική και οικονομική άποψη. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μοντέλων, όπως και η θέσπιση των κριτηρίων επιλογής, υπόκεινται στην ανθρώπινη κρίση και εμπειρία.

Τα μοντέλα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα επίλυσης των δικτύων ύδρευσης, δηλαδή υπολογισμού των υδραυλικών χαρακτηριστικών της ροής, σε συνθήκες σταθερής (στιγμιαίας) κατανάλωσης αλλά και σε συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης κατανάλωσης.

- Επίλυση σταθερής κατάστασης (steady-state): Η επίλυση του δικτύου, δηλαδή ο υπολογισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών της ροής (παροχές, πιέσεις), γίνεται θεωρώντας σταθερή φόρτιση στους κόμβους (ο έλεγχος γίνεται για τη δυσμενέστερη φόρτιση). Με τον όρο φόρτιση νοείται η κατανάλωση στους κόμβους του δικτύου. Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για εφαρμογές διαστασιολόγησης αγωγών και αντλιών, καθώς και αποτίμησης της υδραυλικής επάρκειας υφιστάμενων δικτύων.
- Επίλυση χρονικά μεταβαλλόμενης κατάστασης (extended-period): Η επίλυση του δικτύου γίνεται σε διακριτά χρονικά βήματα, θεωρώντας χρονικά μεταβαλλόμενη κατανάλωση. Στόχος είναι ο έλεγχος της δυναμικής λειτουργίας του δικτύου σε κανονικές και έκτακτες συνθήκες. Κατά κανόνα, η διάρκεια της επίλυσης είναι μεγαλύτερη των 24 ωρών (τυπική τιμή 72 ώρες), ενώ το χρονικό βήμα εξαρτάται από τη διακύμανση των καταναλώσεων στο δίκτυο (τυπική τιμή μία ώρα). Η εν λόγω προσέγγιση θεωρείται κατάλληλη για εφαρμογές χωροθέτησης και ελέγχου της επάρκειας δεξαμενών, υπολογισμού της ενέργειας άντλησης και ανάλυσης της διαίτας των ποιοτικών παραμέτρων του νερού (η τελευταία λειτουργία γίνεται μέσω συνδυασμένων μοντέλων προσομοίωσης τόσο των υδραυλικών όσο και των ποιοτικών χαρακτηριστικών της ροής) (Κουτσογιάννης & Ευστρατιάδης 2015).

3.2 Λογισμικό EPANET

3.2.1 Σύντομη περιγραφή

Το EPANET είναι ένα λογισμικό που προσομοιώνει σε εκτεταμένη περίοδο την υδραυλική συμπεριφορά και την εξέλιξη της ποιότητας νερού σε δίκτυα με υπό πίεση αγωγούς. Το λογισμικό έχει αναπτυχθεί από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (Environmental Protection Agency) και διατίθεται δωρεάν με οδηγό χρήσης στην επίσημη σελίδα της. Ένα δίκτυο αποτελείται από τους αγωγούς, τους κόμβους (διασταυρώσεις αγωγών), τις αντλίες, τις βαλβίδες και τις δεξαμενές. Το EPANET παρακολουθεί τη ροή νερού σε κάθε αγωγό, την πίεση σε κάθε κόμβο, το ύψος νερού σε κάθε δεξαμενή και τη συγκέντρωση μίας χημικής ουσίας μέσα στο δίκτυο

κατά τη διάρκεια μίας περιόδου προσομοίωσης που αποτελείται από πολλά χρονικά βήματα. Εκτός από τις χημικές ουσίες, μπορεί να υπολογιστεί η παλαίωση του νερού καθώς και να εντοπιστεί η πηγή της ουσίας.

Το EPANET έχει σχεδιαστεί ως ένα εργαλείο έρευνας για τη βελτίωση της κατανόησης της κίνησης και της τύχης των συστατικών του πόσιμου νερού μέσα στα δίκτυα ύδρευσης. Το πεδίο εφαρμογών του είναι ευρύ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βαθμονόμηση υδραυλικού μοντέλου, την ανάλυση του υπολειμματικού χλωρίου και την εκτίμηση της έκθεσης των καταναλωτών. Το λογισμικό μπορεί να βοηθήσει στη αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης για τη βελτίωση της ποιότητας νερού σε ένα σύστημα. Λειτουργεί σε περιβάλλον Windows και παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον επεξεργασίας εισόδου δεδομένων του δικτύου για την υδραυλική προσομοίωση και την προσομοίωση της ποιότητας νερού, καθώς και την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων σε πολλές μορφές, όπως οι χάρτες με χρωματικό κώδικα, πίνακες δεδομένων και γραφήματα χρονοσειρών (Rossman, 2000).

3.2.2 Δυνατότητες του λογισμικού

Υδραυλική λειτουργία δικτύου

Απαραίτητη προϋπόθεση για μία αποτελεσματική υδραυλική προσομοίωση είναι η πλήρης και ακριβής μοντελοποίηση του δικτύου. Το EPANET περιέχει μία εξαιρετική μηχανή υδραυλικής ανάλυσης, η οποία περιλαμβάνει τις εξής δυνατότητες (Rossman, 2000):

- δεν θέτει κανένα περιορισμό στο μέγεθος του δικτύου που πρόκειται να αναλυθεί.
- υπολογίζει τις απώλειες τριβών χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ή Chezy-Manning.
- περιλαμβάνει τις μικρές απώλειες στις καμπύλες και τις συναρμογές.
- προσομοιώνει αντλίες σταθερής ή μεταβλητής ταχύτητας.
- υπολογίζει την ενέργεια και το κόστος των αντλιών.
- προσομοιώνει διάφορους τύπους αντλιών, όπως ελέγχου ροής, ρύθμισης πίεσης κ.α.
- επιτρέπει δεξαμενές αποθήκευσης διαφόρων σχημάτων.
- επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών προτύπων χρονικής διακύμανσης της κατανάλωσης για πολλαπλές χρήσεις και για κάθε κόμβο.

Ποιοτική λειτουργία δικτύου

Το EPANET παρέχει και αξιόλογες δυνατότητες στην ανάλυση της ποιότητας νερού, μερικές από τις οποίες είναι οι εξής (Rossman, 2000):

- μοντελοποιεί την κίνηση ενός μη-ενεργού υλικού μέσα στο δίκτυο .
- μοντελοποιεί την κίνηση και την τύχη ενός ενεργού υλικού καθώς αυτό μεγαλώνει (π.χ. υποπροϊόν απολύμανσης) ή φθίνει (π.χ. υπολειμματικό χλωρίο) μέσα στο δίκτυο.
- μοντελοποιεί την ηλικία του νερού μέσα στο δίκτυο.
- εντοπίζει το ποσοστό ροής από ένα δεδομένο κόμβο που φτάνει σε όλους τους άλλους κόμβους.
- μοντελοποιεί τις αντιδράσεις και στην κύρια ροή και κοντά στα τοιχώματα.
- χρησιμοποιεί n-τάξης κινηματική για να υπολογίσει τις αντιδράσεις στην κύρια ροή και πρώτης ή μηδενικής τάξης στο τοίχωμα.
- επιτρέπει τη μεταβαλλόμενη με το χρόνο εισαγωγή συγκέντρωσης ή μάζας σε κάθε σημείο του δικτύου.

Με αυτές τις δυνατότητες, το EPANET μπορεί να μελετήσει θέματα ποιότητας νερού όπως:

- μίξη νερού από διαφορετικές πηγές.
- παλαίωση του νερού μέσα στο δίκτυο.
- απώλεια του υπολειμματικού χλωρίου.
- αύξηση των υποπροϊόντων απολύμανσης.
- ανίχνευση γεγονότων μόλυνσης.

3.2.3 Μέθοδος επίλυσης δικτύων ύδρευσης στο EPANET

Η επίλυση των δικτύων που αποτελούνται από κλειστούς αγωγούς στηρίζεται στην εξίσωση διατήρησης της μάζας και της ενέργειας και στη συσχέτιση του ύψους απωλειών με την παροχή για τα χαρακτηριστικά του αγωγού. Γενικά, οι δύο βασικές αρχές της υδραυλικής που ακολουθούνται κατά την επίλυση των κλειστών δικτύων είναι οι εξής (Rossman, 2000):

Αρχή διατήρησης μάζας ή αρχή συνέχειας παροχής: Σε ένα κόμβο το αλγεβρικό άθροισμα των παροχών ισούται με το μηδέν. Δηλαδή το άθροισμα των παροχών που εισρέουν σε αυτόν είναι ίσο με το άθροισμα των παροχών που εκρέουν από αυτόν και με την ποσότητα του νερού που καταναλώνεται στον κόμβο.

Αρχή διατήρησης ενέργειας ή αρχή συνέχειας πίεσης: Σε ένα κόμβο το ύψος της γραμμής ενέργειας είναι το ίδιο ανεξάρτητα από το ποια διαδρομή ακολουθεί το νερό για να φτάσει σε αυτόν. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια σε ένα βρόχο το αλγεβρικό άθροισμα των απωλειών φορτίου να ισούται με το μηδέν.

Το EPANET για την επίλυση δικτύων ύδρευσης χρησιμοποιεί μια μέθοδο επίλυσης η οποία αναπτύχθηκε από τους Todini και Pilati το 1987, που αποτελεί μια υβριδική, βαθμωτή μέθοδο και

είναι γνωστή ως “Gradient Method”. Ουσιαστικά είναι μια επαναληπτική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί στοιχεία και από τη μέθοδο Newton – Raphson αλλά και από τη γραμμική. Επιλύει τα δίκτυα βάση και των δύο βασικών υδραυλικών αρχών και χρησιμοποιεί μερικές παραγώγους για τη γραμμικοποίηση των μη γραμμικών εξισώσεων.

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

3.2.4 Προσομοίωση δικτύου με χρήση EPANET

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο το EPANET προσομοιώνει όλα εκείνα τα στοιχεία, που αποτελούν κάθε δίκτυο διανομής νερού αλλά και τις διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με τη λειτουργία του δικτύου. Το λογισμικό προσομοιώνει ένα δίκτυο ως ένα σύνολο γραμμικών και σημειακών αντικειμένων. Τα σημειακά αντικείμενα (nodes) αναπαριστούν τις ενώσεις των αγωγών (junctions) και τις δεξαμενές (reservoirs, tanks) ενώ τα γραμμικά αναπαριστούν τους αγωγούς (pipes) αλλά και συσκευές, όπως οι αντλίες (pumps) και οι δικλείδες (valves). Όλα τα παραπάνω μεγέθη ορίζονται ακολούθως (Rossman, 2000).

Junctions: Με τον όρο junctions νοούνται τα σημεία εκείνα στα οποία ενώνονται οι αγωγοί μεταξύ τους με σκοπό την κίνηση του νερού μέσα στο δίκτυο. Ουσιαστικά αποτελούν τα σημεία διασταύρωσης των αγωγών. Δε χρησιμοποιούνται ως αποθηκευτικοί χώροι νερού αλλά αντιθέτως αποτελούν τα σημεία ζήτησης νερού, δηλαδή είναι τα σημεία στα οποία το νερό φεύγει από το δίκτυο με σκοπό την κάλυψη των αναγκών του συνόλου των καταναλωτών.

Pipes: Με τον όρο pipes νοούνται οι κλάδοι ή αγωγοί του δικτύου διανομής νερού. Ουσιαστικά νοείται κάθε τμήμα αγωγού μήκους l , που αποτελείται από σωλήνα ομοιόμορφης διαμέτρου d , κλάσης και τραχύτητας k , κατά μήκος του οποίου θεωρείται ενιαία παροχή Q , όπου δεν παρεμβάλλεται κανένα σημείο εισόδου ή εξόδου και καμία διακλάδωση. Κάθε αγωγός ορίζεται από δύο κόμβους (junctions). Το EPANET θεωρεί ότι κάθε χρονική στιγμή, όλοι οι αγωγοί του δικτύου είναι γεμάτοι νερό.

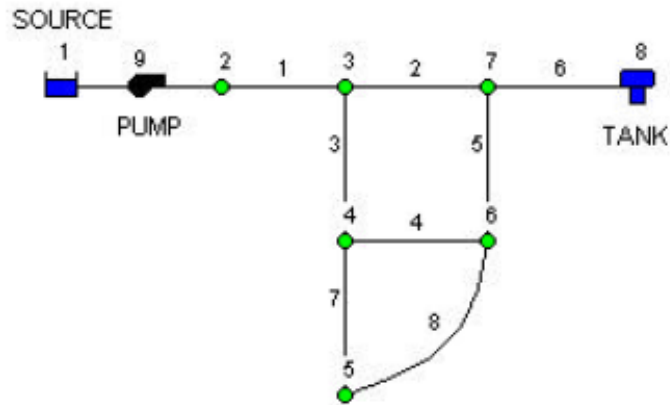
Reservoirs: Αποτελούν εξωτερικές πηγές νερού για το δίκτυο. Στην ουσία αποτελούν το χώρο στον οποίο συγκεντρώνεται το νερό και μέσω αγωγών (τροφοδοτικοί αγωγοί) διανέμεται στο δίκτυο. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την προσομοίωση λιμνών, ποταμών, υδροφόρων στρωμάτων υπόγειων νερών κ.α. Επίσης χρησιμεύουν σαν πηγές ποιότητας νερού. Το υψόμετρο της επιφάνειας μιας δεξαμενής θεωρείται σταθερό, καθώς το νερό εισρέει ή εκρέει από αυτό κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης παρατεταμένης περιόδου (Extended Period Simulation).

Tanks: Αποτελούν αποθηκευτικούς κόμβους. Το υψόμετρο της επιφάνειας μιας δεξαμενής μεταβάλλεται καθώς το νερό εισρέει ή εκρέει από αυτό κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης παρατεταμένης περιόδου (Extended Period Simulation). Οι δεξαμενές μπορούν να έχουν είτε κυκλική είτε μη κυκλική διατομή.

Pumps: Με τον όρο αυτό ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει στο δίκτυο αντλίες. Οι αντλίες αποτελούν τις συσκευές, οι οποίες μεταδίδουν ενέργεια σε ένα ρευστό, αυξάνοντας το πιεζομετρικό του φορτίο. Αποτελούν τις συσκευές εκείνες οι οποίες βοηθούν το νερό να κινηθεί από σημεία με χαμηλή πίεση σε σημεία με υψηλότερη πίεση.

Valves: Με τον όρο αυτό νοούνται οι βαλβίδες οι οποίες αποτελούν ειδικές συσκευές των δικτύων ύδρευσης. Στην Ελλάδα για την ονομασία τους χρησιμοποιούνται και οι όροι βάνα ή δικλείδα. Αποτελούν συσκευές ρύθμισης της παροχής και τοποθετούνται στις διακλαδώσεις, ώστε σε περίπτωση βλάβης να εξασφαλίζουν απομόνωση του υπόλοιπου δικτύου. Ουσιαστικά αποτελούν συσκευές οι οποίες ανοίγουν και κλείνουν με σκοπό να ικανοποιήσουν μια συνθήκη που ορίζεται από το χρήστη.

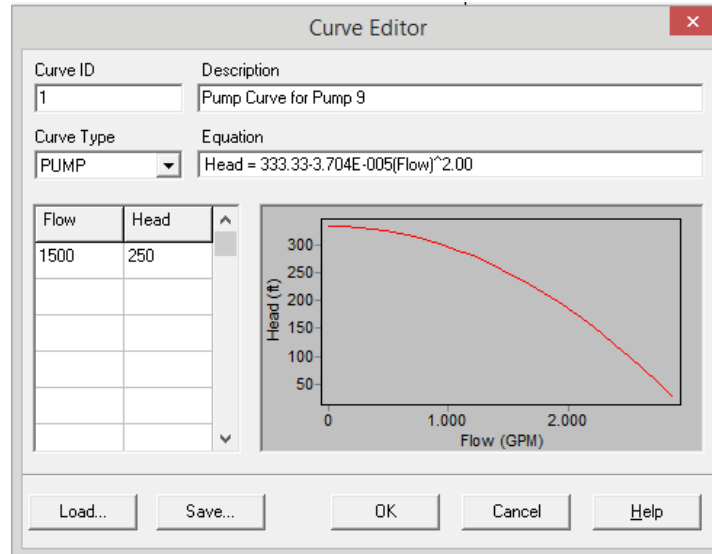
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια αναπαράσταση ενός δικτύου ύδρευσης στο περιβάλλον του EPANET.



Σχήμα 3.4: Αναπαράσταση δικτύου ύδρευσης στο EPANET

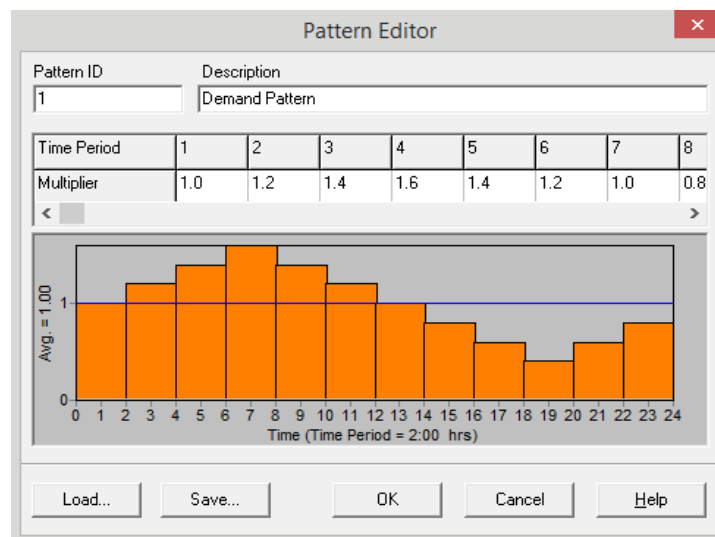
Εκτός από τα παραπάνω στοιχεία, τα οποία αποτελούν τα βασικά στοιχεία των δικτύων ύδρευσης, το EPANET χρησιμοποιεί και μια σειρά παραμέτρων, που καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας των δικτύων. Αυτές οι παράμετροι είναι οι εξής (Rossman, 2000) :

Χαρακτηριστικές καμπύλες (curves): Οι καμπύλες αυτές αποτελούν μια γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ δύο ποσοτήτων. Πριν την επίλυση του δικτύου από το πρόγραμμα ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες οι οποίες περιγράφουν τη σχέση μεταξύ δύο χαρακτηριστικών μεγεθών ενός στοιχείου του δικτύου. Χαρακτηριστικές καμπύλες μπορούν να εισαχθούν τόσο για τις συσκευές του δικτύου, όσο και για τις δεξαμενές του. Αφού οριστούν οι καμπύλες αυτές, το πρόγραμμα θα επιλύσει το δίκτυο και θα υπολογίσει τα αποτελέσματα για τα στοιχεία του δικτύου, βάση των καμπύλων αυτών. Στο EPANET μπορούν να εισαχθούν από το χρήστη καμπύλες που περιγράφουν τη σχέση της ροής και του ύψους ενέργειας του νερού που μεταφέρεται από μια αντλία (pump curve), χαρακτηριστικές καμπύλες βαθμού απόδοσης των αντλιών (efficiency curves), καμπύλες που καθορίζουν τη χωρητικότητα των δεξαμενών συναρτήσει του ύψους στάθμης τους (volume curve) και καμπύλες που περιγράφουν τις απώλειες ενέργειας σε μια δικλείδα συναρτήσει της παροχής (Headloss Curve).



Σχήμα 3.5: Καμπύλη βαθμού απόδοσης αντλίας

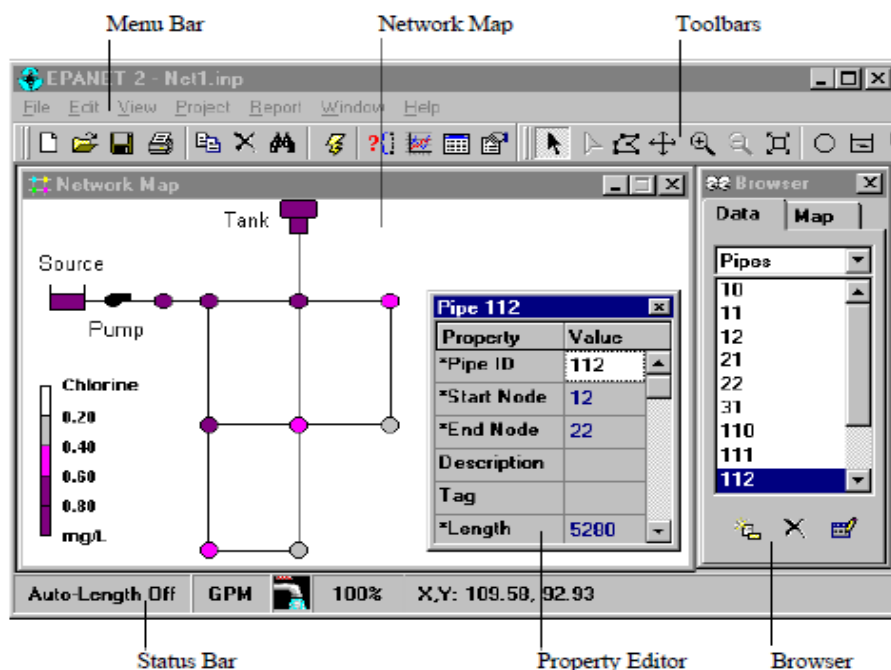
Χρονικά πρότυπα (time patterns): Τα πρότυπα αυτά αποτελούν μια σειρά συντελεστών, γνωστοί ως πολλαπλασιαστές, οι οποίοι πολλαπλασιαζόμενοι με μία ποσότητα (π.χ. ζήτηση στους κόμβους του δικτύου, ύψος στάθμης της δεξαμενής κ.α), εκφράζουν τη διακύμανσή της στο χρόνο. Αρχικά θα πρέπει να οριστεί από το χρήστη του προγράμματος, το χρονικό βήμα σύμφωνα με το οποίο θα ελεγχθεί η διακύμανση της ποσότητας που επιθυμεί. Το πιο συνηθισμένο χρονικό βήμα, είναι αυτό της μίας ώρας. Συνεπώς με τη χρήση των time patterns, ο χρήστης είναι σε θέση να ελέγξει τη διακύμανση της ποσότητας που τον ενδιαφέρει, σύμφωνα με το χρονικό βήμα που έχει επιλέξει. Για παράδειγμα, τα time patterns (χρονικά πρότυπα) παρέχουν ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τον έλεγχο της διακύμανσης της ζήτησης στους κόμβους ενός δικτύου, ανά μία ώρα.



Σχήμα 3.6: Χρονικό πρότυπο ζήτησης

3.2.5 Περιβάλλον εργασίας του EPANET

Το βασικό περιβάλλον εργασίας του EPANET παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 και αποτελείται από τα εξής: Menu bar, δύο Toolbars, Status bar, Network Map window, Browser window και Property Editor window (Rossman, 2000) .



Σχήμα 3.7: Βασικό περιβάλλον εργασίας στο EPANET

Menu bar

Βρίσκεται στο πάνω μέρος του περιβάλλοντος εργασίας και περιλαμβάνει τις εξής εντολές:

- File menu: περιλαμβάνει εντολές για άνοιγμα, αποθήκευση και εκτύπωση αρχείων.
- Edit menu: περιλαμβάνει εντολές για αντιγραφή του χάρτη, των αποτελεσμάτων κ.α.
- View menu: περιλαμβάνει κυρίως εντολές που αφορούν την παρουσίαση του χάρτη στο χρήστη.
- Project menu: περιλαμβάνει κυρίως εντολές που αφορούν την ανάλυση και τον τρόπο με τον οποίο θα επιλυθεί το δίκτυο.
- Report menu: περιλαμβάνει κυρίως εντολές που αφορούν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του δικτύου.

- Window menu: περιλαμβάνει κυρίως εντολές που αφορούν την επαναφορά των παραθύρων του προγράμματος.
- Help menu: περιλαμβάνει εντολές που βοηθούν το χρήστη στο να κατανοήσει τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος.

Toolbar

Η συγκεκριμένη “μπάρα εργαλείων” περιλαμβάνει μια σειρά εικονιδίων, σχεδιαστικών και μη, μέσω των οποίων δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να σχεδιάσει το προς επίλυση δίκτυο διανομής νερού αλλά και να επιλέξει αυτόματα την εκτέλεση βασικών εντολών όπως την αποθήκευση και εκτύπωση του project που έχει δημιουργήσει, να επιλέξει την επίλυση του δικτύου μέσω του προγράμματος, να εξάγει πίνακες, γραφήματα κ.α. (Καρκατσούλη, 2008).

Status bar

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

- Auto-Length: ενημερώνει το χρήστη εάν είναι ενεργοποιημένος (on) ή όχι (off) ο αυτόματος υπολογισμός του μήκους των αγωγών του δικτύου.
- Flow Units: ενημερώνει το χρήστη για τη μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για την παροχή.
- Zoom Level: ενημερώνει το χρήστη για το ποσοστό μεγέθυνσης του χάρτη.
- Run Status: πληροφορεί το χρήστη για το αν το πρόγραμμα κατάφερε να επιλύσει το δίκτυο ή όχι.
- X, Y Location: πληροφορεί το χρήστη για τη θέση του κέρσορα στο χάρτη κάθε στιγμή.

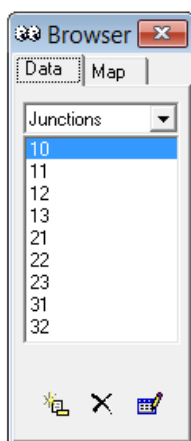
Network Map

Ο χάρτης δικτύου παρέχει ένα σχηματικό διάγραμμα των αντικειμένων που απαρτίζουν ένα δίκτυο ύδρευσης. Η τοποθεσία των αντικειμένων και οι μεταξύ τους αποστάσεις δεν πρέπει απαραίτητα να ανταποκρίνονται στη πραγματική κλίμακα. Επιλεγμένες ιδιότητες των αντικειμένων, όπως η ποιότητα νερού στους κόμβους ή η ταχύτητα ροής στους αγωγούς, μπορούν να αναπαρασταθούν με διαφορετικά χρώματα, τα οποία επεξηγούνται στο υπόμνημα. Καινούρια αντικείμενα μπορούν να προστεθούν απευθείας στο χάρτη και ήδη υπάρχοντα να επεξεργαστούν. Επίσης, όσον αφορά τους κόμβους και τους αγωγούς, μπορούν να σχεδιαστούν σε διαφορετικά μεγέθη, με σκοπό την καλύτερη και ευκρινέστερη παρουσίαση τους. Τέλος, το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα

χρήσης κάποιου χάρτη ως υπόβαθρο (π.χ. ένα τοπογραφικό χάρτη, δρόμους κ.τ.λ.) σύμφωνα με το οποίο θα γίνει η σχεδίαση του προς επίλυση δικτύου διανομής νερού.

Data Browser

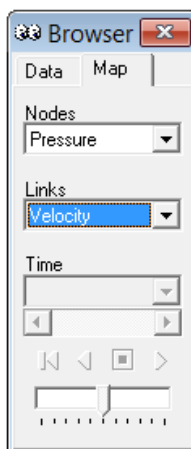
Στο παράθυρο αυτό, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5, ο χρήστης εισάγει όλα τα απαραίτητα δεδομένα των αντικειμένων του δικτύου, με σκοπό την επίλυσή του.



Σχήμα 3.8: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων

Map Browser

Το παράθυρο αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να παρουσιάσει στο χάρτη με χρωματική διαβάθμιση τα δεδομένα των αντικειμένων, που απαρτίζουν το δίκτυο αλλά και τα αποτελέσματα της ανάλυσης του δικτύου (π.χ. πιέσεις στους κόμβους, ταχύτητες ροής στους αγωγούς). Επίσης, ο χρήστης μπορεί να παρουσιάσει στο χάρτη μέσω χρωματικής διαβάθμισης τη διακύμανση των διάφορων μεγεθών στο χρόνο.



Σχήμα 3.9: Παράθυρο εξαγωγής αποτελεσμάτων

3.2.6 Βήματα χρήσης

Τα τυπικά βήματα για την υδραυλική προσομοίωση ενός δικτύου είναι τα εξής (Rossman, 2000):

1. Σχεδιασμός αναπαράστασης του δικτύου διανομής ή εισαγωγή βασικής περιγραφής του δικτύου σε αρχείο κειμένου.
2. Εισαγωγή των ιδιοτήτων των στοιχείων, που απαρτίζουν το σύστημα
3. Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του συστήματος
4. Επιλογή ενός συνόλου ρυθμίσεων ανάλυσης
5. Εκτέλεση μίας υδραυλικής / ποιότητας νερού ανάλυσης
6. Παρουσίαση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Σχεδιασμός αναπαράστασης του δικτύου διανομής

Ο σχεδιασμός του δικτύου πραγματοποιείται με τα εργαλεία, που παρέχει το toolbar (όπως εισαγωγή κόμβων, αγωγών, αντλιών, δεξαμενών κ.α.)

Εισαγωγή των ιδιοτήτων των στοιχείων του συστήματος

Το λογισμικό απαιτεί, για κάθε αντικείμενο του δικτύου, την εισαγωγή κάποιων βασικών μεγεθών ως δεδομένα εισόδου. Πιο συγκεκριμένα:

Για τις συνδέσεις (junctions), ως δεδομένα εισάγονται:

- Το υψόμετρό τους (elevation), το οποίο υπολογίζεται σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς και αυτό είναι συνήθως η μέση στάθμη της θάλασσας.
- Η ζήτηση νερού (base demand).
- Το χρονικό πρότυπο ζήτησης (demand pattern).
- Η ποιότητα του νερού στην αρχή της προσομοίωσης (initial quality).
- Η ποιότητα του νερού, που τυχόν εισάγεται στον κόμβο (source quality).

Για τους αγωγούς (pipes), ως δεδομένα εισάγονται:

- Η εσωτερική τους διάμετρος (diameter).
- Το μήκος τους (length).
- Ο συντελεστής τραχύτητας (roughness coefficient).

Για τις δεξαμενές (reservoirs), ως δεδομένα εισάγονται:

- Το υψόμετρο της δεξαμενής (total head), το οποίο ουσιαστικά είναι το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού στη δεξαμενή, όταν αυτή δε βρίσκεται υπό πίεση.

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

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

Για τις αντλίες (pumps), ως δεδομένα εισάγονται:

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

Για τις βαλβίδες (valves), ως δεδομένα εισάγονται:

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

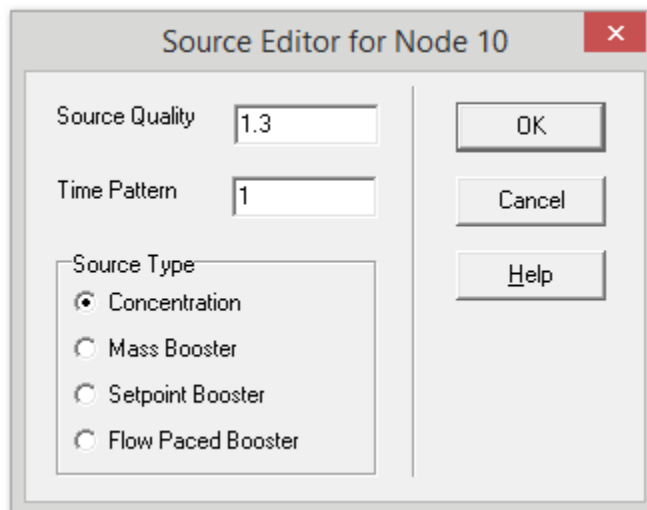
Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του συστήματος

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

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες, τα χρονικά πρότυπα και οι αλγόριθμοι μπορούν να επεξεργαστούν μέσω ειδικών εργαλείων (editors), ώστε να προσδιοριστούν οι ιδιότητές τους. Για την επεξεργασία τους, επιλέγεται το εν λόγω μέγεθος μέσω του Data Browser και στη συνέχεια το κουμπί επεξεργασίας (Edit button). Επιπλέον, μέσω του Property Editor των κόμβων, ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τις ζητήσεις στο πεδίο Demand Categories.

Με τον ίδιο τρόπο, το πεδίο Source Quality στο Property Editor για τους κόμβους και τις δεξαμενές, δίνει την δυνατότητα επεξεργασίας του εν λόγω μεγέθους μέσω του Source Quality editor. Πιο συγκεκριμένα, ο Source Quality editor είναι ένα αναδυόμενο παράθυρο, που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποιότητα της πηγής της ροής, που εισάγεται σε ένα συγκεκριμένο κόμβο. Η πηγή μπορεί να είναι η κύρια μονάδα επεξεργασίας νερού, ένα πηγάδι ή

μία δορυφορική εγκατάσταση επεξεργασίας, ακόμη και μία ανεπιθύμητη εισαγωγή χημικής ουσίας. Το παράθυρο επεξεργασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7 και περιλαμβάνει τα εξής πεδία (Rossman, 2000):



Σχήμα 3.10: Source Quality Editor

Τύπος πηγής:

- Concentration source: ορίζει τη συγκέντρωση της εξωτερικής ροής, που εισέρχεται στο δίκτυο, όπως η ροή από μία δεξαμενή ή από μία αρνητική ζήτηση σε ένα κόμβο.
- Mass booster: προσθέτει μία ορισμένη μάζα σε αυτή που εισέρχεται στον κόμβο από άλλα σημεία του δικτύου.
- Setpoint booster: ορίζει τη συγκέντρωση κάθε ροής που φεύγει από τον κόμβο, εφόσον η συγκέντρωση όλων των εισροών στον κόμβο είναι κάτω από τη τιμή, που ορίζεται (setpoint).
- Flow paced booster: προσθέτει μία ορισμένη συγκέντρωση σε αυτή που δημιουργείται από την ανάμειξη όλων των εισροών στον κόμβο από άλλα σημεία του δικτύου.

Ο πρώτος τύπος πηγής (Concentration source) είναι κατάλληλος για κόμβους που αντιπροσωπεύουν εισαγωγή νερού από δεξαμενές ή από μονάδες επεξεργασίας.

Ο δεύτερος τύπος (Mass booster) είναι κατάλληλος για να προσομοιώσει άμεση έγχυση ενός στοιχείου «ιχνηλάτη» ή πρόσθετου απολυμαντικού στο δίκτυο ή να προσομοιώσει μία εισαγωγή χημικής ουσίας.

Ποιότητα πηγής (Source Quality): είναι η ελάχιστη ή μέση συγκέντρωση (ή ρυθμός εισροής της μάζας ανά λεπτό) της πηγής.

Χρονικό πρότυπο ποιότητας: είναι ο αριθμός του χρονικού προτύπου που θα χρησιμοποιηθεί για να κάνει την πηγή να διαφοροποιείται με το χρόνο.

Επιλογή ενός συνόλου ρυθμίσεων ανάλυσης

Στο στάδιο αυτό καθορίζονται οι μονάδες μέτρησης των καταναλώσεων στους κόμβους και των παροχών στους αγωγούς. Επίσης, καθορίζονται η μέθοδος υπολογισμού των γραμμικών απωλειών ενέργειας κατά μήκος των αγωγών, ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων, που θα πραγματοποιήσει το πρόγραμμα για την επίλυση του δικτύου καθώς επίσης και το όριο των διορθωτικών παροχών σύμφωνα με το οποίο θα σταματήσει η επίλυση του δικτύου.

Εκτέλεση μίας υδραυλικής / ποιότητας νερού ανάλυσης

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

Παρουσίαση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Το EPANET προσφέρει στο χρήστη διάφορες εναλλακτικές παρουσιάσεις τόσο των δεδομένων όσο και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν μέσω χαρτών, πινάκων και διαγραμμάτων.

Οι χάρτες αποτελούν ένα τρόπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων, που βοηθούν το χρήστη να κατανοήσει καλύτερα τη λειτουργία του δικτύου και να εξάγει συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με χρωματική διαβάθμιση, όπου κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών του μεγέθους. Επιπλέον, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρουσιάσει μόνο τα μεγέθη που ικανοποιούν ένα κατώτατο όριο, που έχει θέσει ο ίδιος.

Ένας άλλος τρόπος παρουσίασης τόσο των δεδομένων όσο και των αποτελεσμάτων είναι οι πίνακες. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρουσιάσει το μέγεθος που επιθυμεί για όλα τα στοιχεία του δικτύου (π.χ. κόμβους, αγωγούς) σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο αλλά και τα αποτελέσματα για ένα στοιχείο (π.χ. κόμβο ή αγωγό) καθ' όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης, όπως χρονοσειρές πίεσης, ποιότητας.

Τέλος, το EPANET παρέχει τη δυνατότητα χρήσης διάφορων τύπων γραφημάτων για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του δικτύου. Γενικά, τα γραφήματα παρουσιάζουν τη διακύμανση κάποιου μεγέθους για έναν ή και περισσότερους κόμβους ή αγωγούς, στο χρονικό διάστημα που έχει οριστεί από το χρήστη.

3.2.7 Εφαρμογές λογισμικού EPANET

Το EPANET, όπως αναφέρθηκε, είναι ένα λογισμικό που προσομοιώνει σε εκτεταμένη περίοδο την υδραυλική συμπεριφορά και την εξέλιξη της ποιότητας νερού σε δίκτυα με υπό πίεση αγωγούς. Ως εκ τούτου χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, που σχετίζονται με τα δίκτυα ύδρευσης και απαιτείται σε πρώτη φάση η υδραυλική προσομοίωση και η εξέλιξη της ποιότητας νερού μέσω του λογισμικού. Γενικά, το EPANET μπορεί να χρησιμοποιηθεί για (Rossman, 2000):

- τον σχεδιασμό προγραμμάτων δειγματοληψίας.
- να μελετηθεί η απώλεια απολυμαντικού και η παραγωγή υποπροϊόντων.
- την εκτίμηση της έκθεσης των καταναλωτών σε δυνητική μόλυνση.
- την αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών για τη βελτίωση τη ποιότητας νερού, όπως η αλλαγή της πηγής με συστήματα πολλαπλών πηγών.
- την τροποποίηση των χρονοδιαγραμμάτων λειτουργίας των αντλιών και πλήρωσης / εκκένωσης των δεξαμενών με στόχο τη μείωση της ηλικίας του νερού.
- τη χρήση σταθμών απολύμανσης σε θέσεις – κλειδιά, ώστε τα διατηρείται το επιθυμητό υπολειμματικό.
- τον σχεδιασμό αποδοτικών προγραμμάτων για τον καθαρισμό και την αντικατάσταση των αντλιών.
- τον σχεδιασμό και τη βελτίωση της υδραυλικής απόδοσης ενός συστήματος.
- Την τοποθέτηση και διαστασιολόγηση αγωγών, αντλιών και βαλβίδων.

Πιο συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης αποτελεί μία βασική εφαρμογή του λογισμικού. Οι μελέτες αυτές έχουν βασικό σκοπό τη λειτουργία του δικτύου ελαχιστοποιώντας το κόστος και ικανοποιώντας είτε τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις είτε τη διατήρηση της ποιότητας νερού (Burgschweiger et al., 2009; McCormick & Powell, 2004; Sakarya & Mays, 2000).

Η βέλτιστη τοποθέτηση βαλβίδων σε δίκτυα διανομής και ο έλεγχος αυτών για τυχόν διαρροές είναι ένα άλλο θέμα με εκτενή αναφορά στη βιβλιογραφία, όπου εφαρμόζεται το EPANET (Araujo et al., 2006; Liberatore & Sechi, 2009; Nicolini & Zovatto, 2009).

Επιπλέον, άλλη μία εφαρμογή του EPANET είναι σε προβλήματα βελτιστοποίησης των θέσεων ποιοτικών αισθητήρων και σταθμών έγκαιρης προειδοποίησης στο δίκτυο (Aral et al., 2009; Avi Ostfeld & Salomons, 2004; Preis & Ostfeld, 2006).

3.3 Δίκτυα αισθητήρων

Τα τυπικά δίκτυα ύδρευσης αποτελούνται από δεξαμενές, αγωγούς και αντλίες παρέχοντας πόσιμο νερό από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού στους καταναλωτές. Ακόμη και ένα δίκτυο μεσαίου μεγέθους μπορεί να έχει εκατοντάδες χιλιόμετρα αγωγών και πολυάριθμα σημεία παροχής, καθιστώντας το αναπόφευκτα ευάλωτα (Preis & Ostfeld, 2008)

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, κρίσιμες υποδομές είναι οι εγκαταστάσεις ή τα δίκτυα, τα οποία, εάν διαταραχθούν, θα επηρέαζαν σε σημαντικό βαθμό την υγεία, την ασφάλεια ή την οικονομική ευμάρεια των πολιτών (Commission, 2004). Λόγω του ζωτικού τους ρόλου τα δίκτυα ύδρευσης συγκαταλέγονται ανάμεσα στις κρίσιμες υποδομές, μαζί συστήματα παραγωγής ενέργειας και τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Τα τελευταία χρόνια, η ασφάλεια αυτών των υποδομών έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον ερευνητών και κρατικών φορέων λόγω των τρομοκρατικών γεγονότων, που έλαβαν χώρα παγκοσμίως.

Τα περιστατικά, που μπορεί να απειλήσουν ένα δίκτυο ύδρευσης μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες ομάδες σύμφωνα με τα μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται για την αντιμετώπισή τους:

1. Άμεση επίθεση σε μία από τις βασικές κατασκευές, όπως τα φράγματα, οι μονάδες επεξεργασίας, οι δεξαμενές αποθήκευσης, οι αγωγοί κλπ.
2. Απενεργοποίηση του συστήματος εποπτικού ελέγχου του νερού και απόκτησης δεδομένων (SCADA), αναλαμβάνοντας τον έλεγχο τμημάτων – κλειδιά, γεγονός που ίσως έχει ως αποτέλεσμα διακοπές νερού ή ανεπάρκεια στην παροχή επεξεργασμένου νερού.
3. Σκόπιμη χημική ή βιολογική πρόσμειξη σε κόμβο του συστήματος.

Η απειλή για άμεση επίθεση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί βελτιώνοντας την ασφάλεια του συστήματος, όπως προσθέτοντας σύστημα συναγερμού, περίφραξη, κάμερες παρακολούθησης κ.α.. Η δεύτερη κατηγορία αντιμετωπίζεται εφαρμόζοντας μέτρα, όπως ένα οπτικό μονωτή ανάμεσα στην επικοινωνία δικτύων, δρομολογητές για να περιορίσουν τη μεταφορά δεδομένων κ.α.. Η σκόπιμη χημική ή βιολογική πρόσμειξη είναι η πιο δύσκολη περίπτωση να αντιμετωπιστεί, λόγω της αβεβαιότητας του τύπου της πρόσμειξης και τις επιπτώσεις του καθώς και της αβεβαιότητας της τοποθεσίας και του χρόνου, που έλαβε χώρα η επίθεση (Preis & Ostfeld, 2008).

Η σκόπιμη ή τυχαία εισαγωγή μίας χημικής ουσίας στα δίκτυα ύδρευσης μπορεί δυνητικά να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, όπως επίσης κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Τέτοιες εισβολές μπορούν δυνητικά να ανιχνευθούν τοποθετώντας έναν αριθμό αισθητήρων στο δίκτυο διανομής. Εξοπλίζοντας κάθε κόμβο του δικτύου είναι απαγορευτικά δαπανηρό και συνεπώς η βέλτιστη τοποθέτηση αισθητήρων γίνεται ένα πρόβλημα ζωτικής σημασίας. Για μεγάλα δίκτυα διανομής με δεκάδες χιλιάδες μέχρι και εκατομμύρια κόμβους, η βελτιστοποίηση του προβλήματος αποτελεί μία δύσκολη υπολογιστικά πρόκληση (Krause et al., 2008).

Με την εγκατάσταση σταθμών παρακολούθησης σε όλο το δίκτυο δημιουργείται ένα σύστημα ανίχνευσης και έγκαιρης προειδοποίησης (Early Warning Detection System – EWDS). Στόχος του είναι να αναγνωρίζει αξιόπιστα ένα επεισόδιο μόλυνσης (σκόπιμο ή τυχαίο) στην πηγή ή στο δίκτυο διανομής, σε επαρκή χρόνο, ώστε να μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά, δηλαδή να μειωθούν ή και να αποφευχθούν οι επιπτώσεις (Avi Ostfeld & Salomons, 2004).

3.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα τελευταία χρόνια μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει ασχοληθεί με το θέμα της εγκατάστασης αισθητήρων στα δίκτυα ύδρευσης, με κύρια προσπάθεια τη “Μάχη των Δικτύων Αισθητήρων Νερού” (BWSN), κατά την οποία συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν 15 διαφορετικές προσεγγίσεις του θέματος στο πλαίσιο του όγδοου Ετήσιου Συμποσίου με θέμα την “Ανάλυση των Δικτύων Διανομής Νερού” (Ostfeld et al., 2008).

Πρόσφατα, η βιβλιογραφία έχει επικεντρωθεί περισσότερο στη βελτιστοποίηση της διάταξης των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης μέσα στο δίκτυο ύδρευσης λαμβάνοντας υπόψη τις σκόπιμες βιολογικές και χημικές επιθέσεις και την εκτίμηση της επικινδυνότητας σε ενδεχόμενη έκθεση του πληθυσμού στην ρύπανση (Aral et al., 2009).

Πολλά κριτήρια σχεδιασμού, που ανταγωνίζονται μεταξύ τους, χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή για την εγκατάσταση αισθητήρων σε δίκτυα. Ωστόσο, η ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου στην ανθρώπινη υγεία αποτελεί έναν, ευρέως, αποδεκτό στόχο και γι’ αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι κριτηρίων σχετικών με την ανθρώπινη υγεία, όπως το πλήθος των ατόμων που έχουν εκτεθεί στη ρύπανση ή το πλήθος των ατόμων που έχουν λάβει ποσότητα πάνω από ένα κατώφλι. Επιπλέον, μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί με βάση κριτήρια, όπως η ελαχιστοποίηση του μεγέθους της ρύπανσης στο δίκτυο αγωγών, ο χρόνος ανίχνευσης ή το ποσοστό των περιπτώσεων ρύπανσης που δεν έχουν ανιχνευτεί (Hart & Murray, 2010).

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης της διάταξης αισθητήρων σε δίκτυα, η επιλογή της στοχαστικής συνάρτησης επηρεάζει άμεσα το αποτέλεσμα. Στη βιβλιογραφία, τα περισσότερα μοντέλα

χρησιμοποιούν μία στοχική συνάρτηση. Μερικά παραδείγματα είναι τα ακόλουθα: (1) ελαχιστοποίηση της ποσότητας νερού που έχει καταναλωθεί μετά τη ρύπανση (Kessler et al., 1998); (2) ελαχιστοποίηση του χρόνου ανίχνευσης (Kumar et al., 1999); (3) μεγιστοποίηση της κάλυψης και της πιθανότητας ανίχνευσης (Ostfeld & Salomons, 2004) και (4) ελαχιστοποίηση του πληθυσμού που επηρεάζεται από τη ρύπανση (Berry et al., 2005).

Στην πραγματικότητα, βέβαια, η βελτιστοποίηση του δικτύου αισθητήρων αποτελεί ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα απόφασης. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μερικά μοντέλα, που χρησιμοποιούν πολυκριτηριακή προσέγγιση της λύσης (Ostfeld & Salomons, 2004; Propato, 2006; Watson et al., 2004). Το γεγονός αυτό, ίσως, οφείλεται στο ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί να γίνει εξαιρετικά ανεπαρκής για μία λύση ακέραίου προγραμματισμού. Αυτό συμβαίνει, καθώς το πρόβλημα περιλαμβάνει χιλιάδες μεταβλητές στη περίπτωση ενός μεγάλου δικτύου ύδρευσης ή στην περίπτωση που προκύπτουν πολλές εφικτές λύσεις, η επιλογή του τελικού σχεδιασμού συχνά διακυβεύεται μιας και η τελική επιλογή μπορεί να εκφράζει τις προτιμήσεις ή την οπτική του διαχειριστή (Aral et al., 2009).

Οι Aral et al. (2009) ανέπτυξαν μία μεθοδολογία που στοχεύει, μεταξύ άλλων, να λύσει το πρόβλημα επιλογής ανάμεσα σε μονο- και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, καθώς διαμόρφωσαν μία συνθετική στοχική συνάρτηση που μπορεί να μιμηθεί την πολυκριτηριακή προσέγγιση. Επίσης, ανέπτυξαν ένα μοντέλο μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης που ενσωματώνει τα τέσσερα κριτήρια που υιοθετήθηκαν στην Μάχη των Δικτύων Αισθητήρων Νερού (BWSN 2006).

3.3.2 The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN)

Την τελευταία δεκαετία υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη δικτύων αισθητήρων με στόχο την αντιμετώπιση εσκεμμένων αλλά και τυχαίων επικίνδυνων εισροών στα δίκτυα διανομής νερού. Μοντέλα βελτιστοποίησης και αλγόριθμοι επίλυσης του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί για να εντοπίσουν τις πιο αποδοτικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων. Αυτά τα μοντέλα βελτιστοποίησης και οι αλγόριθμοι επίλυσης αφορούν την απλούστευση παραδοχών σχετικών με τους στόχους σχεδιασμού, το δίκτυο μεταφοράς ρύπων, την απόκριση των αισθητήρων, την ανίχνευση του γεγονότος ρύπανσης, τα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης κ.α.. Ωστόσο, λίγα γνωρίζουμε σχετικά με το πώς αυτοί οι αλγόριθμοι σχεδιασμού αποκρίνονται σε μία μεθοδολογία σχεδιασμού συγκριτικά με μία άλλη, και επιπλέον ποια πλεονεκτήματα προσφέρουν στον πρακτικό σχεδιασμό δικτύων αισθητήρων. Στο πλαίσιο της διερεύνησης αυτών των θεμάτων, πραγματοποιήθηκε η “Μάχη των Δικτύων Αισθητήρων Νερού”, γνωστή ως “The Battle of the

Water Sensor Networks” (BWSN) , ως μέρος του όγδοου Ετήσιου Συμποσίου με θέμα την “Ανάλυση των Δικτύων Διανομής Νερού”, στο Σινσινάτι την περίοδο 27-29 Αυγούστου 2006.

Η BWSN είχε κύριο σκοπό να συγκρίνει αντικειμενικά την επίδοση των μελετών για τα δίκτυα αισθητήρων, όπως αυτά εφαρμόστηκαν σε δύο παραδείγματα δικτύων διανομής. Σε αυτή την προσπάθεια συμμετείχαν δεκαπέντε ανεξάρτητες ερευνητικές ομάδες και μηχανικοί, οι οποίοι κατέθεσαν τις μελέτες τους. Όλες οι ομάδες ζητήθηκαν να αναπτύξουν μελέτες σύμφωνα με ένα πλαίσιο κανόνων, το οποίο προσδιόριζε τις μετρήσεις της επίδοσης της μελέτης και τα χαρακτηριστικά των επεισοδίων ρύπανσης. Οι ομάδες ήταν ελεύθερες να αναπτύξουν τα σχέδια και τις μεθοδολογίες τους, ωστόσο η σύγκριση των τελικών προτάσεων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τις ίδιες διαδικασίες για όλες τις ομάδες (Ostfeld et al., 2008).

Οι ομάδες εργασίας ήταν υποχρεωμένες να χρησιμοποιήσουν τις ακόλουθες τέσσερις ποιοτικές στοχικές συναρτήσεις:

1. Αναμενόμενος χρόνος ανίχνευσης επεισοδίου ρύπανσης (Z_1)

Για ένα συγκεκριμένο επεισόδιο ρύπανσης, ο χρόνος ανίχνευσης από έναν αισθητήρα είναι ο χρόνος που έχει παρέλθει από την έναρξη του επεισοδίου της ρύπανσης μέχρι την πρώτη μη μηδενική τιμή συγκέντρωσης της χημικής ουσίας. Ο χρόνος της πρώτης ανίχνευσης, t_j , αναφέρεται στη j τοποθεσία αισθητήρα. Επομένως, ο χρόνος ανίχνευσης της ρύπανσης, t_d , είναι η ελάχιστη τιμή από τις t_j .

$$t_d = \min t_j \quad (3.10)$$

Η στοχική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι η αναμενόμενη τιμή, που υπολογίστηκε πάνω από την κατανομή πιθανότητας των επεισοδίων ρύπανσης:

$$Z_1 = E(t_d), \quad (3.11)$$

όπου $E(t_d)$: η αναμενόμενη τιμή του ελάχιστου χρόνου ανίχνευσης t_d .

2. Πληθυσμός που αναμένεται να επηρεαστεί πριν την ανίχνευση (Z_2)

Για ένα συγκεκριμένο σενάριο μόλυνσης, ο πληθυσμός που επηρεάζεται είναι συνάρτηση της μάζας των ρύπων που έχει καταναλωθεί. Η καταναλισκόμενη μάζα εξαρτάται από τον χρόνο ανίχνευσης της ρύπανσης. Ο πληθυσμός που επηρεάζεται P_a , για ένα δεδομένο σενάριο ρύπανσης υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{\alpha} = \sum_{i=1}^V R_i P_i, \quad (3.12)$$

όπου R_i : η πιθανότητα $[0,1]$ ένα άτομο που καταναλώνει μολυσμένο νερό να εμφανίσει συμπτώματα

P_i : ο πληθυσμός που αντιστοιχεί στον κόμβο i

V : το πλήθος των κόμβων

Η στοχική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι η αναμενόμενη τιμή της P_{α} , που υπολογίστηκε πάνω από την κατανομή πιθανότητας των επεισοδίων ρύπανσης:

$$Z_2 = E(P_{\alpha}), \quad (3.13)$$

όπου $E(P_{\alpha})$: η αναμενόμενη τιμή του πληθυσμού P_{α} .

3. Αναμενόμενη κατανάλωση μολυσμένου νερού πριν την ανίχνευση (Z_3)

Z_3 : αναμενόμενος όγκος μολυσμένου νερού που καταναλώθηκε πριν την ανίχνευση της μόλυνσης

$$Z_3 = E(V_d), \quad (3.14)$$

όπου V_d : η συνολική ογκομετρική κατανάλωση νερού με συγκέντρωση χημικής ουσίας που υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο επικινδυνότητας.

$E(V_d)$: η αναμενόμενη τιμή της V_d .

4. Πιθανότητα ανίχνευσης (Z_4)

Με δεδομένο ένα δίκτυο αισθητήρων (πλήθος και θέσεις) η πιθανότητα ανίχνευσης υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Z_4 = \frac{1}{S} \sum_{r=1}^S d_r, \quad (3.15)$$

όπου $d_r = 1$ εάν το σενάριο μόλυνσης r ανιχνευθεί και σε αντίθετη περίπτωση $d_r = 0$.

S : ο συνολικός αριθμός σεναρίων μόλυνσης που λήφθηκαν υπόψη.

Η στοχική συνάρτηση Z_4 μεγιστοποιείται.

Όπως προαναφέρθηκε, δεκαπέντε μελέτες υποβλήθηκαν στο πλαίσιο του BWSN και εδώ δίνεται μία σύντομη περιγραφή της κάθε συμμετοχής.

Οι Alzamora and Ayala (2006) εφάρμοσαν έναν τοπολογικό αλγόριθμο για να υπολογίσουν τη βέλτιστη θέση των αισθητήρων για την ανίχνευση επεισοδίων ρύπανσης. Οι Berry et al. (2005) πρότειναν μία μέθοδο μικτού ακέραιου προγραμματισμού (mixed-integer programming), που περιλαμβάνει τα προσωρινά χαρακτηριστικά των γεγονότων ρύπανσης και των συνεπειών τους. Με βάση τις χρονοσειρές συγκέντρωσης σε κάθε κόμβο υπολογίζεται η επίδραση της ρύπανσης στο χρόνο και ορίζονται οι κόμβοι που επηρεάζονται. Αυτό είναι το πρώτο MIP μοντέλο που βασίζει τη βελτιστοποίηση αισθητήρων σε τέτοιου είδους δεδομένα. Το MIP μοντέλο είναι ισοδύναμο με το πρόβλημα χωροθέτησης p -μέσων (p -median facility location problem), το οποίο αργότερα λύθηκε χρησιμοποιώντας μία ευριστική μέθοδο. Οι Dorini et al. (2006) πρότειναν ένα πλαίσιο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με περιορισμό τον αριθμό των αισθητήρων, το οποίο επιτρέπει τον nCELS αλγόριθμο (noisy cross-entropy sensor locator), που βασίζεται στη μέθοδο cross-entropy που προτάθηκε από τον Rubinstein (1999). Οι Eliades and Polycarpou (2006) πρότειναν ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο βελτιστοποίησης. Στην πρακτική εφαρμογή, λόγω του μεγάλου μεγέθους των δικτύων ύδρευσης, το εύρος των πιθανών λύσεων επεκτείνεται δραματικά, καθιστώντας δύσκολη ή και αδύνατη η εύρεση βέλτιστων λύσεων. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος αναζήτησης “Iterative Deepening of Pareto Solutions”, για να εντοπίσει τις “αρκετά καλές” λύσεις. Πιο συγκεκριμένα ο αλγόριθμος λύνει το πρόβλημα επιλέγοντας επαναληπτικά τις καλύτερες μη-κυριαρχούμενες λύσεις, τις οποίες επεκτείνει αυξάνοντας το βάθος του δέντρου αναζήτησης μέχρι να χρησιμοποιηθούν όλοι οι αισθητήρες. Άλλη μία προσέγγιση ήταν των Ghimire and Barkdoll (2006), η οποία ήταν ευριστική και βασίστηκε στη ζήτηση. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την πρώτη προσέγγιση οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στους κόμβους με τις υψηλότερες ζητήσεις, με τη λογική ότι η έγχυση της χημικής ουσίας θα διαχυθεί μέσω της ροής, η οποία κατευθύνεται προς τους κόμβους με υψηλή ζήτηση. Σύμφωνα με τη δεύτερη προσέγγιση οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στους κόμβους όπου απελευθερώνεται μεγαλύτερη μάζα χημικής ουσίας, με τη λογική ότι ο ρύπος σε αντίθεση με άλλες μεταβλητές έχει άμεσο αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία. Οι Guan et al. (2006) πρότειναν μία μεθοδολογία προσομοίωσης – βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει γενετικό αλγόριθμο και βασίζεται σε μία στοχαστική συνάρτηση στην οποία έχουν ενσωματωθεί και οι τέσσερις ποιοτικές στοχαστικές συναρτήσεις. Η συμμετοχή του Gueli (2006) πρότεινε ένα predator – prey μοντέλο που εφαρμόστηκε σε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση και βασίστηκε σε μία εξελικτική διαδικασία. Οι Huang et al. (2006) πρότειναν μία πολυκριτηριακή προσέγγιση με γενετικούς αλγόριθμους σε συνδυασμό με εξόρυξη δεδομένων. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος,

δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων, η οποία αποθηκεύει δεδομένα για γεγονότα «εισβολής» σε κάθε κόμβο και τις ταξινομημένες συνέπειες αυτών σε κάθε κόμβο. Μία διαφορετική προσέγγιση ήταν αυτή των Krause et al. (2008), η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός άπληστου αλγορίθμου για την εύρεση των θέσεων των αισθητήρων, με τη διαφορά ότι οι στοχαστικές συναρτήσεις Z_i ($i= 1, 2, 3$) υπολογίστηκαν μόνο για τα σενάρια που ανιχνεύθηκαν με αποτέλεσμα να μην ληφθούν υπόψη οι συνέπειες των υπόλοιπων σεναρίων, γεγονός που μπορεί να είναι κρίσιμης σημασίας. Οι Avi Ostfeld and Salomons (2004) και οι Preis and Ostfeld (2006) χρησιμοποίησαν τον πολυκριτηριακό αλγόριθμο NSGA-II. Οι Propato (2006) χρησιμοποίησαν μικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό. Η αβεβαιότητα για την τιμή της συνάρτησης κόστους λόγω του μεγέθους του χρονικού βήματος αναφοράς μπορεί να υπολογιστεί. Αυτό επιτρέπει στο μελετητή (1) να εκτιμήσει τη θεωρητική κατώτερη τιμή του κόστους και έτσι να αποφασίσει εάν η λύση είναι αποδεκτή ή όχι και (2) να ορίσει ένα λογικό κριτήριο για να αποφασίσει ένα μέγεθος του συνόλου των γεγονότων ρύπανσης. Ο Trachtman (2006) πρότεινε μία προσέγγιση του «αχυρανθρώπου» από την πλευρά των μηχανικών λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η κατανομή του πληθυσμού, η πίεση του συστήματος, οι θέσεις κρίσιμων καταναλωτών, οι εγκαταστάσεις του συστήματος, το κόστος κ.α. Οι Wu και Walski (2006) χρησιμοποίησαν πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, η οποία λύθηκε με γενετικό αλγόριθμο και τα σενάρια ρύπανσης παρήχθησαν τυχαία με Monte Carlo προσομοίωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Μεθοδολογία βελτιστοποίησης χωροθέτησης ποιοτικών αισθητήρων

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν για τη ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την εκτίμηση της βέλτιστης τοποθέτησης ποιοτικών αισθητήρων σε δίκτυα ύδρευσης. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, μέσω του οποίου συνδέθηκε το λογισμικό του EPANET με τον πολυκριτηριακό γενετικό αλγόριθμο του Matlab.

Πρώτο στάδιο ήταν η επιλογή των αντικειμενικών συναρτήσεων (objective functions), που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν σενάρια έγχυσης χημικής ουσίας στο δίκτυο, τα οποία καλύπτουν κάθε πιθανό χρονικό διάστημα για εισαγωγή χημικής ουσίας μέσα στο χρόνο προσομοίωσης (π.χ. 48 h) και κάθε κόμβο του δικτύου. Επόμενο στάδιο ήταν η επιλογή δικτύων ύδρευσης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου και στη συνέχεια η υδραυλική και ποιοτική προσομοίωση των δικτύων μέσω του EPANET για τα σενάρια που επιλέχθηκαν, τα αποτελέσματα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων. Τέλος, εφαρμόστηκε ο γενετικός αλγόριθμος του Matlab για τρία σενάρια με διαφορετικό πλήθος αισθητήρων και προέκυψαν τα μέτωπα Pareto για κάθε σενάριο.

4.2 Μεθοδολογία

Συνοπτικά, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε αποτελείται από τα εξής έξι βήματα:

1. Επιλογή κατάλληλων αντικειμενικών συναρτήσεων.
2. Δημιουργία σεναρίων έγχυσης χημικής ουσίας στο δίκτυο.
3. Προσομοίωση σεναρίων στο EPANET.
4. Υπολογισμός αντικειμενικών συναρτήσεων.
5. Βελτιστοποίηση.
6. Επαλήθευση.

4.2.1 Επιλογή αντικειμενικών συναρτήσεων

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, λόγω του κόστους, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός αισθητήρων μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα δίκτυο διανομής νερού. Το γεγονός αυτό απαιτεί ο αισθητήρας να ανιχνεύει όχι μόνο όσο το δυνατόν περισσότερα επεισόδια ρύπανσης αλλά και να ανιχνεύει το επεισόδιο όσο το δυνατόν ταχύτερα γίνεται. Συνεπώς, οι A. Ostfeld et al. (2008) αναγνώρισε 4 στοχικές συναρτήσεις για το πρόβλημα της τοποθέτησης αισθητήρων:

- Αναμενόμενος χρόνος ανίχνευσης επεισοδίου ρύπανσης (Z_1)
- Πληθυσμός που αναμένεται να επηρεαστεί πριν την ανίχνευση (Z_2)
- Αναμενόμενη κατανάλωση μολυσμένου νερού πριν την ανίχνευση (Z_3)
- Πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίου (Z_4)

Στην παρούσα εργασία οι αντικειμενικές Z_2 και Z_3 ενσωματώνονται σε μία, καθώς τα δίκτυα ύδρευσης που θα διερευνηθούν θεωρούνται αστικά και ο πληθυσμός θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένος όπως και η ζήτηση του νερού σε όλο το δίκτυο και προστίθενται δύο νέες συναρτήσεις. Επομένως, οι αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για βελτιστοποίηση στην παρούσα εργασία διαμορφώνονται ως εξής:

1. Αναμενόμενος χρόνος ανίχνευσης επεισοδίου ρύπανσης (Z_1) (hr)

Για ένα συγκεκριμένο επεισόδιο ρύπανσης, ο χρόνος ανίχνευσης από έναν αισθητήρα είναι ο χρόνος που έχει παρέλθει από την έναρξη του επεισοδίου της ρύπανσης μέχρι την πρώτη μη μηδενική τιμή συγκέντρωσης της χημικής ουσίας. Ο χρόνος της πρώτης ανίχνευσης, t_j , αναφέρεται στη j τοποθεσία αισθητήρα. Επομένως, ο χρόνος ανίχνευσης της ρύπανσης, t_d , είναι η ελάχιστη τιμή από τις t_j .

$$t_d = \min t_j \quad (4.1)$$

Η στοχική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι η αναμενόμενη τιμή, που υπολογίστηκε πάνω από την κατανομή πιθανότητας των επεισοδίων ρύπανσης:

$$Z_1 = E(t_d), \quad (4.2)$$

όπου $E(t_d)$: η αναμενόμενη τιμή του ελάχιστου χρόνου ανίχνευσης t_d .

2. Πιθανότητα ανίχνευσης (Z_2)

Με δεδομένο ένα δίκτυο αισθητήρων (πλήθος και θέσεις) η πιθανότητα ανίχνευσης υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Z_2 = \frac{1}{S} \sum_{r=1}^S d_r, \quad (4.3)$$

όπου $d_r = 1$ εάν το σενάριο μόλυνσης r ανιχνευθεί και σε αντίθετη περίπτωση $d_r = 0$.

S : ο συνολικός αριθμός σεναρίων μόλυνσης που λήφθηκαν υπόψη.

Η στοχική συνάρτηση Z_2 μεγιστοποιείται.

3. Αναμενόμενη κατανάλωση μολυσμένου νερού πριν την ανίχνευση (Z_3) (m^3)

$$Z_3 = E(V_d), \quad (4.4)$$

όπου Z_3 : αναμενόμενος όγκος μολυσμένου νερού που καταναλώθηκε πριν την ανίχνευση της μόλυνσης.

V_d : η συνολική ογκομετρική κατανάλωση νερού με συγκέντρωση ρύπων που υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο επικινδυνότητας.

$E(V_d)$: η αναμενόμενη τιμή της V_d .

Η στοχική συνάρτηση Z_3 ελαχιστοποιείται.

4. Πλήθος αισθητήρων (Z_4)

Το πλήθος αισθητήρων είναι μία μεταβλητή του προβλήματος που συνδέεται άμεσα με όλες τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις και κατά συνέπεια η διακύμανσή της επιφέρει αλλαγές στις τιμές τους. Για να διαπιστώσουμε το μέγεθος της μεταβολής των στοχικών συναρτήσεων, όπως η πιθανότητα ή ο χρόνος ανίχνευσης, εισήχθη το πλήθος αισθητήρων ως μεταβλητή σε ορισμένα σενάρια βελτιστοποίησης, που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή το κόστος ενός δικτύου αισθητήρων είναι συνάρτηση του πλήθους των αισθητήρων, τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης μπορούν να συμβάλλουν στην λήψη αποφάσεων σχετικά με το μέγεθος του δικτύου.

5. Χρόνος ανίχνευσης (δεύτερη προσέγγιση) (Z_1^*) (hrs)

Εκτός από τον χρόνο ανίχνευσης (Z_1), έγινε μία άλλη προσέγγιση του χρόνου με την εισαγωγή της αντικειμενικής Z_1^* . Ουσιαστικά, η Z_1^* εκτιμάται μέσω του ίδιου τύπου αλλά οι πρώτοι χρόνοι ανίχνευσης κάθε σεναρίου υπολογίζονται διαφορετικά. Πιο συγκεκριμένα, στη περίπτωση που δεν προκύπτει από την προσομοίωση ανίχνευση του επεισοδίου, θεωρούμε

χρόνο ανίχνευσης ίσο με τον χρόνο προσομοίωσης. Σε αντίθετη περίπτωση (όπως στη Ζ₁) δεν τίθεται κάποια τιμή στο χρόνο (NaN value) με αποτέλεσμα να προκύπτει «πλασματικά» μειωμένος χρόνος ανίχνευσης.

4.2.2 Δημιουργία σεναρίων έγχυσης χημικής ουσίας στο δίκτυο

Για να εκτιμηθούν οι επιθυμητές αντικειμενικές συναρτήσεις πρέπει να δημιουργηθεί αρχικά ένα μητρώο γεγονότων έγχυσης χημικής ουσίας στο δίκτυο, για το οποίο απαιτείται να γίνουν παραδοχές σχετικά με τον αριθμό, τη θέση, το χρόνο έναρξης, το ρυθμό έγχυσης και τη διάρκεια των «επιθέσεων». Υποθέσαμε ότι γίνεται επίθεση σε ένα σημείο του δικτύου κάθε φορά και πιο συγκεκριμένα η έγχυση πραγματοποιείται τυχαία σε οποιοδήποτε κόμβο του συστήματος, όπου είναι πιο ευάλωτος σε επιθέσεις αλλά παράλληλα πιο εύκολο να παρακολουθείται με τη χρήση αισθητήρα. Ο χρόνος έναρξης επιλέγεται τυχαία από την προκαθορισμένη περίοδο προσομοίωσης του δικτύου και η έγχυση γίνεται με παροχή 125 liter/hr, συγκέντρωση χημικής ουσίας ίση με 230.000 mg/l και διάρκεια ίση με 2 hrs.

Σύμφωνα με αυτές τις παραδοχές προκύπτει ένα δυαδικό μητρώο διαστάσεων (n × m), όπου οι γραμμές (n) αναφέρονται στους κόμβους του δικτύου, οι στήλες (m) στο χρονικό διάστημα προσομοίωσης με βήμα ίσο με αυτό του χρονοδιαγράμματος κάθε δικτύου. Το μητρώο λαμβάνει τιμές 0 και 1, οι οποίες αναφέρονται σε μολυσμένους και μη μολυσμένους κόμβους αντίστοιχα. Συνεπώς, το μητρώο καλύπτει κάθε πιθανό δίκτυο για εισαγωγή χημικής ουσίας μέσα στο χρόνο προσομοίωσης και κάθε κόμβο του δικτύου. Στο Σχ. 4.1 παρουσιάζεται το τμήμα ενός μητρώου, όπως αυτό αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Matlab, για δίκτυο με 263 κόμβους και χρονικό βήμα ίσο με 1 h.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Σχήμα 4.1: Παράδειγμα μητρώου έγχυσης χημικής ουσίας.

Καθώς τα επεισόδια ρύπανσης μπορούν να συμβούν σε οποιοδήποτε κόμβο οποιαδήποτε χρονική στιγμή, ο δυνατός αριθμός επεισοδίων αυξάνει σημαντικά συναρτήσει του μεγέθους του δικτύου και κατά συνέπεια γίνεται αδύνατη η επίλυση του προβλήματος για όλα τα πιθανά γεγονότα. Για αυτό το λόγο, επιλέγεται τυχαία (Monte Carlo) ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός σεναρίων και παράλληλα εύκολα υπολογίσιμος σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$ScenNum = \min[10\% \times TotalScen, 1000], \quad (4.5)$$

όπου *ScenNum*: το επιλεγμένο πλήθος σεναρίων,

TotalScen: το συνολικό πλήθος των σεναρίων

4.2.3 Προσομοίωση σεναρίων στο EPANET

Η υδραυλική προσομοίωση των δικτύων έγινε με το λογισμικό EPANET (Έκδοση 2.00.12). Η σύνδεση του EPANET με το Matlab έγινε με τη βοήθεια του EPANET – Matlab Class. Το EPANET – Matlab Class είναι ένα ανοιχτό λογισμικό, το οποίο λειτουργεί στο περιβάλλον του Matlab παρέχοντας τη δυνατότητα προγραμματισμού για το EPANET με το Matlab. Επιπλέον, με χρήση εντολών ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει, να προσομοιώσει και να προβάλει αποτελέσματα, όπως αυτά προέκυψαν από τις βιβλιοθήκες του EPANET. Το βασικό δεδομένο, που απαιτείται είναι η εισαγωγή ενός δικτύου σε μορφή αρχείου .inp.

Πρέπει να σημειωθεί ότι προσομοιώνεται η υδραυλική λειτουργία του δικτύου καθώς και η εξέλιξη της ποιότητας νερού στο δίκτυο. Τα δεδομένα εισαγωγής στο EPANET είναι τα εξής:

1. Συντεταγμένες, υψόμετρο και ζήτηση νερού στους κόμβους.
2. Χρονοδιάγραμμα ζήτησης (Demand Pattern).
3. Αρχική ποιότητα νερού στους κόμβους και ποιότητα του νερού, που τυχόν εισάγεται στον κόμβο.
4. Διάμετρος, μήκος και συντελεστής τραχύτητας αγωγών.
5. Υψόμετρο πυθμένα δεξαμενών και μέγιστη/ ελάχιστη στάθμη ύδατος.
6. Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλιών.

Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε μηδενική αρχική συγκέντρωση χημικής ουσίας και η εισαγωγή της χημικής ουσίας γίνεται μέσω του Source Quality editor του EPANET, που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποιότητα της πηγής σε ένα συγκεκριμένο κόμβο και επιλέγεται ο τύπος Mass Booster.

Από την προσομοίωση του δικτύου προκύπτουν και αποθηκεύονται σε μητρώα τα εξής μεγέθη:

- Τα βασικά υδραυλικά μεγέθη, όπως το υδραυλικό φορτίο και η πίεση.

- Χρονοσειρά της ζήτησης νερού σε κάθε κόμβο.
- Χρονοσειρά της συγκέντρωσης της χημικής ουσίας, που έχει επιλεγθεί (π.χ. χλώριο) σε κάθε κόμβο.
- Ο χρόνος και ο κόμβος, στον οποίο γίνεται η εισαγωγή χημικής ουσίας σε κάθε σενάριο.

4.2.4 Υπολογισμός αντικειμενικών συναρτήσεων

Επόμενο βήμα της μεθοδολογίας με βάση τα αποτελέσματα από την προσομοίωση είναι ο υπολογισμός των βασικών μεγεθών που εισέρχονται στις στοχαστικές συναρτήσεις. Τα μεγέθη που υπολογίζονται σε αυτό το βήμα είναι τα εξής:

- Χρόνος εισαγωγής της χημικής ουσίας, όπως αυτός ορίζεται από το μητρώο έγχυσης χημικής ουσίας στο δίκτυο.
- Πρώτος χρόνος ανίχνευσης, ο οποίος ορίζεται ως ο μικρότερος χρόνος που εντοπίζεται συγκέντρωση χημικής ουσίας σε κάθε κόμβο.
- Όγκος νερού που καταναλώθηκε από τη χρονική στιγμή της εισαγωγής χημικής ουσίας μέχρι τη στιγμή ανίχνευσής του με συγκέντρωση μεγαλύτερη από την τιμή – κατώφλι 0,3 mg/l (μόνο για τον υπολογισμό της Z_3).
- Πιθανότητα ανίχνευσης επεισοδίου.

Με στόχο την απλοποίηση των υπολογισμών, έγιναν οι παραδοχές ότι αμέσως μετά την ανίχνευση της αυξημένης συγκέντρωσης χημικής ουσίας διακόπτεται η παροχή νερού στο δίκτυο με αποτέλεσμα να μην έχουμε περαιτέρω κατανάλωση νερού και τα γεγονότα μόλυνσης που δεν έχουν ανιχνευθεί δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση στο EPANET πραγματοποιείται μία φορά πριν την βελτιστοποίηση και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε μεταγενέστερα στάδια (σενάρια βελτιστοποίησης) ανακτώνται κάθε φορά από τα αποθηκευμένα δεδομένα στη μνήμη του υπολογιστή, καθώς αυτά χρησιμοποιούνται επανειλημμένα στη βελτιστοποίηση. Αυτή η προσέγγιση μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο και επιτρέπει τη διερεύνηση πολλών σεναρίων βελτιστοποίησης.

4.2.5 Βελτιστοποίηση

Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με τον πολυκριτηριακό γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης του Matlab, ο οποίος αποτελεί παραλλαγή του GA NSGA-II, που βελτιστοποιεί ταυτόχρονα περισσότερα από ένα κριτήρια (Deb et al., 2002).

Ο πολυκριτηριακός εκλεκτικός ΓΑ του MATLAB καλείται με την εντολή 'gamultiobj' χρησιμοποιώντας και εξελίσσοντας έναν πληθυσμό με τους γνωστούς γενετικούς τελεστές για την αναπαραγωγή του. Ο πληθυσμός ορίζεται ως ένα σύνολο σημείων στο χώρο αναζήτησης. Ο αρχικός πληθυσμός ορίζεται είτε από το χρήστη, είτε τυχαία. Στη δεύτερη περίπτωση ο αρχικός πληθυσμός γεννάται με τη χρήση ομοιόμορφης κατανομής. Η επόμενη γενιά παράγεται με αξιολόγηση των σχέσεων μη κυριαρχίας και της διασποράς των λύσεων πάνω στο μέτωπο Pareto, που υπολογίζεται με την απόσταση συνωστισμού (όπως αναλυτικά έχει περιγραφεί στην ενότητα 2.4.3). Το δεύτερο αυτό κριτήριο επιτρέπει την επιλογή ατόμων από τον πληθυσμό, που ενδέχεται να έχουν ακόμα και ελαφρώς μικρότερη επίδοση.

Στον ΓΑ του MATLAB έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη σημασία διατήρησης των λύσεων πάνω στο μέτωπο με ικανοποιητική διασπορά με ταυτόχρονο έλεγχο των καλύτερων ατόμων (elite) του πληθυσμού καθώς ο αλγόριθμος εξελίσσει τη διαδικασία. Το γεγονός ότι γίνεται κατάταξη των ατόμων με βάση τη σχέση μη κυριαρχίας καθιστά αυτόματη την εισαγωγή ελιτισμού χωρίς να είναι απαραίτητος ο ορισμός του αριθμού των καλύτερων ατόμων προς διατήρηση στο νέο πληθυσμό, όπως συμβαίνει στην περίπτωση μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ο χρήστης ορίζει δύο βασικές επιπλέον παραμέτρους που διαχωρίζουν την πολυκριτηριακή από την μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Πρόκειται για το χώρο στον οποίο ελέγχεται αυτή η διασπορά των λύσεων (*χώρος αναζήτησης ή χώρος αποτίμησης – genotype ή phenotype space*) και για το ποσοστό των ατόμων του πληθυσμού που κατά μέγιστο μπορούν σε κάθε γενιά να βρίσκονται στο πρώτο μη κυριαρχούμενο μέτωπο (*Pareto Fraction*). Με τις δύο αυτές παραμέτρους καθορίζεται εν μέρει η μορφή του μετώπου Pareto που εξάγεται από τον αλγόριθμο σε συνεχή χρόνο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Γραμμικοί περιορισμοί καθώς και όρια διακύμανσης για τις μεταβλητές απόφασης είναι ακόμα δυνατόν να ορίζονται, ενώ μη γραμμικοί περιορισμοί υφίστανται μόνο στη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Ο ΓΑ του MATLAB είναι ικανός να δώσει λύσεις σε ομαλά και μη ομαλά προβλήματα βελτιστοποίησης με μη κυρτές συνεχείς ή μη συναρτήσεις (MATLAB, 2015a). Όπως κάθε ΓΑ, έτσι και ο ΓΑ του MATLAB ακολουθεί τα γνωστά βήματα για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δηλαδή: αξιολόγηση ατόμων πληθυσμού με βάση το μέτρο επίδοσης, διαβάθμιση καταλληλότητας ατόμων, επιλογή ατόμων (γονέων), αναπαραγωγή πληθυσμού μέσω ελιτισμού, διασταύρωσης και μετάλλαξης, τερματισμός διαδικασίας όταν κάποιο κριτήριο ικανοποιηθεί.

Οι πιο σημαντικές παράμετροι για την προσέγγιση του βέλτιστου μετώπου Pareto στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με τον ΓΑ του MATLAB αναμένεται να είναι το μέγεθος του πληθυσμού και ο μέγιστος αριθμός γενεών μέχρι τον τερματισμό της διαδικασίας. Δυστυχώς όμως, μεγάλος πληθυσμός και αριθμός γενεών εγγυώνται το επιθυμητό αποτέλεσμα μετά από

μεγάλο χρονικό διάστημα εκτέλεσης της διαδικασίας. Ο μεγάλος πληθυσμός συνεπάγεται περισσότερα άτομα κατά τη διαδικασία της εξέλιξης, άρα και μεγαλύτερη πιθανότητα να παραχθούν καλύτεροι απόγονοι. Μεγάλος αριθμός γενεών επιτρέπει την παραγωγή πολλών πληθυσμών και την αξιολόγηση πολλών λύσεων με αποτέλεσμα να ανακαλύπτονται συνεχώς καλύτερες. Ο χρόνος όμως που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι ένας περιοριστικός παράγοντας αφού είναι επιθυμητό η ολοκλήρωσή της να πραγματοποιείται σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Στην παρούσα εργασία τα κριτήρια τερματισμού είναι ο μέγιστος αριθμός γενεών και η ανοχή στοχικής συνάρτησης (Function tolerance). Ο αλγόριθμος τερματίζεται με την ικανοποίηση ενός εκ των δύο κριτηρίων. Οι βασικές παράμετροι επιλέχθηκαν με βάση την εργασία Deb et al., 2002 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Παράμετροι γενετικού αλγορίθμου.

Παράμετροι	Τιμή
Μέγεθος πληθυσμού	100
Αριθμός γενεών	200
Ανοχή στοχικής συνάρτησης (Function tolerance)	10^{-6}
Ποσοστό πληθυσμού Pareto	0.7
Πιθανότητα διασταύρωσης	0.8
Πιθανότητα μετάλλαξης	0.2

4.2.6 Επαλήθευση αποτελεσμάτων

Τέλος, αφού έχουν προκύψει οι βέλτιστες λύσεις από το προηγούμενο βήμα, γίνεται μία προσπάθεια να εκτιμηθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση ανταποκρίνονται και σε άλλα σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της επαλήθευσης (validation), η οποία αποδεικνύει την ορθότητα του μοντέλου σε όρους συμβάσεων, συλλογισμών και μεθόδων.

Πιο συγκεκριμένα, δημιουργούνται άλλα 100 τυχαία σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας στο δίκτυο. Στη συνέχεια, με δεδομένο το δίκτυο αισθητήρων από το στάδιο της βελτιστοποίησης, προσομοιώνεται η λειτουργία του δικτύου και υπολογίζονται οι στοχικές συναρτήσεις. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων, με στόχο να εκτιμήσουμε την απόδοση του δικτύου αισθητήρων σε άλλες συνθήκες επίθεσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το στάδιο δεν πραγματοποιείται εκ νέου το βήμα της βελτιστοποίησης, οπότε οι λύσεις δεν δημιουργούν μέτωπο Pareto.

4.3 Σενάρια βελτιστοποίησης

Στο στάδιο της βελτιστοποίησης, κρίθηκε σκόπιμο οι αντικειμενικές συναρτήσεις να μη βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα, είτε επειδή σε κάποιες περιπτώσεις δεν είναι εφικτό υπολογιστικά είτε επειδή σκοπός ήταν να εκτιμήσουμε πως επηρεάζει η κάθε συνάρτηση το αποτέλεσμα. Συνεπώς εξετάστηκαν σε διάφορους συνδυασμούς, οι οποίοι έχουν ενδιαφέρον να μελετηθούν μαζί. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν συνολικά πέντε σενάρια, τα οποία διακρίνονται σε δύο ομάδες και περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δεύτερη ομάδα σεναρίων περιλαμβάνει την τροποποιημένη συνάρτηση Z_1^* , η οποία κρίθηκε ότι πρέπει να διερευνηθεί με τις συναρτήσεις Z_2 και Z_4 .

Πίνακας 4-2: Σενάρια βελτιστοποίησης

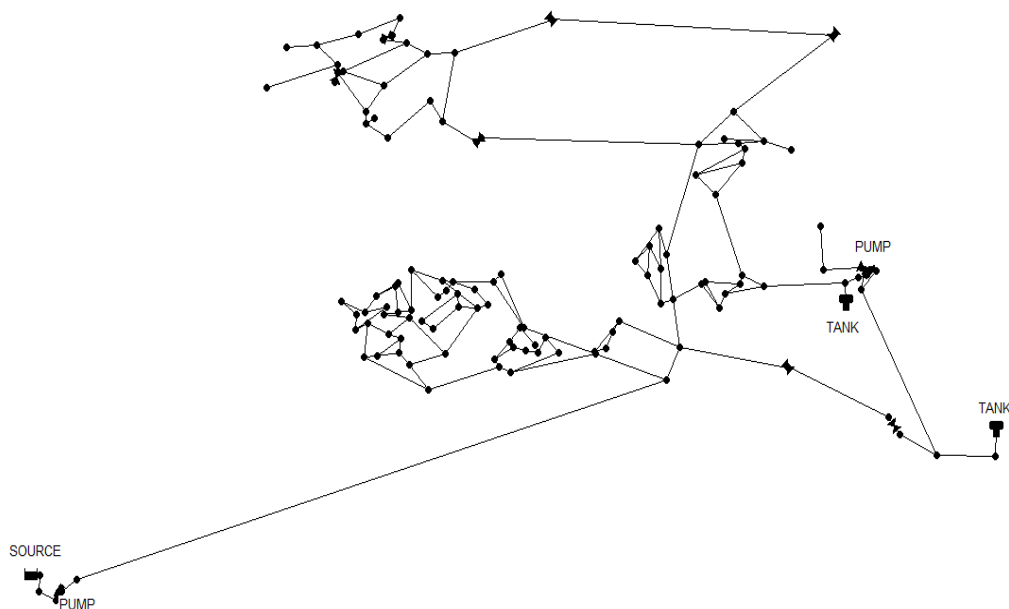
Σενάριο	Αντικειμενικές συναρτήσεις
Ομάδα 1	1 Χρόνος ανίχνευσης (Z_1) – Πιθανότητα ανίχνευσης (Z_2)
	2 Χρόνος ανίχνευσης (Z_1) – Πιθανότητα ανίχνευσης (Z_2) - Κατανάλωση μολυσμένου νερού πριν την ανίχνευση (Z_3)
	3 Χρόνος ανίχνευσης (Z_1) – Πιθανότητα ανίχνευσης (Z_2) – Πλήθος αισθητήρων (Z_4)
Ομάδα 2	4 Χρόνος ανίχνευσης (Z_1^*) – Πιθανότητα ανίχνευσης (Z_2)
	5 Χρόνος ανίχνευσης (Z_1^*) – Πλήθος αισθητήρων (Z_4)

4.4 Εφαρμογή σε δίκτυα ύδρευσης

Η επιλογή των δικτύων ύδρευσης, στα οποία εφαρμόστηκε η μεθοδολογία, έγινε με βάση το μέγεθος και τη μορφολογία τους. Πιο συγκεκριμένα, επιδιώχθηκε τα επιλεγμένα μοντέλα να περιλαμβάνουν μικρά και μεσαία μεγέθη δικτύων, καθώς τα μεγάλα δίκτυα αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό τον υπολογιστικό φόρτο, με αποτέλεσμα να είναι χρονοβόρα. Επίσης επιδιώχθηκε να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα χαρακτηριστικών συστημάτων, με βάση τη μορφολογία (βροχωτό ή ακτινωτό) και τα στοιχεία (όπως ο αριθμός των δεξαμενών, των αντλιών και των πηγών) που περιέχουν. Συνεπώς επιλέχθηκαν τρία δίκτυα, τα οποία παρουσιάζονται και περιγράφονται παρακάτω.

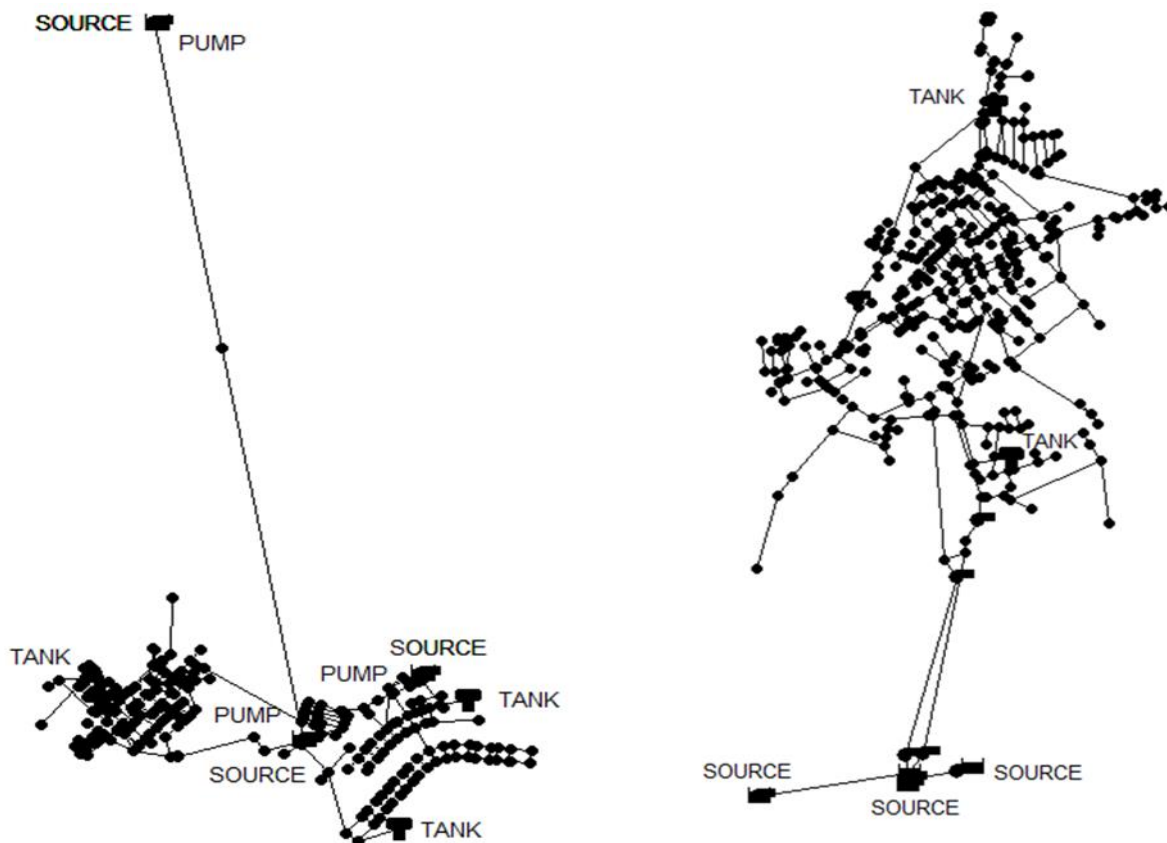
- Δίκτυο 1: BWSN1 (Σχ. 4.1), το οποίο αποτελείται από 126 κόμβους, 168 αγωγούς, μία κύρια συνεχή πηγή, δύο δεξαμενές, δύο αντλίες, οχτώ βαλβίδες και υπόκειται σε τέσσερα

διαφορετικά χρονοδιαγράμματα ζήτησης. Το σύστημα προσομοιώθηκε για μία εκτεταμένη περίοδο διάρκειας ίσης με 96 h. Το δίκτυο είναι ένα πραγματικό σύστημα διανομής με κάποια τροποποιημένα μεγέθη, ώστε να διατηρηθεί η ανωνυμία του (Preis & Ostfeld, 2006).



Σχήμα 4.2: Διάταξη Δικτύου 1 (BWSN1)

- Δίκτυο 2: Ky3 (Σχ. 4.2), το οποίο είναι ένα βροχωτό δίκτυο και αποτελείται από 263 κόμβους, 349 αγωγούς, τρεις πηγές, τρεις δεξαμενές, πέντε αντλίες και υπόκειται σε δύο χρονοδιαγράμματα ζήτησης (Jolly et al., 2013). Το σύστημα προσομοιώθηκε για περίοδο διάρκειας ίσης με 24 h.
- Δίκτυο 3: Ky5 (Σχ. 4.2), το οποίο έχει τοπολογία "πλέγματος" και αποτελείται από 401 κόμβους, 496 αγωγούς, τέσσερις πηγές, τρεις δεξαμενές, έντεκα αντλίες και υπόκειται σε 24ωρη προσομοίωση (Jolly et al., 2013).



Σχήμα 4.3: Διάταξη Δικτύου 2 (αριστερά) και Δικτύου 3 (δεξιά).

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι χαρακτηριστικοί χρόνοι της προσομοίωσης για κάθε δίκτυο.

Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικοί χρόνοι προσομοίωσης.

Χαρακτηριστικοί χρόνοι	Δίκτυο 1	Δίκτυο 2	Δίκτυο 3
Χρόνος προσομοίωσης (hr : min)	96:00	24:00	24:00
Υδραυλικό χρονικό βήμα (hr : min)	0:30	1:00	1:00
Ποιοτικό χρονικό βήμα (hr : min)	0:05	0:05	0:30
Χρονικό βήμα χρονοδιαγράμματος (hr : min)	0:30	1:00	1:00

Για κάθε δίκτυο πραγματοποιήθηκαν σενάρια μεταβάλλοντας το πλήθος των αισθητήρων, ώστε να εκτιμηθεί εάν και πόσο επηρεάζονται οι λύσεις. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα σενάρια που επιλέχθηκαν. Το μέγιστο πλήθος αισθητήρων υποθέσαμε ότι δεν υπερβαίνει το 20% του πλήθους των κόμβων του αντίστοιχου δικτύου.

Πίνακας 4-4: Σενάρια με μεταβολή του πλήθους αισθητήρων.

Δίκτυο	Πλήθος αισθητήρων
1	5, 10, 20
2	5, 15, 30
3	15, 30, 40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για όλα τα σενάρια, που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.3. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου αριθμού των σεναρίων και του όγκου των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε να αναλυθούν ενδεικτικά κάποιες χαρακτηριστικές λύσεις.

5.1 Βελτιστοποίηση

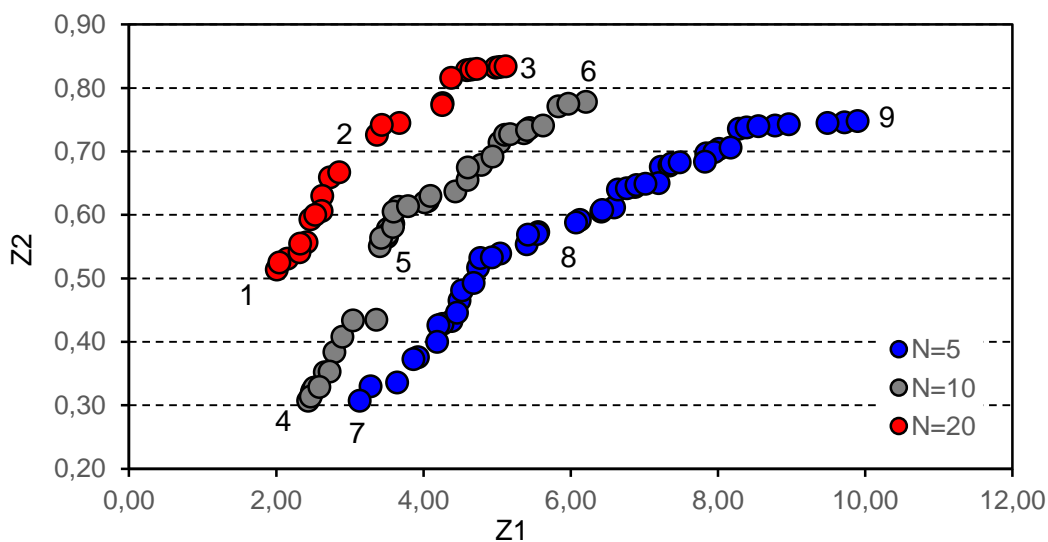
5.1.1 Δίκτυο 1: BWSN1

Στην περίπτωση του Δικτύου 1 προέκυψαν 12096 σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας και από αυτά επιλέχθηκαν τυχαία 1000 σενάρια.

Στα μέτωπα Pareto σημειώνονται οι ακραίες λύσεις και μία ενδιάμεση, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα στον Πίνακα 5-1.

Σενάριο 1

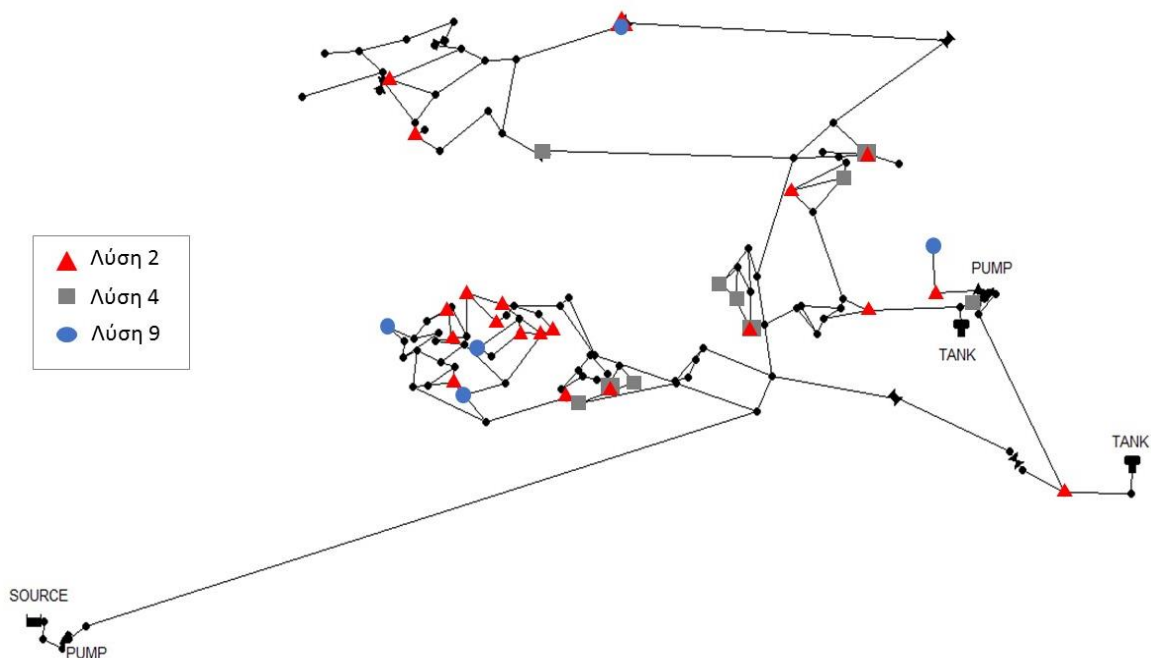
Στο Σχ. 5.1 παρουσιάζονται τα μέτωπα Pareto για τις τρεις τιμές του πλήθους αισθητήρων (N), που επιλέχθηκαν να διερευνηθούν.



Σχήμα 5.1: Μέτωπα Pareto για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 1 - Δίκτυο 1).

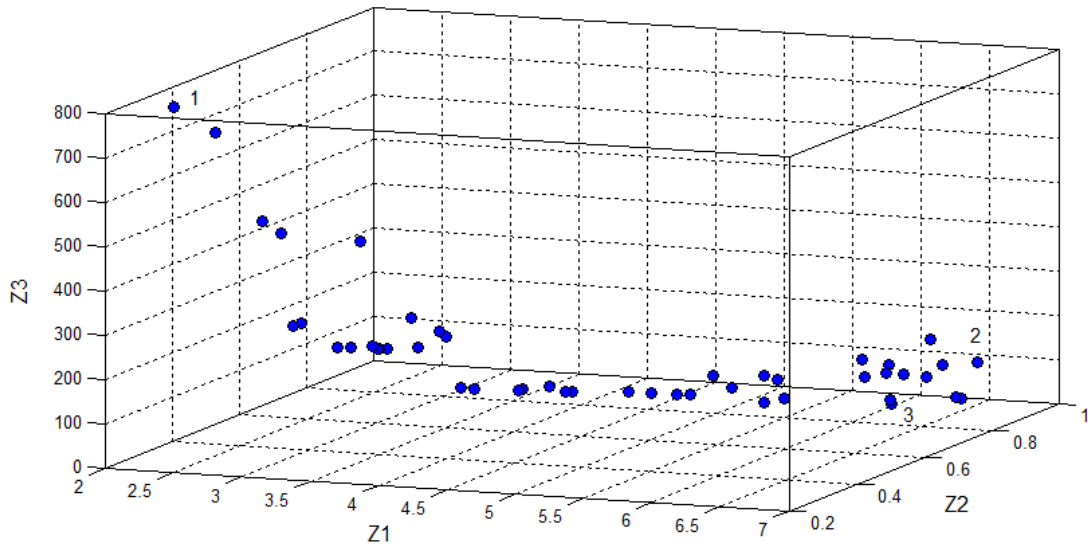
Στο Σχ.5.1 παρουσιάζονται τα μέτωπα Pareto για το Σενάριο 1, όπου βελτιστοποιούνται οι συναρτήσεις Z_1 (min) και Z_2 (max). Τα τρία μέτωπα αντιστοιχούν σε διαφορετικό πλήθος αισθητήρων και πιο συγκεκριμένα για 5, 10 και 20 αισθητήρες. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο συναρτήσεις είναι αντικρουόμενες, καθώς στην περίπτωση που τοποθετηθούν οι αισθητήρες στους κατάντη κόμβους του δικτύου θα είναι μεγάλη η πιθανότητα ανίχνευσης αλλά μεγάλος ο χρόνος ανίχνευσης εάν έχει εισαχθεί σε ανάντη κόμβο. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου οι αισθητήρες τοποθετούνται ανάντη προκύπτει μικρός χρόνος ανίχνευσης αλλά υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μην ανιχνευθεί το γεγονός καθώς η εισαγωγή μπορεί να έχει γίνει σε κατάντη κόμβο. Παρατηρείται ότι με αύξηση του πλήθους των αισθητήρων αυξάνονται και οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, για $N = 5$ η πιθανότητα κυμαίνεται από 30% έως 75% και ο χρόνος από 3.13 έως 9.20 ώρες. Τα αντίστοιχα εύρη τιμών για $N = 20$ είναι 51% έως 83% και 2 έως 5.11 ώρες. Για το δίκτυο με 20 αισθητήρες οι επιδόσεις είναι σαφώς καλύτερες και έχουν μικρότερο εύρος τιμών, που σημαίνει ότι οι λύσεις Pareto δεν έχουν σημαντικές αποκλίσεις όσον αφορά στις τιμές του χρόνου και της πιθανότητας ανίχνευσης.

Στο Σχ. 5.2 παρουσιάζονται οι θέσεις των αισθητήρων που προκύπτουν από τις λύσεις 2, 4 και 9 του Σεναρίου 1. Παρατηρούμε ότι οι θέσεις της Λύσης 4 (min Z_1 , Z_2) βρίσκονται στις ανάντη περιοχές του δικτύου, οι θέσεις της Λύσης 9 (max Z_1 , Z_2) βρίσκονται στις κατάντη περιοχές ενώ οι θέσεις της Λύσης 2 είναι διάσπαρτες μέσα στο δίκτυο.



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση θέσεων αισθητήρων σύμφωνα με επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto (Δίκτυο 1).

Σενάριο 2



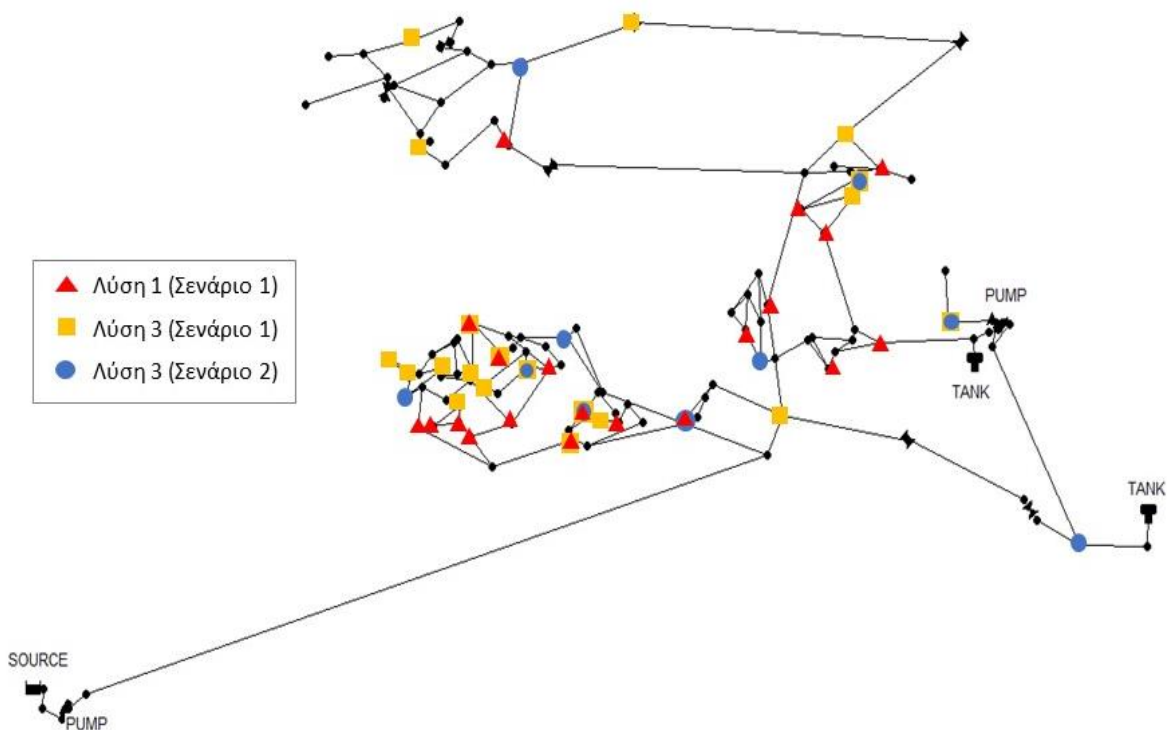
Σχήμα 5.3: Βέλτιστες λύσεις για $N = 10$ (Σενάριο 2 - Δίκτυο 1).

Πίνακας 5-1: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 1 και τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Σενάριο 2).

Α/Α ΛΥΣΗΣ	ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ)				Z_1 (hrs)	Z_2	Z_3 (m ³)	Z_1^* (hrs)
1	'J-49'	'J-42'	'J-93'	'J-33'	2,24	0,31	789,07	67,31
	'J-55'	'J-32'	'J-51'	'J-54'				
	'J-37'	'J-28'						
2	'J-103'	'J-63'	'J-46'	'J-68'	6,69	0,78	146,10	26,16
	'J-118'	'J-100'	'J-42'	'J-83'				
	'J-75'	'J-90'						
3	'J-54'	J-46'	'J-103'	'J-49'	6,55	0,68	84,98	34,82
	'J-81'	'J-39'	'J-98'	'J-64'				
	'J-33'	'J-17'						

Στο Σχ.5.3 παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις, η οποίες προέκυψαν από την βελτιστοποίηση τριών συναρτήσεων Z_1 (min), Z_2 (max) και Z_3 (min). Με αρίθμηση επισημαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές λύσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1. Πιο συγκεκριμένα, η λύση 1 δίνει τη μεγαλύτερη τιμή της Z_3 (789,07 m³) και την ελάχιστη τιμή της Z_1 (2,24 hrs). Η δεύτερη

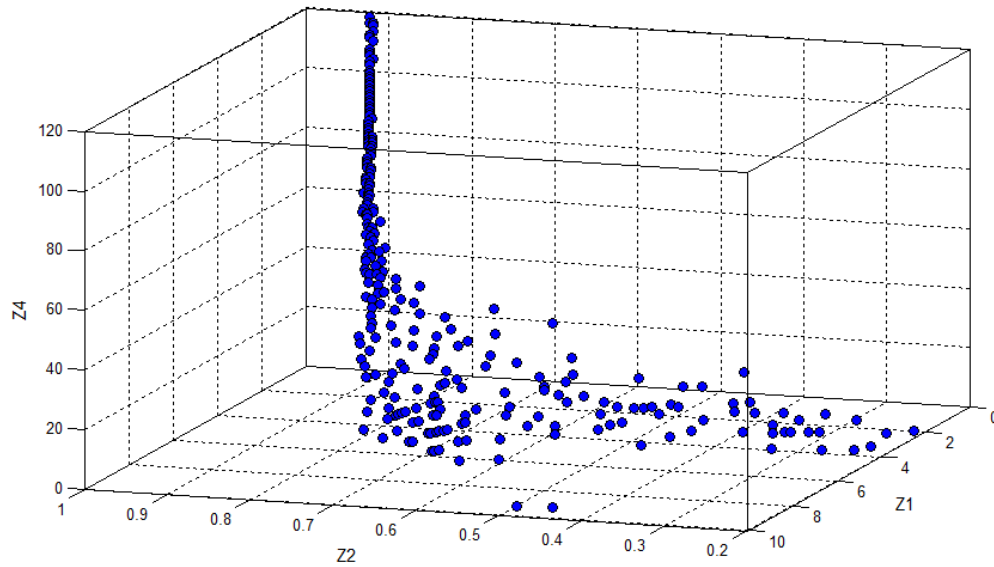
λύση είναι η καλύτερη λύση για τη Z_2 , η οποία λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της (0,78) και η λύση 3 δίνει την καλύτερη τιμή της Z_3 (84,98 m³).



Σχήμα 5.4: Απεικόνιση θέσεων αισθητήρων σύμφωνα με επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto (Δίκτυο 1).

Στο Σχ. 5.4 παρουσιάζονται οι θέσεις των λύσεων 1 και 3 (Σενάριο 1) και 3 (Σενάριο 2). Παρατηρούμε ότι οι θέσεις της λύσης 1, η οποία δίνει την ελάχιστη τιμή του χρόνου ανίχνευσης Z_1 είναι αρκετά συγκεντρωμένες σε αντίθεση με τη λύση 3 (Σενάριο 1), η οποία μεγιστοποιεί την πιθανότητα Z_2 , οι θέσεις της οποίας είναι πιο διάσπαρτες μέσα στο δίκτυο. Όσον αφορά τη λύση 3 (Σενάριο 2), η οποία δίνει την καλύτερη τιμή (ελάχιστη) του όγκου νερού Z_3 παρατηρείται ότι οι θέσεις βρίσκονται σε πιο ανάντη περιοχές.

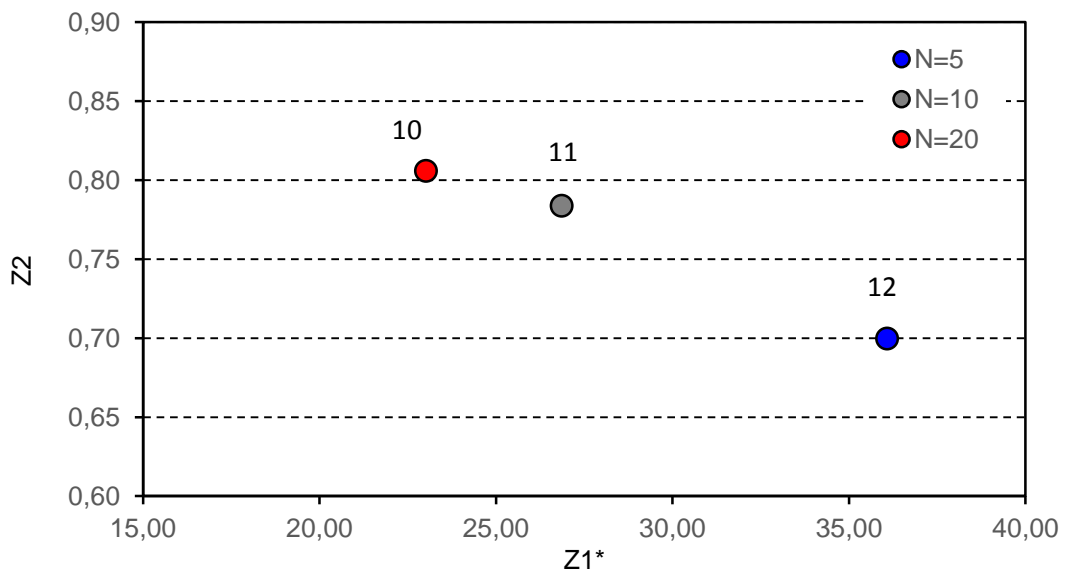
Σενάριο 3



Σχήμα 5.5: Βέλτιστες λύσεις (Σενάριο 3 - Δίκτυο 1).

Στο Σχ. 5.5 απεικονίζονται οι βέλτιστες λύσεις, που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση των Z_1 (min), Z_2 (max) και Z_4 . Είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των αισθητήρων (Z_4), μειώνεται ο χρόνος ανίχνευσης (Z_1) και αυξάνεται η πιθανότητα (Z_2). Ωστόσο, για Z_4 μεγαλύτερο του 40 δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή στις άλλες δύο συναρτήσεις.

Σενάριο 4



Σχήμα 5.6: Βέλτιστες λύσεις για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 4 - Δίκτυο 1).

Στο Σχ. 5.6 παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων βελτιστοποιώντας τις συναρτήσεις Z_1^* και Z_2 . Προκύπτει μία λύση για κάθε περίπτωση. Αυτό συμβαίνει καθώς οι στοχικές συναρτήσεις Z_1^* και Z_2 είναι ισοδύναμες και ο αλγόριθμος μπορεί να βελτιστοποιήσει ταυτόχρονα με μία λύση και τις δύο συναρτήσεις. Η τροποποιημένη συνάρτηση Z_1^* ορίστηκε έτσι ώστε να εμπεριέχει εμμέσως την πιθανότητα ανίχνευσης και με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η παράλειψη της Z_2 και κατά συνέπεια μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος. Αυτή η μορφή αποτελεσμάτων συναντάται και στα άλλα δύο δίκτυα όπου εφαρμόστηκε η μεθοδολογία.

Στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζονται οι θέσεις των αισθητήρων για κάθε λύση, που αντιστοιχούν σε κόμβους του δικτύου. Στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζεται η επίδοση κάθε λύσης σύμφωνα με τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Με γκρι χρώμα σημειώνονται εκείνες οι συναρτήσεις από την βελτιστοποίηση των οποίων προέκυψαν οι αντίστοιχες λύσεις.

Πίνακας 5-2: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 1 για τις λύσεις που σημειώθηκαν (Σενάριο 1 & 4).

A/A ΛΥΣΗΣ	ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ)									
1	'J-50'	'J-74'	'J-43'	'J-90'	'J-54'	'J-35'	'J-28'	'J-71'		
	'J-70'	'J-42'	'J-61'	'J-64'	'J-73'	'J-18'	'J-72'	'J-68'		
	'J-21'	'J-41'	'J-93'	'J-97'						
2	'J-41'	'J-90'	'J-118'	'J-6'	'J-87'	'J-3'	'J-91'	'J-28'		
	'J-49'	'J-97'	'J-46'	'J-98'	'J-61'	'J-72'	'J-88'	'J-103'		
	'J-93'	'J-35'	'J-96'	'J-68'						
3	'J-39'	'J-93'	'J-118'	'J-6'	'J-80'	'J-11'	'J-98'	'J-19'		
	'J-46'	'J-90'	'J-40'	'J-83'	'J-68'	'J-89'	'J-84'	'J-23'		
	'J-100'	'J-64'	'J-75'	'J-67'						
4	'J-105'	'J-58'	'J-49'	'J-40'	'J-59'	'J-61'	'J-116'	'J-35'	'J-52'	'J-50'
5	'J-49'	'J-116'	'J-17'	'J-98'	'J-61'	'J-93'	'J-42'	'J-90'	'J-37'	'J-68'
6	'J-75'	'J-122'	'J-17'	'J-93'	'J-68'	'J-83'	'J-45'	'J-98'	'J-48'	'J-87'
7	'J-49'	'J-42'	'J-21'	'J-35'	'J-95'					
8	'J-68'	'J-118'	'J-46'	'J-73'	'J-98'					
9	'J-70'	'J-118'	'J-45'	'J-83'	'J-100'					

10	'J-102'	'J-88'	'J-17'	'J-75'	'J-96'	'J-70'	'J-18'	'J-83'	'J-52'
	'J-100'	'J-80'	'J-39'	'J-14'	'J-93'	'J-33'	'J-90'	'J-117'	'J-37'
	'J-69'	'J-45'							
11	'J-56'	'J-71'	'J-83'	'J-11'	'J-121'	'J-90'	'J-27'	'J-47'	'J-29'
	'J-45'								
12	'J-50'	'J-17'	'J-74'	'J-83'	'J-45'				

Πίνακας 5-3: Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Δίκτυο 1).

A/A ΛΥΣΗΣ	Z₁ (hrs)	Z₂	Z₃ (m³)	Z₁* (hrs)
1	2,00	0,51	425,04	47,69
2	2,85	0,67	70,22	33,87
3	5,11	0,83	140,26	20,20
4	2,43	0,31	618,66	67,27
5	3,41	0,55	230,11	44,98
6	6,20	0,78	98,21	26,14
7	3,13	0,31	715,43	67,49
8	6,07	0,59	264,88	43,12
9	9,89	0,75	356,58	31,59
10	5,44	0,81	86,00	23,01
11	7,80	0,78	142,78	26,85
12	10,39	0,70	239,05	36,07

Σύγκριση αποτελεσμάτων με προτάσεις BWSN

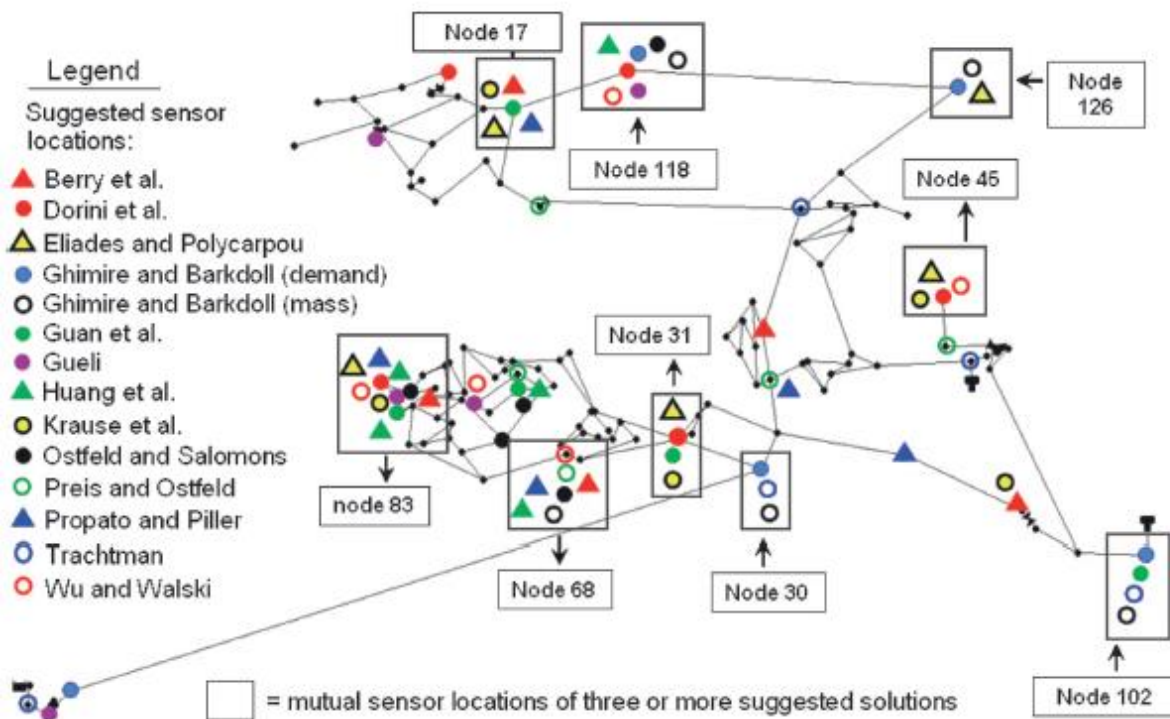
Το δίκτυο BWSN1 χρησιμοποιήθηκε στις μελέτες που κατατέθηκαν στο πλαίσιο της “Μάχης των Δικτύων Αισθητήρων Νερού”, γνωστή ως “The Battle of the Water Sensor Networks” (BWSN). Στο Σχ. 5.7 παρουσιάζονται οι θέσεις που προτάθηκαν από όλους τους μελετητές. Είναι φανερό ότι οι περισσότερες από τις ομάδες συμμετεχόντων προτείνουν τον κόμβο 83, ως θέση

αισθητήρα, ο οποίος είναι κατάντη κόμβος και τους κόμβους 68 και 118, στο νότιο και βόρειο τμήμα του δικτύου.

Συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα των μελετών στο πλαίσιο του BWSN, προκύπτει ότι πολλές από τις θέσεις που έχουν προτείνει τρεις και άνω μελετητές, περιέχονται και στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας σε περισσότερες από μία λύσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4:

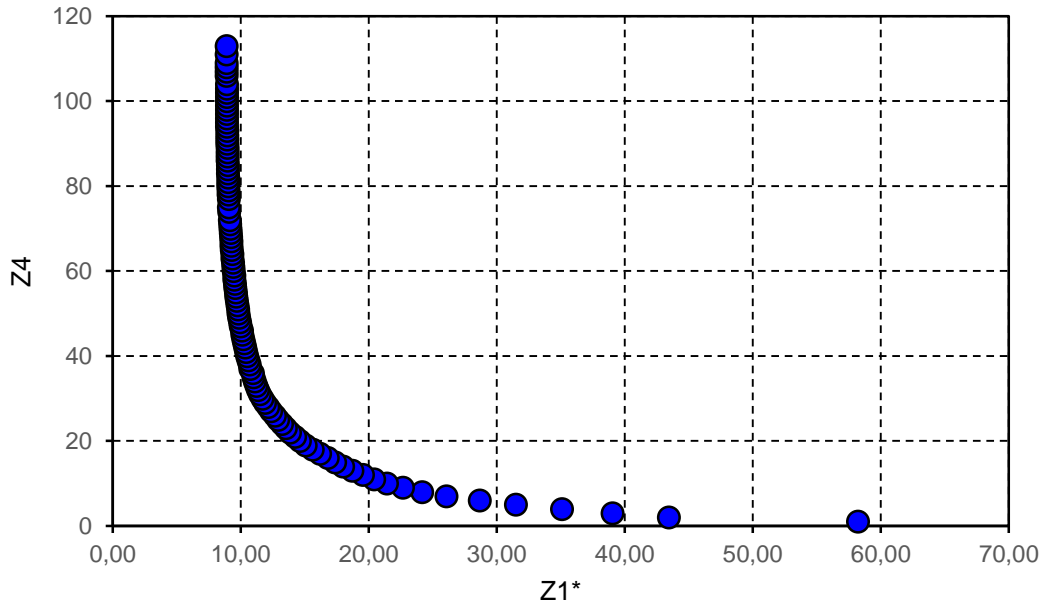
Πίνακας 5-4: Κοινές θέσεις παρούσας μελέτης με προτάσεις BWSN (Δίκτυο 1).

ΚΟΜΒΟΣ	ΛΥΣΕΙΣ	
	Σενάριο 1 & 4	Σενάριο 2
83	3, 6, 9, 10, 11, 12	2
68	1, 2, 3, 5, 6, 8	2
118	2, 3, 8, 9	2
45	6, 9, 10, 11, 12	-
17	5, 6, 10, 12	3



Σχήμα 5.7: Διατάξεις θέσεων αισθητήρων που προτείνονται στο πλαίσιο του BWSN (πηγή: Ostfeld et al, 2008).

Σενάριο 5



Σχήμα 5.8: Μέτωπο Pareto ($Z_1^* - Z_4$) (Σενάριο 5 - Δίκτυο 1).

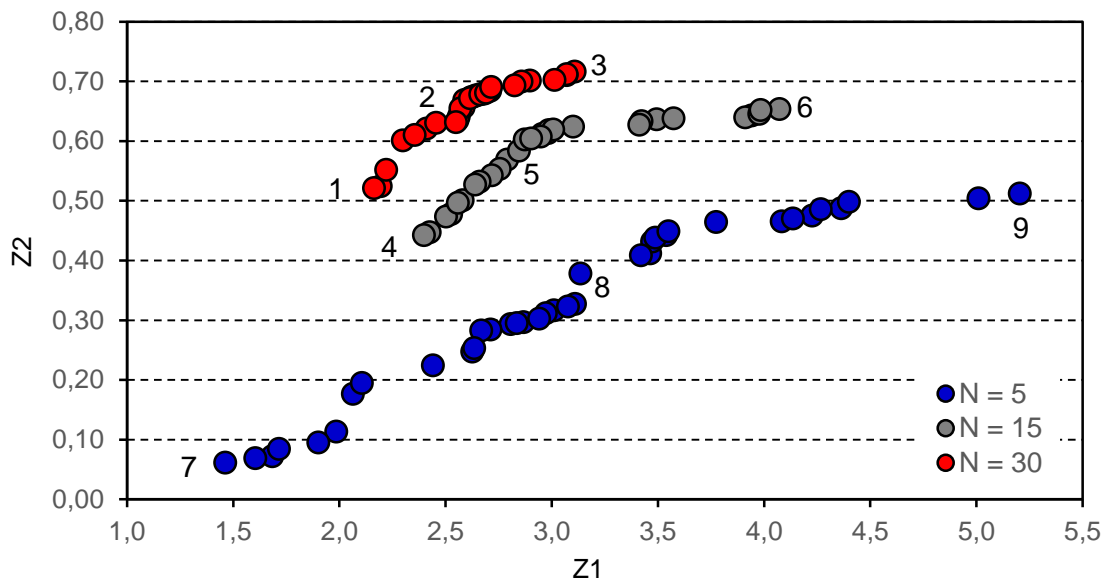
Στο Σχ.5.8 παρατηρούμε ότι με την αύξηση του πλήθους αισθητήρων, μειώνεται ο χρόνος Z_1^* , αποτέλεσμα το οποίο είναι λογικό. Επιπλέον, ο χρόνος ανίχνευσης Z_1^* φτάνει μέχρι την ελάχιστη τιμή των 10 hrs για $N=40$ και δε μειώνεται περαιτέρω όσο και αν αυξήσουμε το πλήθος των αισθητήρων. Το γεγονός αυτό ίσως οφείλεται στη μορφολογία του δικτύου, το οποίο είναι μεν σχετικά μικρό αλλά οι κόμβοι του έχουν μεγάλη διασπορά και δυσχεραίνεται η γρήγορη ανίχνευση του επεισοδίου.

5.1.2 Δίκτυο 2: Ky3

Στην περίπτωση του Δικτύου 2 προέκυψαν 6552 σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας και από αυτά επιλέχθηκαν τυχαία 650 σενάρια.

Στα μέτωπα Pareto σημειώνονται οι ακραίες λύσεις και μία ενδιάμεση, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα στους Πίνακες 5-5, 5-6, 5-7.

Σενάριο 1

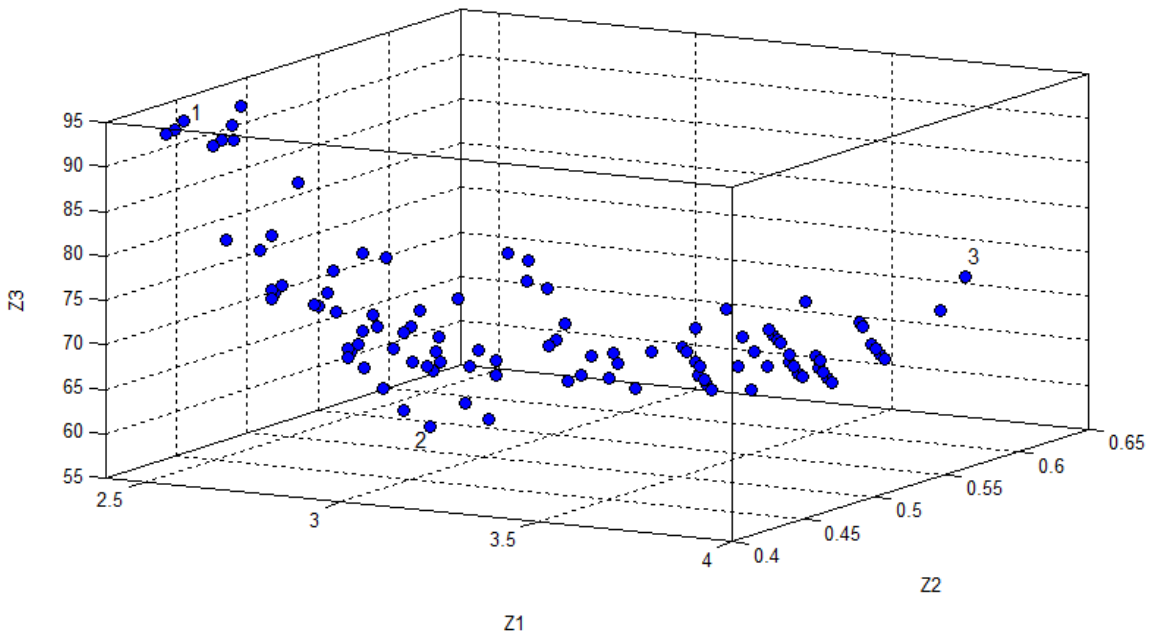


Σχήμα 5.9: Μέντωπα Pareto για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 1 - Δίκτυο 2).

Στο Σχ.5.9 παρουσιάζονται τα μέντωπα Pareto για το Σενάριο 1, όπου βελτιστοποιούνται οι συναρτήσεις Z_1 (min) και Z_2 (max). Τα τρία μέντωπα αντιστοιχούν σε διαφορετικό πλήθος αισθητήρων και πιο συγκεκριμένα για 5, 15 και 30 αισθητήρες.

Παρατηρούμε ότι, όσο αυξάνει ο αριθμός των αισθητήρων, οι λύσεις έχουν καλύτερες επιδόσεις, δηλαδή επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας να ανιχνευθούν τα επεισόδια και μικρότεροι χρόνοι ανίχνευσης. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερο το πλήθος των αισθητήρων τόσο πιο μικρό εύρος τιμών των συναρτήσεων έχουμε. Πιο συγκεκριμένα, για $N=5$ η πιθανότητα κυμαίνεται από 6% έως 51% και ο χρόνος από 1,5 έως 5,2 ώρες. Τα αντίστοιχα εύρη τιμών για $N=30$ είναι 52% έως 72% και 2,2 έως 3.11 ώρες. Αυτό συμβαίνει καθώς με μικρό πλήθος αισθητήρων οι λύσεις επηρεάζονται σημαντικά από το σημείο εισαγωγής του ρύπου, ενώ ένα δίκτυο με περισσότερους αισθητήρες δεν επηρεάζεται στον ίδιο βαθμό με αποτέλεσμα να είναι πιο αξιόπιστο και σταθερό στις επιδόσεις του.

Σενάριο 2



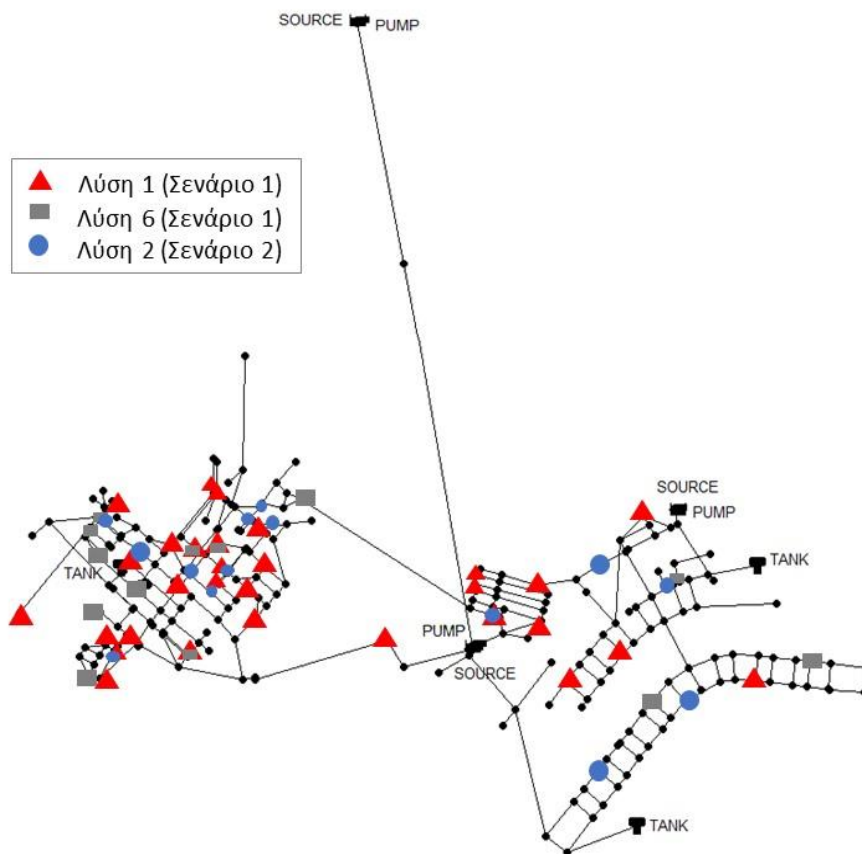
Σχήμα 5.10: Βέλτιστες λύσεις για $N = 15$ (Σενάριο 2 - Δίκτυο 2).

Πίνακας 5-5: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 2 και τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Σενάριο 2).

Α/Α ΛΥΣΗΣ	ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ)				Z_1 (hrs)	Z_2	Z_3 (m ³)	Z_1^* (hrs)
1	'J-239'	'J-177'	'J-262'	'J-174'	2,41	0,45	91,96	14,37
	'J-159'	'J-225'	'J-140'	'J-245'				
	'J-188'	'J-255'	'J-43'	'J-152'				
	'J-137'	'J-222'	'J-85'					
2	'J-24'	'J-175'	'J-260'	'J-194'	2,84	0,51	57,34	13,26
	'J-193'	'J-2'	'J-143'	'J-211'				
	'J-191'	'J-220'	'J-41'	'J-173'				
	'J-151'	'J-222'	'J-54'					
3	'J-222'	'J-195'	'J-191'	'J-151'	3,70	0,65	71,06	10,89
	'J-200'	'J-24'	'J-252'	'J-186'				
	'J-233'	'J-211'	'J-25'	'J-185'				
	'J-172'	'J-210'	'J-44'					

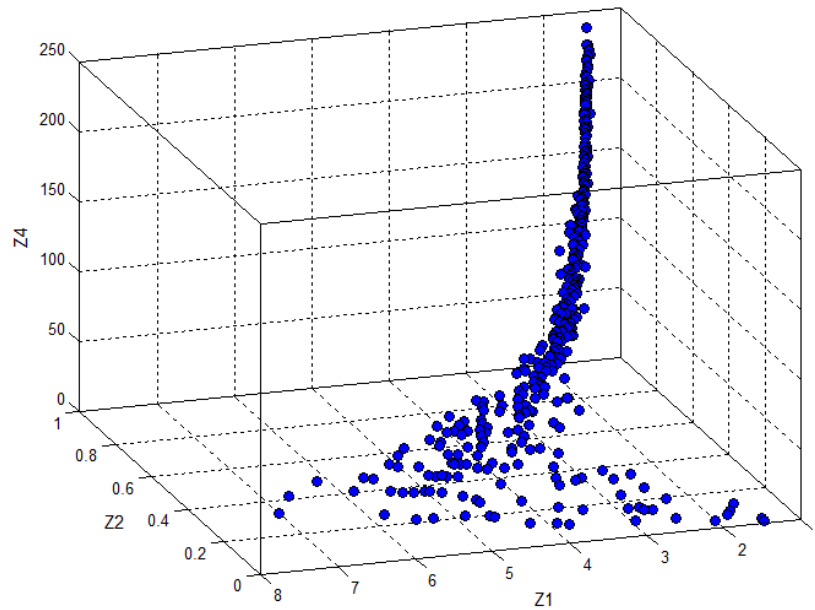
Στο Σχ.5.10 παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις, η οποίες προέκυψαν από την βελτιστοποίηση τριών συναρτήσεων Z_1 (min), Z_2 (max) και Z_3 (min). Με αρίθμηση επισημαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές λύσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4. Πιο συγκεκριμένα, η λύση 1 δίνει τη μεγαλύτερη τιμή της Z_3 (91,96 m³) και την ελάχιστη τιμή της Z_1 (2,41 hrs). Η δεύτερη λύση είναι η καλύτερη λύση για τη Z_3 (57,34 m³) και η λύση 3 η καλύτερη για την Z_2 (0,65).

Στο Σχ. 5.11 απεικονίζονται οι θέσεις των αισθητήρων, όπως προέκυψαν από τις λύσεις 1 (30 αισθητήρες) και 6 (15 αισθητήρες) του Σεναρίου 1 και τη λύση 2 (15 αισθητήρες) του Σεναρίου 2. Οι κόμβοι 177, 204 και 203 είναι κοινói για τις λύσεις 1 και 6. Παρατηρείται ότι οι θέσεις της λύσης 1, η οποία ελαχιστοποιεί τη Z_1 και τη Z_2 είναι πιο συγκεντρωμένες από τις θέσεις της λύσης 6, η οποία μεγιστοποιεί τη Z_1 και τη Z_2 . Επιπλέον, οι θέσεις της λύσης 2 βρίσκονται κυρίως σε ανάντη περιοχές του δικτύου.



Σχήμα 5.11: Απεικόνιση θέσεων αισθητήρων σύμφωνα με επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto (Δίκτυο 2).

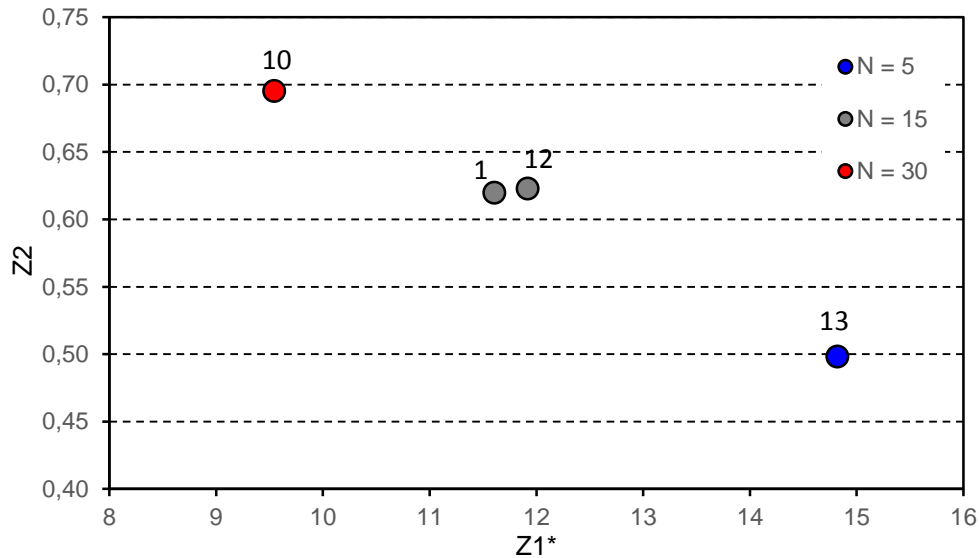
Σενάριο 3



Σχήμα 5.12: Βέλτιστες λύσεις ($Z_1 - Z_2 - Z_4$) (Σενάριο 3 - Δίκτυο 2).

Στο Σχ.5.12 απεικονίζονται οι βέλτιστες λύσεις, που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση των Z_1 (min), Z_2 (max) και Z_4 . Είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των αισθητήρων (Z_4), μειώνεται ο χρόνος ανίχνευσης (Z_1) και αυξάνεται η πιθανότητα (Z_2). Επίσης, παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές της Z_4 δηλαδή μικρό πλήθος αισθητήρων, οι λύσεις μεγάλη διασπορά ενώ με την αύξηση της μεταβλητής Z_4 οι λύσεις συγκλίνουν.

Σενάριο 4



Σχήμα 5.13: Βέλτιστες λύσεις για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 4 - Δίκτυο 2).

Παρατηρούμε ότι σε αυτό το σενάριο προκύπτει μία ή δύο λύσεις ανά περίπτωση και όχι μέτωπο Pareto, όπως στο Σενάριο 1. Αξίζει να σημειωθεί ότι για δίκτυο με περισσότερους αισθητήρες υπάρχει μία σαφής βελτίωση στις επιδόσεις των συναρτήσεων.

Στον Πίνακα 5-6 παρουσιάζονται οι θέσεις των αισθητήρων για κάθε λύση, που αντιστοιχούν σε κόμβους του δικτύου. Στον Πίνακα 5-7 παρουσιάζεται η επίδοση κάθε λύσης σύμφωνα με τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Με γκρι χρώμα σημειώνονται εκείνες οι συναρτήσεις από την βελτιστοποίηση των οποίων προέκυψαν οι αντίστοιχες λύσεις.

Πίνακας 5-6: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 2 για τις λύσεις που σημειώθηκαν (Σενάριο 1 & 4).

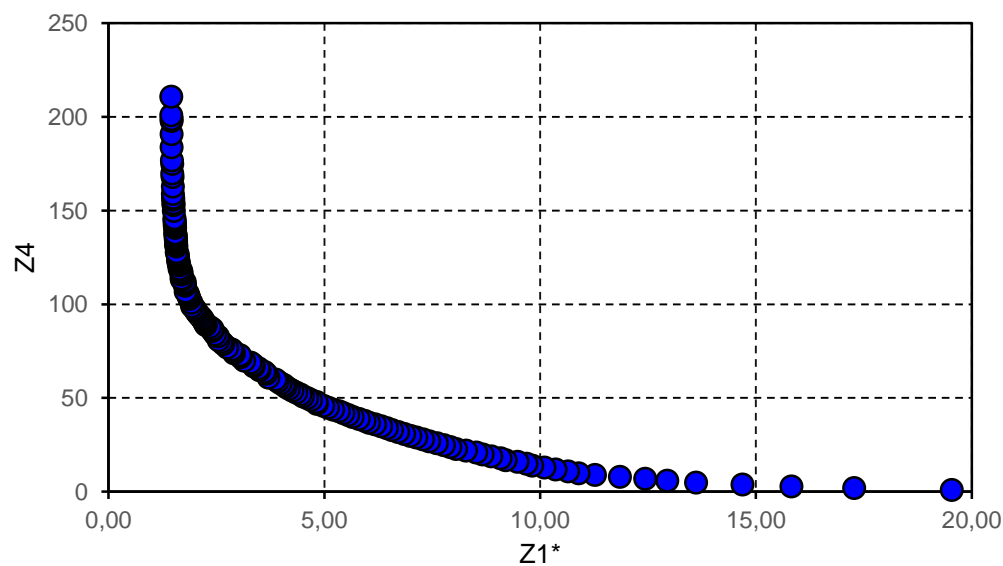
Α/Α ΛΥΣΗΣ	ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ)						
1	'J-189'	'J-17'	'J-167'	'J-215'	'J-267'	'J-162'	'J-16
	'J-177'	'J-160'	'J-131'	'J-211'	'J-154'	'J-241'	'J-84'
	'J-123'	'J-251'	'J-163'	'J-204'	'J-148'	'J-203'	'J-139'
	'J-199'	'J-145'	'J-188'	'J-213'	'J-238'	'J-35'	'J-226'
	'J-43'	'J-198'					
2	'J-209'	'J-154'	'J-268'	'J-229'	'J-15'	'J-266'	'J-29'
	'J-151'	'J-249'	'J-174'	'J-136'	'J-216'	'J-211'	'J-182'
	'J-156'	'J-198'	'J-257'	'J-21'	'J-186'	'J-24'	'J-133'

	'J-233'	'J-168'	'J-26'	'J-225'	'J-223'	'J-17'	'J-250'
	'J-23'	'J-38'					
3	'J-150'	'J-156'	'J-262'	'J-23'	'J-135'	'J-257'	'J-266'
	'J-172'	'J-159'	'J-240'	'J-133'	'J-2'	'J-225'	'J-177'
	'J-167'	'J-25'	'J-4'	'J-239'	'J-126'	'J-235'	'J-219'
	'J-12'	'J-195'	'J-186'	'J-203'	'J-172'	'J-173'	'J-218'
	'J-237'	'J-44'					
4	'J-221'	'J-185'	'J-188'	'J-225'	'J-258'	'J-170'	'J-163'
	'J-207'	'J-54'	'J-222'	'J-192'	'J-43'	'J-55'	'J-206'
	'J-276'						
5	'J-163'	'J-24'	'J-252'	'J-225'	'J-2'	'J-188'	'J-231'
	'J-150'	'J-154'	'J-246'	'J-174'	'J-200'	'J-216'	'J-222'
	'J-202'						
6	'J-44'	'J-177'	'J-268'	'J-204'	'J-154'	'J-11'	'J-218'
	'J-208'	'J-172'	'J-34'	'J-221'	'J-203'	'J-186'	'J-210'
	'J-206'						
7	'J-269'	'J-257'	'J-203'	'J-17'	'J-59'		
8	'J-225'	'J-111'	'J-245'	'J-207'	'J-69'		
9	'J-23'	'J-122'	'J-246'	'J-191'	'J-65'		
10	'J-191'	'J-272'	'J-233'	'J-266'	'J-156'	'J-216'	'J-156'
	'J-204'	'J-173'	'J-237'	'J-149'	'J-47'	'J-225'	'J-71'
	'J-269'	'J-198'	'J-213'	'J-264'	'J-19'	'J-74'	'J-39'
	'J-231'	'J-274'	'J-44'	'J-51'	'J-28'	'J-138'	'J-226'
	'J-200'	'J-259'					
11	'J-210'	'J-23'	'J-197'	'J-142'	'J-168'	'J-162'	'J-231'
	'J-44'	'J-18'	'J-12'	'J-158'	'J-41'	'J-226'	'J-144'
	'J-233'						
12	'J-210'	'J-23'	'J-197'	'J-142'	'J-168'	'J-162'	'J-231'
	'J-44'	'J-18'	'J-12'	'J-159'	'J-41'	'J-226'	'J-143'
	'J-233'						
13	'J-165'	'J-70'	'J-231'	'J-180'	'J-28'		

Πίνακας 5-7: Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Δίκτυο 2).

Α/Α ΛΥΣΗΣ	Z ₁ (hrs)	Z ₂	Z ₃ (m ³)	Z ₁ * (hrs)
1	2,162	0,522	72,878	12,611
2	2,568	0,655	41,058	9,954
3	3,107	0,717	59,516	9,021
4	2,398	0,443	81,772	14,428
5	2,902	0,605	62,855	11,244
6	4,071	0,654	81,005	10,970
7	1,462	0,062	698,947	22,613
8	3,134	0,378	122,988	16,103
9	5,203	0,512	151,056	14,370
10	3,205	0,695	65,520	9,540
11	4,004	0,620	78,462	11,602
12	4,603	0,623	121,187	11,914
13	5,573	0,498	187,627	14,815

Σενάριο 5



Σχήμα 5.14: Μέτωπο Pareto (Σενάριο 5 - Δίκτυο 2).

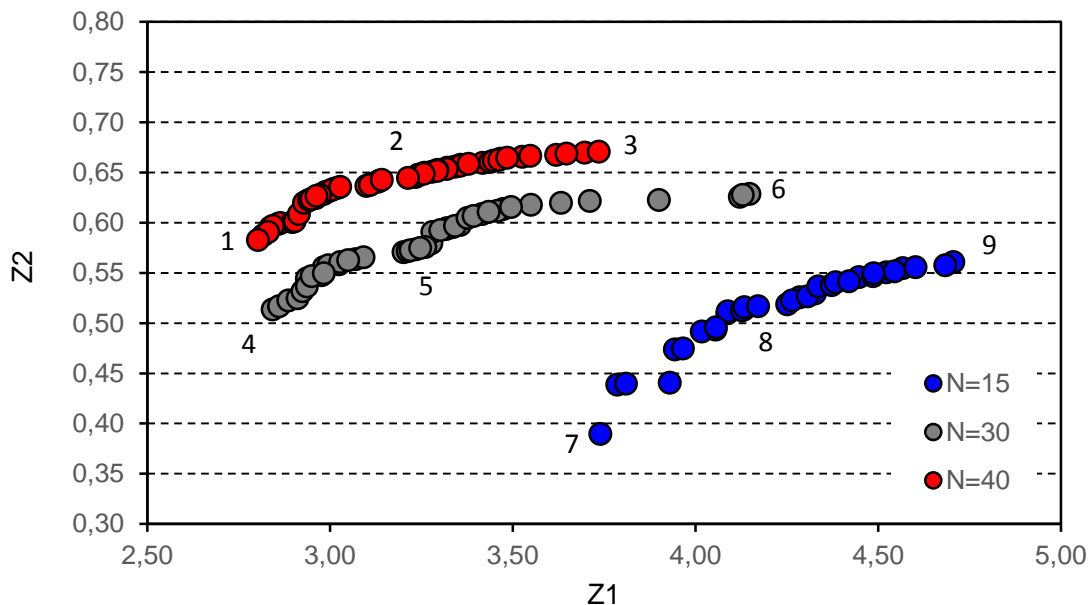
Στο Σχ. 5.14 παρατηρούμε ότι με την αύξηση του πλήθους αισθητήρων, μειώνεται ο χρόνος Z_1^* , αποτέλεσμα το οποίο είναι λογικό. Επιπλέον, ο ρυθμός μείωσης του χρόνου μειώνεται για $Z_4 > 50$ και για $Z_4 > 100$ ο χρόνος δε μειώνεται περαιτέρω.

5.1.3 Δίκτυο 3: Ky5

Στην περίπτωση του Δικτύου 3 προέκυψαν 10152 σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας και από αυτά επιλέχθηκαν τυχαία 1000 σενάρια.

Στα μέτωπα Pareto σημειώνονται οι ακραίες λύσεις και μία ενδιάμεση, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα στους Πίνακες 5-8, 5-9 και 5-10.

Σενάριο 1

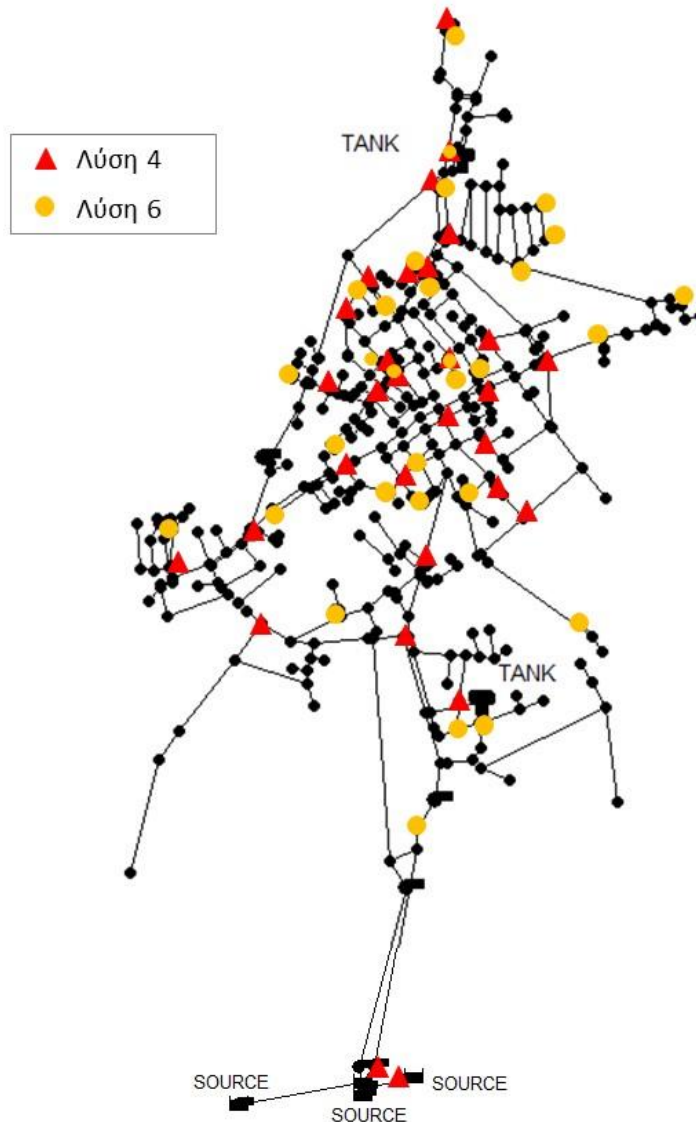


Σχήμα 5.15: Μέτωπα Pareto για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 1 - Δίκτυο 3).

Στο Σχ.5.15 παρουσιάζονται τα μέτωπα Pareto για το Σενάριο 1, όπου βελτιστοποιούνται οι συναρτήσεις Z_1 (min) και Z_2 (max). Τα τρία μέτωπα αντιστοιχούν σε διαφορετικό πλήθος αισθητήρων και πιο συγκεκριμένα για 15, 30 και 40 αισθητήρες.

Και στο τρίτο δίκτυο παρατηρούμε ότι, όσο αυξάνει ο αριθμός των αισθητήρων, οι λύσεις έχουν καλύτερες επιδόσεις, δηλαδή επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας να ανιχνευθούν τα επεισόδια και μικρότεροι χρόνοι ανίχνευσης. Ωστόσο, τα μέτωπα που αντιστοιχούν σε 30 και 40 αισθητήρες δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους, σε αντίθεση με το μέτωπο των 15

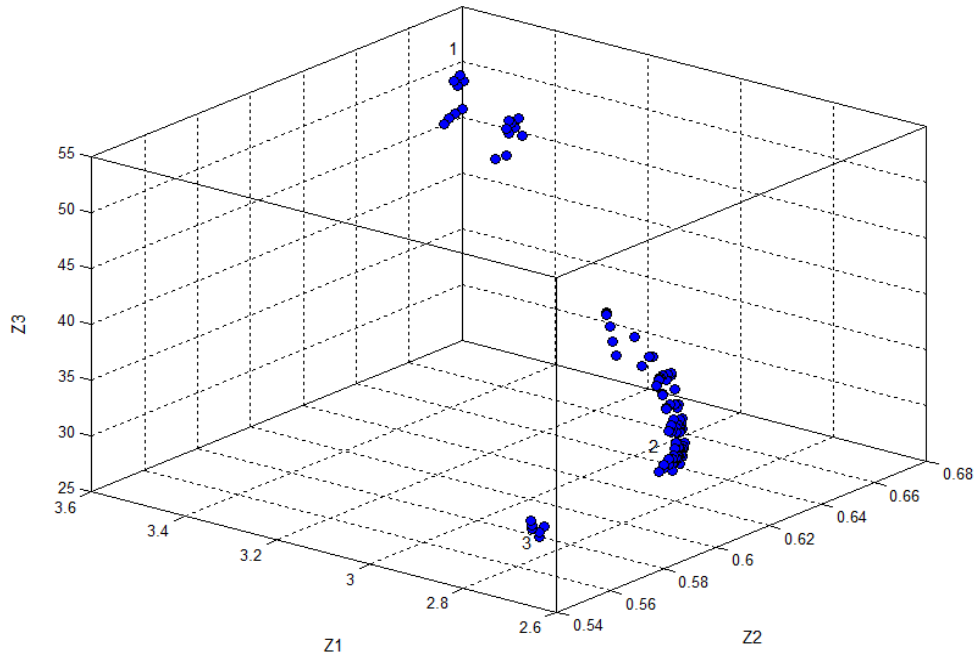
αισθητήρων, όπου έχουμε σαφώς χειρότερες τιμές. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερο το πλήθος των αισθητήρων τόσο πιο μικρό εύρος τιμών των συναρτήσεων προκύπτει.



Σχήμα 5.16: Απεικόνιση θέσεων αισθητήρων σύμφωνα με επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto (Δίκτυο 3).

Στο Σχ. 5.16 απεικονίζονται οι θέσεις των αισθητήρων που προκύπτουν από τη λύση 4, η οποία δίνει τη χειρότερη τιμή Z_2 του μετώπου και την καλύτερη τιμή Z_1 και τη λύση 6, η οποία δίνει τη χειρότερη τιμή Z_1 του μετώπου και την καλύτερη τιμή Z_2 . Παρατηρείται ότι οι θέσεις της λύσης 4 είναι λίγο πιο συγκεντρωμένες από αυτές της λύσης 6, οι οποίες καλύπτουν αρκετούς ακραίους κόμβους του δικτύου.

Σενάριο 2



Σχήμα 5.17: Βέλτιστες λύσεις για N = 40 (Σενάριο 2 - Δίκτυο 3).

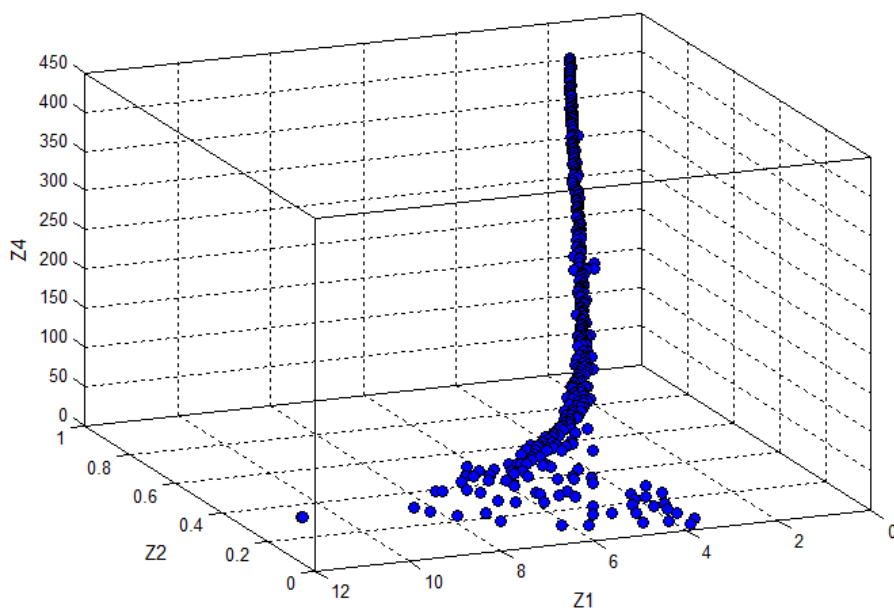
Πίνακας 5-8: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 3 και τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Σενάριο 2).

Α/Α ΛΥΣΗΣ	ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ)						Z_1 (hrs)	Z_2	Z_3 (m ³)	Z_1^* (hrs)
1	'J-202'	'J-416'	'J-21'	'J-321'	'J-18'	'J-335'	3,519	0,665	51,084	10,380
	'J-267'	'J-325'	'J-331'	'J-4'	'J-282'	'J-350'				
	'J-324'	'J-396'	'J-255'	'J-47'	'J-178'	'J-226'				
	'J-313'	'J-342'	'J-305'	'J-314'	'J-378'	'J-203'				
	'J-342'	'J-56'	'J-317'	'J-31'	'J-247'	'J-184'				
	'J-316'	'J-362'	'J-32'	'J-417'	'J-386'	'J-276'				
	'J-43'	'J-26'	'J-66'	'J-368'						
2	'J-334'	'J-304'	'J-273'	'J-217'	'O-Pump-9'	2,827	0,622	28,349	10,830	
	'J-34'	'J-292'	'J-109'	'J-78'	'J-183'					'J-181'
	'J-255'	'J-192'	'J-73'	'J-66'	'J-247'					'J-319'
	'J-75'	'J-417'	'J-322'	'J-174'	'J-345'					'J-260'
	'J-354'	'O-Pump-5'	'J-347'	'J-200'	'J-106'					
	'J-155'	'J-127'	'J-264'	'J-321'	'J-43'					'J-226'
	'J-375'	'J-125'	'J-339'	'J-46'	'J-382'					'J-118'

	'J-317' 'J-278' 'J-165' 'J-370' 'J-107' 'J-363'				
	'J-159' 'J-366' 'O-Pump-9' 'J-294' 'J-93'				
	'J-231' 'J-384' 'J-355' 'J-75' 'J-342' 'J-127'				
3	'J-228' 'J-325' 'O-Pump-6' 'J-198' 'J-380'	2,644	0,541	31,549	12,446
	'J-202' 'J-97' 'J-112' 'J-275' 'J-78' 'I-Pump-9'				
	'J-357' 'J-114' 'J-214' 'J-273' 'J-57' 'J-423'				
	'J-87' 'J-13' 'O-Pump-8' 'J-371' 'J-95' 'J-135'				

Στο Σχ.5.17 παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις, η οποίες προέκυψαν από την βελτιστοποίηση τριών συναρτήσεων Z_1 (min), Z_2 (max) και Z_3 (min). Με αρίθμηση επισημαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές λύσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-7. Πιο συγκεκριμένα, η λύση 1 είναι η χειρότερη για τη Z_3 (51,084 m³) και την Z_1 (3,519 hrs) ενώ δίνει την καλύτερη τιμή της Z_2 (0,665). Η δεύτερη λύση είναι η καλύτερη λύση για τη Z_3 (28,349 m³) και παράλληλα δίνει πολύ καλές τιμές και στις άλλες δύο συναρτήσεις Z_1 και Z_2 . Τέλος, η λύση 3 είναι η καλύτερη για την Z_1 (2,644 hrs).

Σενάριο 3

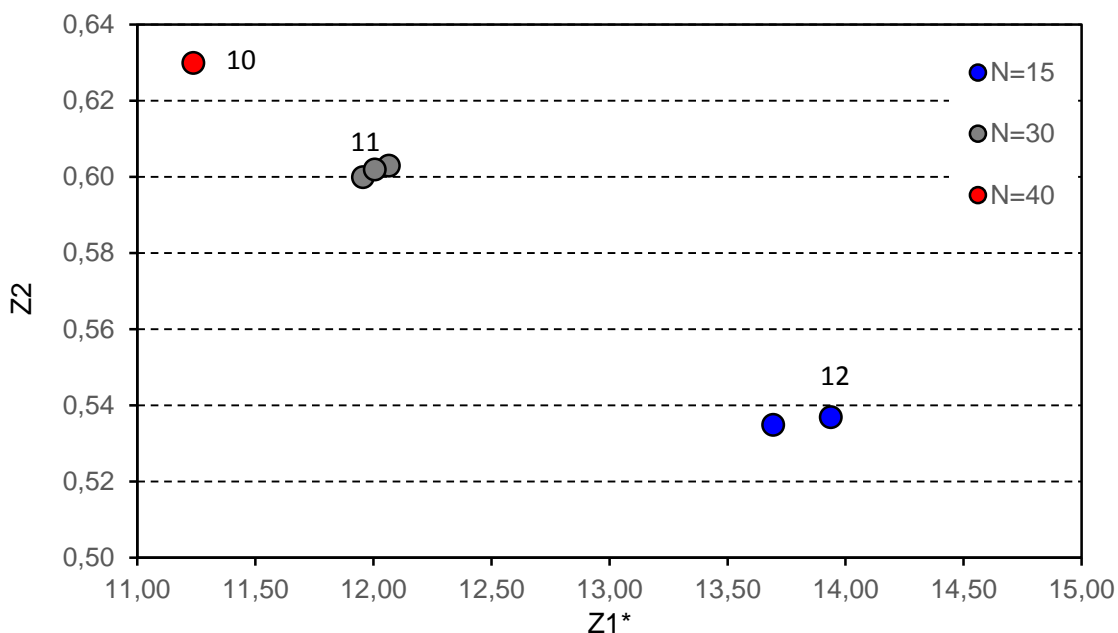


Σχήμα 5.18: Βέλτιστες λύσεις ($Z_1 - Z_2 - Z_4$) (Σενάριο 3 - Δίκτυο 3).

Στο Σχ. 5.18 απεικονίζονται οι βέλτιστες λύσεις, που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση των Z_1 (min), Z_2 (max) και Z_4 . Είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των αισθητήρων (Z_4), μειώνεται ο χρόνος ανίχνευσης (Z_1) και αυξάνεται η πιθανότητα (Z_2). Επίσης, παρατηρούμε, όπως και στα

δύο μικρότερα δίκτυα, ότι για μικρές τιμές της Z_4 δηλαδή μικρό πλήθος αισθητήρων οι λύσεις έχουν μεγάλες αποκλίσεις ως προς τις τιμές των δύο άλλων συναρτήσεων (μεγάλη διασπορά λύσεων) ενώ όσο για υψηλές τιμές της μεταβλητής Z_4 οι λύσεις συγκλίνουν.

Σενάριο 4



Σχήμα 5.19: Βέλτιστες λύσεις για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων (Σενάριο 4 - Δίκτυο 3).

Παρατηρούμε ότι σε αυτό το σενάριο προκύπτει μία έως τρεις λύσεις ανά περίπτωση και όχι μέτωπο Pareto, όπως στο Σενάριο 1. Αξίζει να σημειωθεί ότι για δίκτυο με περισσότερους αισθητήρες υπάρχει μία σαφής βελτίωση στις επιδόσεις των συναρτήσεων.

Στον Πίνακα 5-9 παρουσιάζονται οι θέσεις των αισθητήρων για κάθε λύση, που αντιστοιχούν σε κόμβους του δικτύου. Στον Πίνακα 5-10 παρουσιάζεται η επίδοση κάθε λύσης σύμφωνα με τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Με γκρι χρώμα σημειώνονται εκείνες οι συναρτήσεις από την βελτιστοποίηση των οποίων προέκυψαν οι αντίστοιχες λύσεις.

Πίνακας 5-9: Θέσεις αισθητήρων στο Δίκτυο 3 για τις λύσεις που σημειώθηκαν (Σενάριο 1 & 4).

Α/Α ΛΥΣΗΣ	ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ)						
1	'J-125'	'J-194'	'J-421'	'J-149'	'J-350'	'J-385'	'J-27'
	'J-22'	'J-129'	'J-152'	'J-316'	'J-135'	'J-384'	'O-Pump-6'
	'J-137'	'J-49'	'J-322'	'J-38'	'J-378'	'J-68'	'J-214'
	'J-57'	'J-11'	'J-69'	'J-89'	'J-31'	'J-198'	'J-93'
	'J-402'	'J-376'	'J-315'	'J-334'	'J-218'	'J-255'	'J-113'
	'J-219'	'J-131'	'J-146'	'J-44'			
2	'J-399'	'J-311'	'J-387'	'J-304'	'J-278'	'J-49'	'J-142'
	'J-423'	'J-249'	'J-378'	'J-188'	'J-307'	'J-47'	'J-396'
	'J-421'	'J-192'	'J-408'	'J-4'	'J-247'	'J-338'	'J-214'
	'J-391'	'J-198'	'J-31'	'J-159'	'J-40'	'O-Pump-1'	'J-297'
	'J-85'	'J-414'	'J-263'	'J-398'	'J-240'	'J-92'	'J-416'
	'J-226'	'J-11'	'J-175'	'J-162'	'J-200'		
3	'J-211'	'J-311'	'J-387'	'J-304'	'J-278'	'J-49'	'J-143'
	'J-424'	'J-25'	'J-378'	'J-188'	'J-307'	'J-47'	'J-396'
	'J-421'	'J-192'	'J-408'	'J-4'	'J-247'	'J-338'	'J-214'
	'J-390'	'J-198'	'J-310'	'J-159'	'J-40'	'J-99'	'J-297'
	'J-85'	'J-413'	'J-263'	'J-399'	'J-24'	'J-92'	'J-416'
	'J-226'	'J-11'	'J-175'	'J-162'	'J-20'	'J-211'	
4	'J-394'	'J-159'	'J-44'	'J-175'	'J-273'	'J-194'	'I-Pump-6'
	'J-146'	'J-217'	'J-402'	'J-70'	'J-292'	'J-244'	'J-338'
	'J-190'	'J-114'	'J-363'	'J-27'	'J-375'	'J-153'	'J-49'
	'J-295'	'J-336'	'J-278'	'J-309'	'O-Pump-5'	'J-69'	'J-38'
	'J-80'	'J-391'					
5	'J-414'	'J-23'	'J-176'	'J-295'	'J-178'	'J-329'	'J-231'
	'J-95'	'J-342'	'J-22'	'J-201'	'J-87'	'J-209'	'J-132'
	'J-284'	'J-66'	'J-109'	'J-206'	'J-114'	'J-171'	'J-97'
	'J-317'	'J-411'	'J-334'	'J-350'	'J-390'	'J-385'	'J-179'
	'J-340'	'J-248'					
6	'J-2'	'J-202'	'J-26'	'J-21'	'J-194'	'J-224'	'J-34'
	'J-323'	'J-31'	'J-335'	'J-284'	'J-66'	'J-293'	'J-205'
	'J-243'	'J-50'	'J-233'	'J-184'	'J-40'	'J-276'	'J-198'

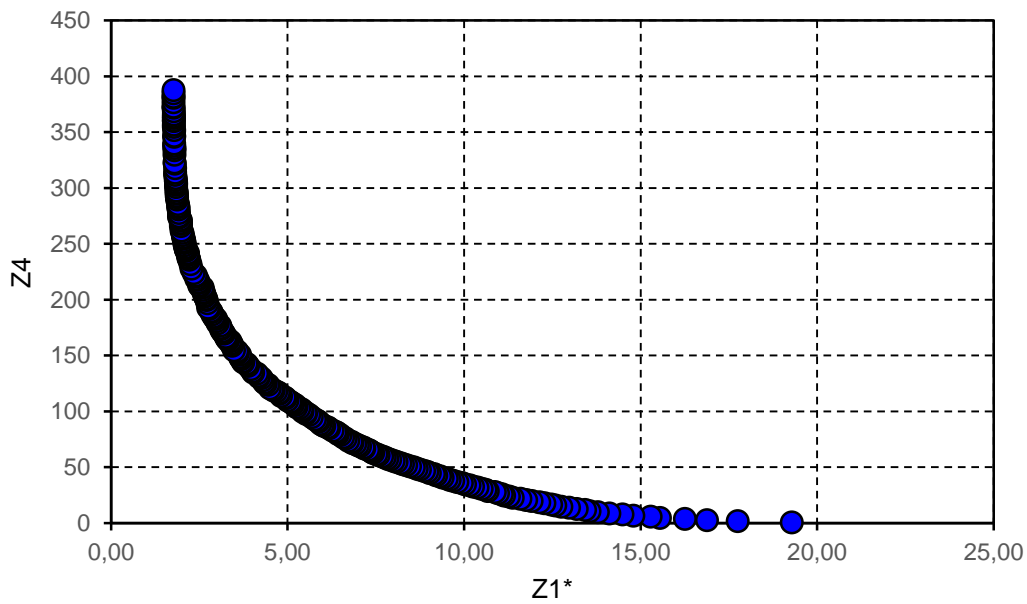
	'J-362'	'J-346'	'J-322'	'J-75'	'J-394'	'J-306'	'J-121'
	'J-338'	'J-365'					
7	'J-200'	'J-317'	'J-213'	'J-316'	'J-199'	'J-12'	'J-94'
	'J-75'	'J-383'	'J-300'	'J-231'	'J-370'	'J-245'	'J-278'
	'J-206'						
8	'J-315'	'J-250'	'J-290'	'J-211'	'J-173'	'J-60'	'J-66'
	'J-233'	'J-172'	'J-201'	'J-316'	'J-168'	'J-278'	'J-143'
	'J-325'						
9	'J-315'	'J-25'	'J-29'	'J-21'	'J-174'	'J-60'	'J-66'
	'J-233'	'J-172'	'J-201'	'J-316'	'J-168'	'J-278'	'J-142'
	'J-325'						
10	'J-227'	'J-155'	'J-238'	'J-296'	'J-30'	'J-264'	'J-267'
	'J-266'	'J-376'	'J-202'	'J-298'	'J-420'	'J-262'	'J-335'
	'J-300'	'J-214'	'J-329'	'J-32'	'J-155'	'J-321'	'J-231'
	'J-150'	'J-368'	'J-254'	'J-369'	'J-282'	'J-367'	'J-336'
	'J-22'	'J-52'	'J-345'	'J-203'	'J-248'	'J-40'	'J-3'
	'J-244'	'J-324'	'J-21'	'J-421'	'J-207'		
11	'J-21'	'J-234'	'J-135'	'J-316'	'J-174'	'J-68'	'J-50'
	'J-380'	'J-410'	'J-255'	'J-356'	'J-40'	'J-400'	'J-260'
	'J-333'	'J-12'	'J-233'	'J-421'	'J-295'	'J-227'	'J-97'
	'J-420'	'J-263'	'J-238'	'J-374'	'J-68'	'J-159'	'J-368'
	'J-159'	'J-33'					
12	'J-123'	'J-157'	'J-62'	'J-21'	'J-297'	'J-117'	'I-Pump-1'
	'J-53'	'J-238'	'J-187'	'J-375'	'J-66'	'J-266'	'J-210'
	'I-Pump-3'						

Πίνακας 5-10: Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων (Δίκτυο 3).

A/A ΛΥΣΗΣ	Z₁ (hrs)	Z₂	Z₃ (m³)	Z₁* (hrs)
1	2,80	0,58	36,82	11,64
2	3,23	0,65	43,42	10,58
3	3,73	0,67	61,05	10,40

4	2,84	0,51	40,05	13,13
5	3,26	0,58	42,89	12,05
6	4,15	0,63	75,80	11,51
7	3,74	0,39	149,17	16,10
8	4,17	0,52	72,67	13,75
9	4,70	0,56	101,45	13,18
10	3,74	0,63	52,83	11,24
11	4,08	0,60	61,82	12,01
12	5,26	0,54	168,17	13,94

Σενάριο 5



Σχήμα 5.20: Μέτωπο Pareto (Σενάριο 5 - Δίκτυο 3).

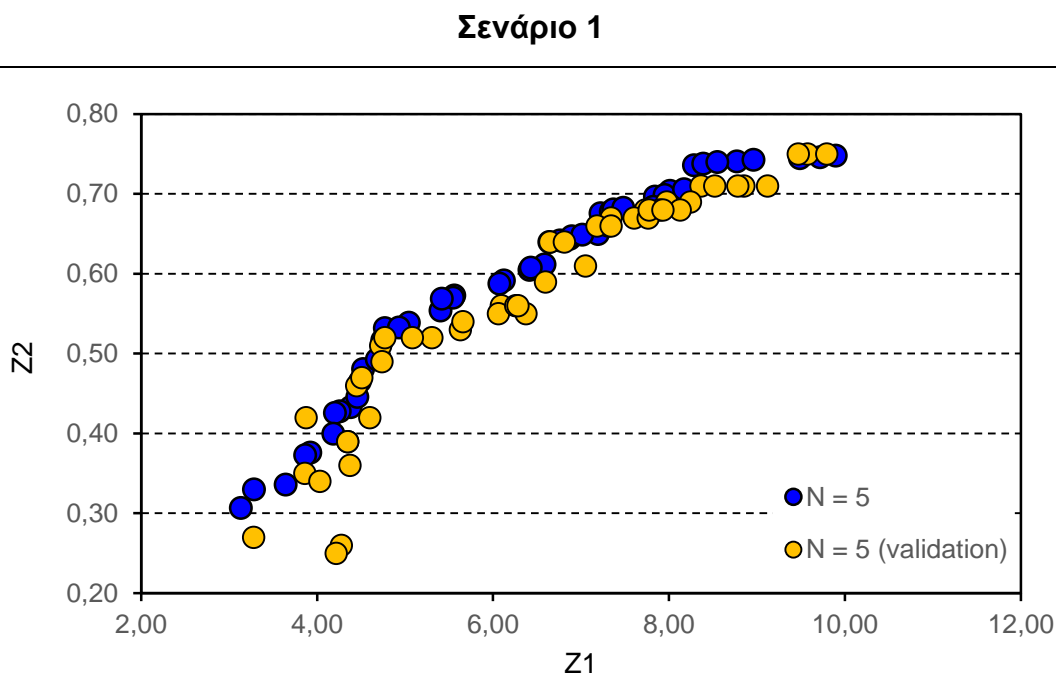
Στο Σχ. 5.20 είναι εμφανές ότι για υψηλές τιμές της μεταβλητής Z_4 , ο χρόνος Z_1^* μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, παρατηρείται ότι για τιμές της Z_4 μεγαλύτερες του 200 η μεταβολή του χρόνου είναι αμελητέα.

5.2 Επαλήθευση

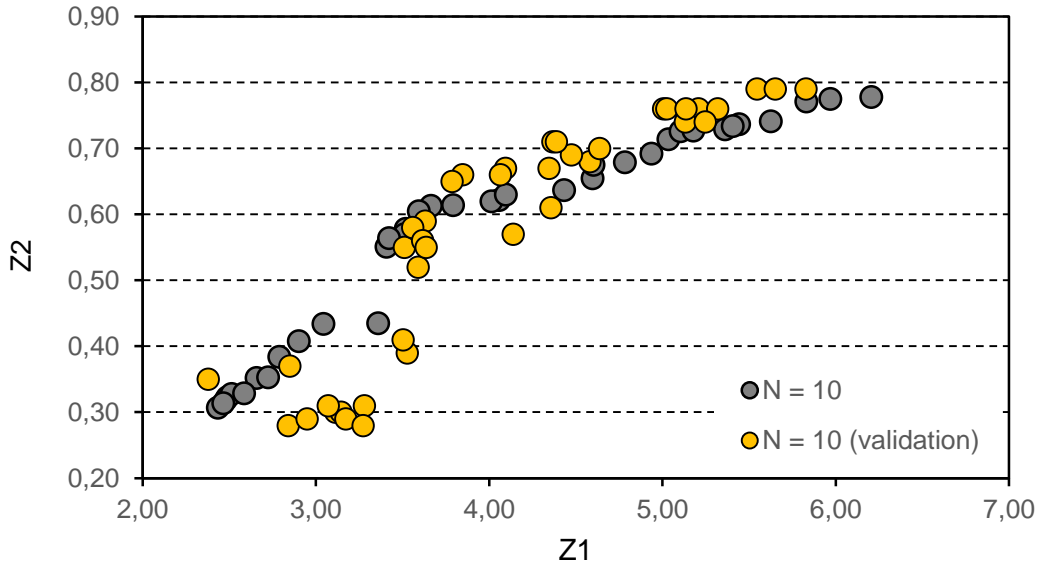
Με την διαδικασία της επαλήθευσης γίνεται μία προσπάθεια να εκτιμηθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση ανταποκρίνονται και σε άλλα σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας. Με δεδομένο το δίκτυο αισθητήρων από το στάδιο της βελτιστοποίησης, προσομοιώνεται η λειτουργία του δικτύου, υπολογίζονται οι στοχαστικές συναρτήσεις και τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων, με στόχο να εκτιμήσουμε την απόδοση του δικτύου αισθητήρων σε άλλες συνθήκες επίθεσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το στάδιο δεν πραγματοποιείται εκ νέου το βήμα της βελτιστοποίησης, οπότε οι λύσεις δεν δημιουργούν μέτωπο Pareto.

Η επαλήθευση πραγματοποιήθηκε για τα Σενάρια 1, 4 και 5, όπου η βελτιστοποίηση περιλάμβανε δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, ώστε η σύγκριση των αποτελεσμάτων να καθίσταται εύκολη και πιο κατανοητή.

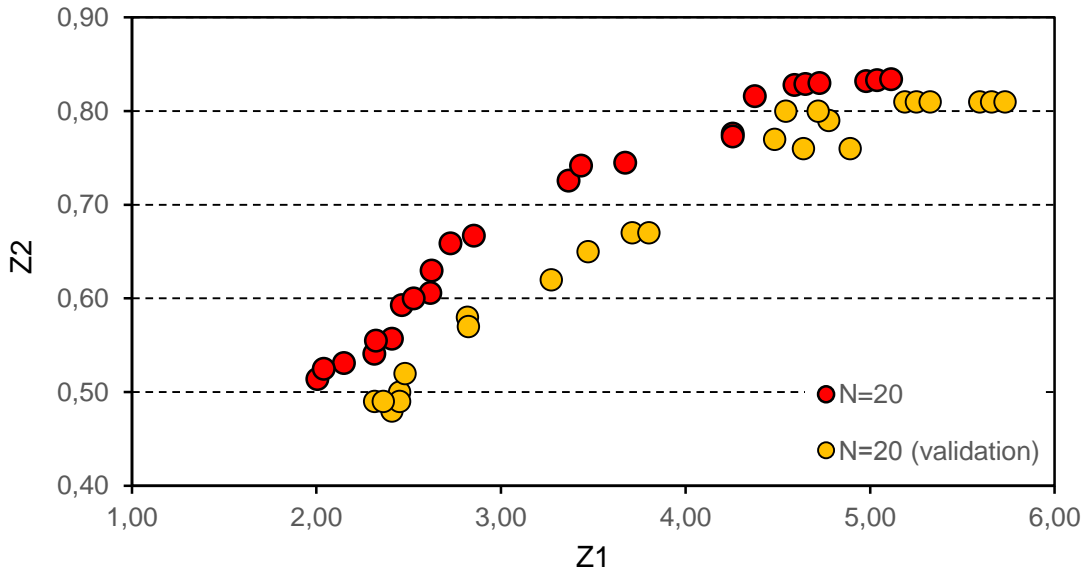
5.2.1 Δίκτυο 1: BWSN1



Σχήμα 5.21: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για $N = 5$ (Σενάριο 1 - Δίκτυο 1)

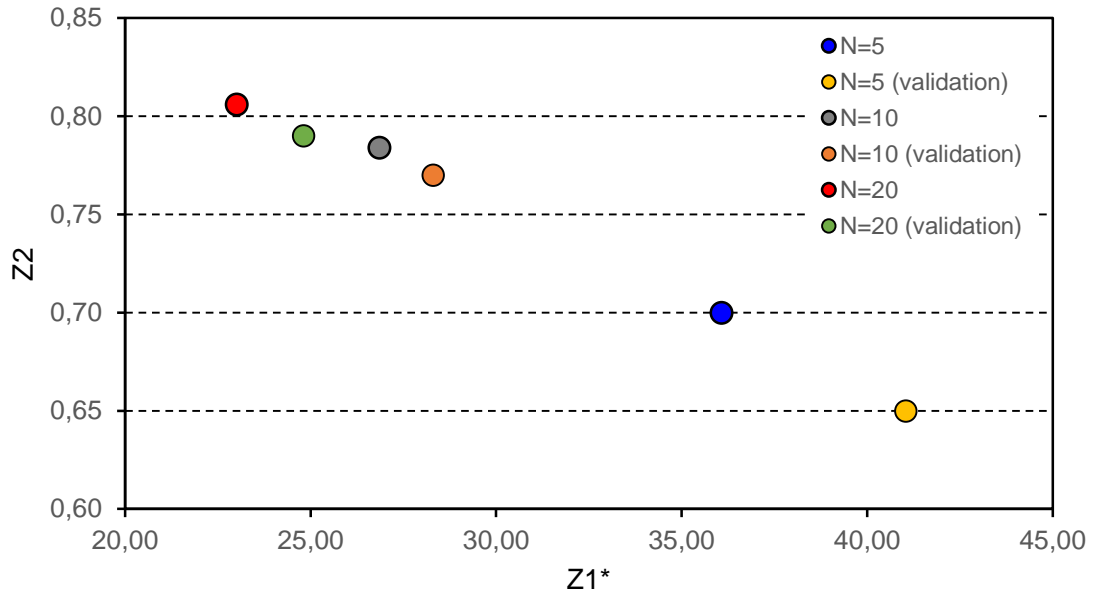


Σχήμα 5.22: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για $N = 10$ (Σενάριο 1 - Δίκτυο 1)



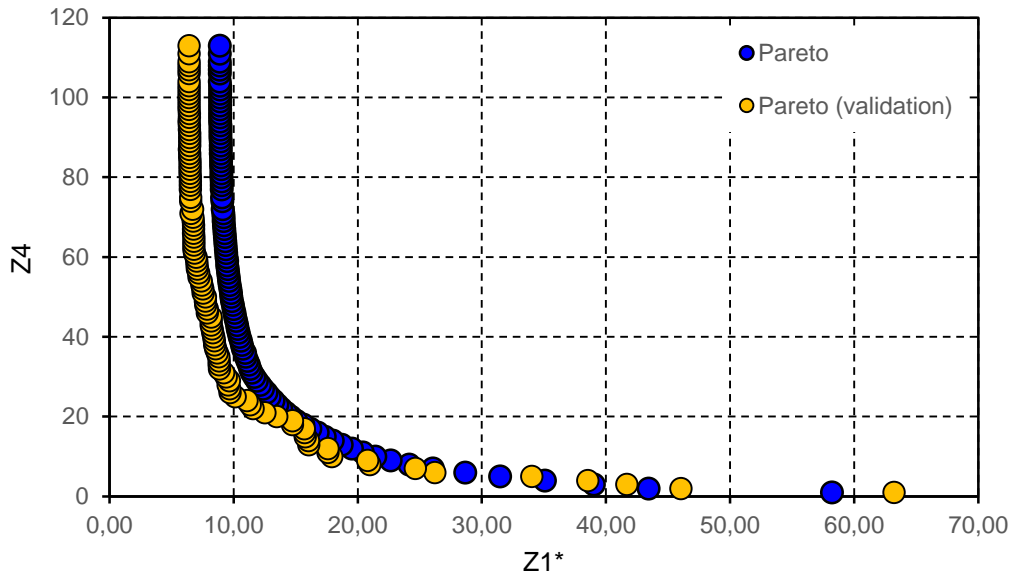
Σχήμα 5.23: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για $N = 20$ (Σενάριο 1 - Δίκτυο 1)

Σενάριο 4



Σχήμα 5.24: Σύγκριση βέλτιστων λύσεων και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 4 - Δίκτυο 1)

Σενάριο 5



Σχήμα 5.25: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 5 - Δίκτυο 1)

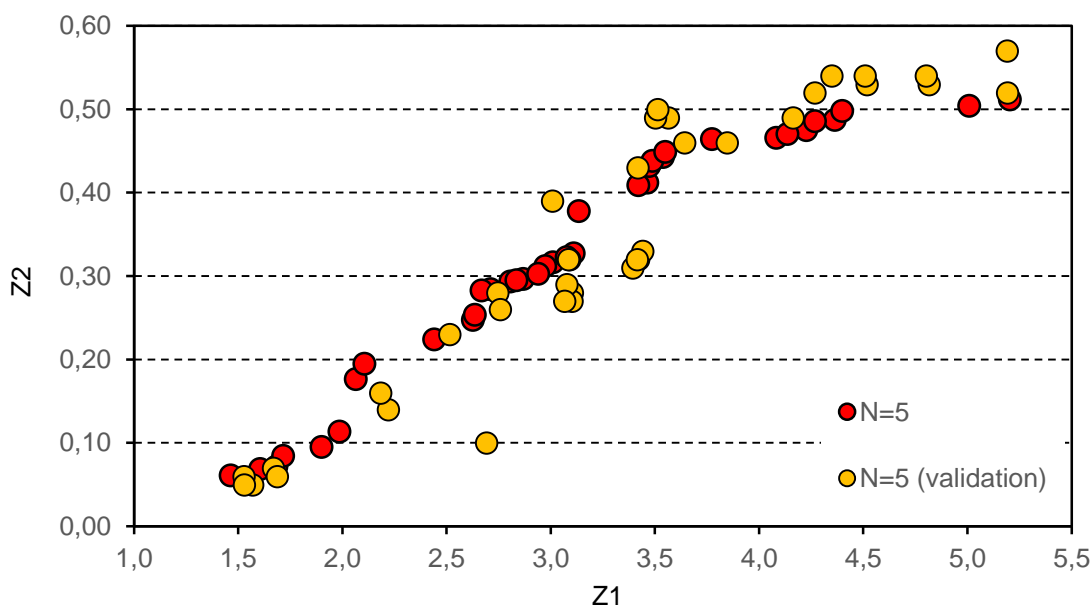
Για το Σενάριο 1 παρατηρούμε ότι για $N = 5$ & 15 τα αποτελέσματα της επαλήθευσης τείνουν να ταυτιστούν με το μέτωπο Pareto, σε αντίθεση με την περίπτωση του $N = 20$, όπου η απόδοση των λύσεων είναι λίγο χειρότερη από την βελτιστοποίηση.

Για το Σενάριο 4 πρέπει να σημειωθεί ότι για $N = 15$ & 20 η επαλήθευση δίνει τιμές συναρτήσεων με μικρή απόκλιση από την βελτιστοποίηση, ενώ για $N = 5$ οι λύσεις έχουν αρκετά χειρότερη απόδοση. Αυτό συμβαίνει καθώς ένα δίκτυο με μικρό πλήθος αισθητήρων είναι πιο ευαίσθητο και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σημείο εισαγωγής της χημικής ουσίας.

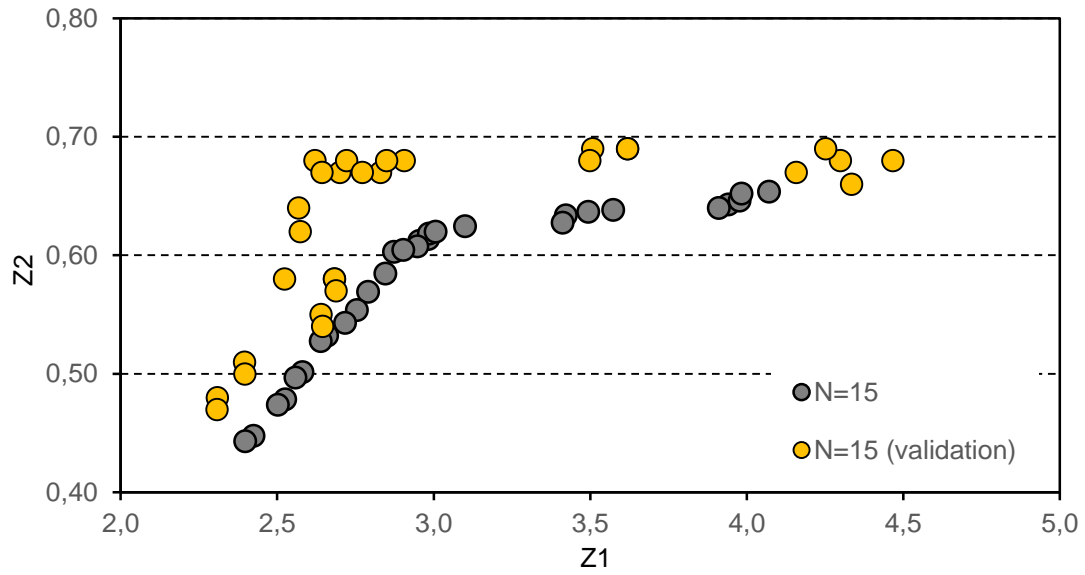
Για το Σενάριο 5 παρατηρείται σχεδόν ταύτιση των τιμών με τα αποτελέσματα της επαλήθευσης να έχουν καλύτερη απόδοση όσο αυξάνεται το πλήθος των αισθητήρων.

5.2.2 Δίκτυο 2: Ky3

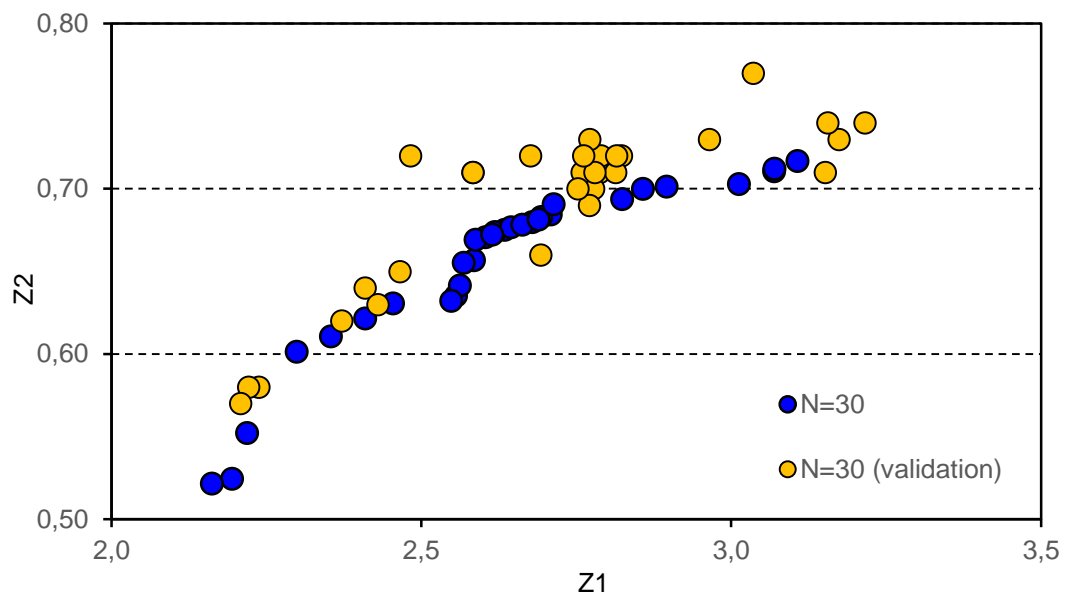
Σενάριο 1



Σχήμα 5.26: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για $N = 5$ (Σενάριο 1 - Δίκτυο 2)

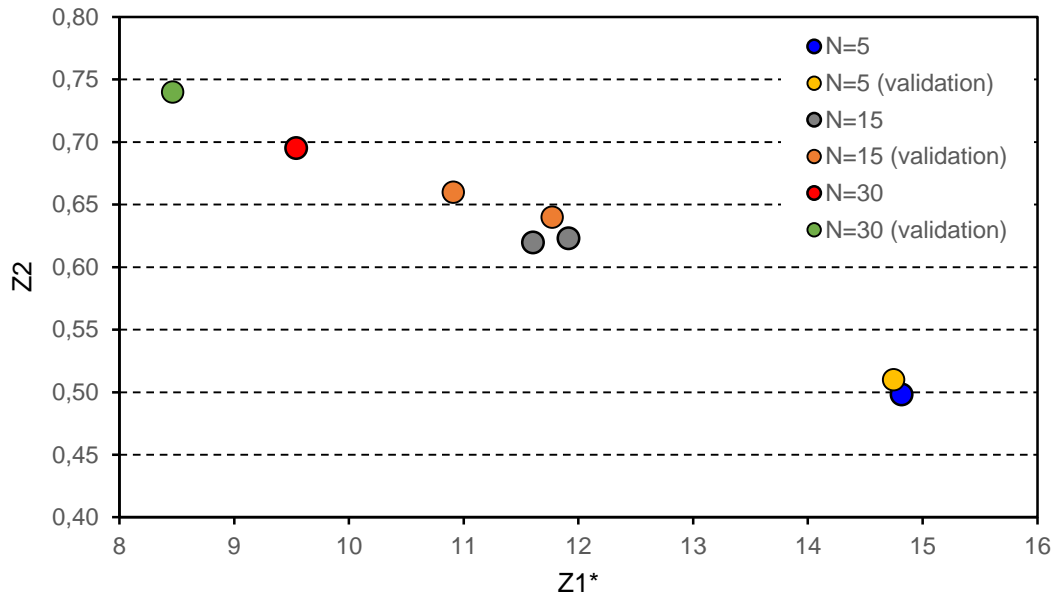


Σχήμα 5.27: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για $N = 15$ (Σενάριο 1 - Δίκτυο 2)



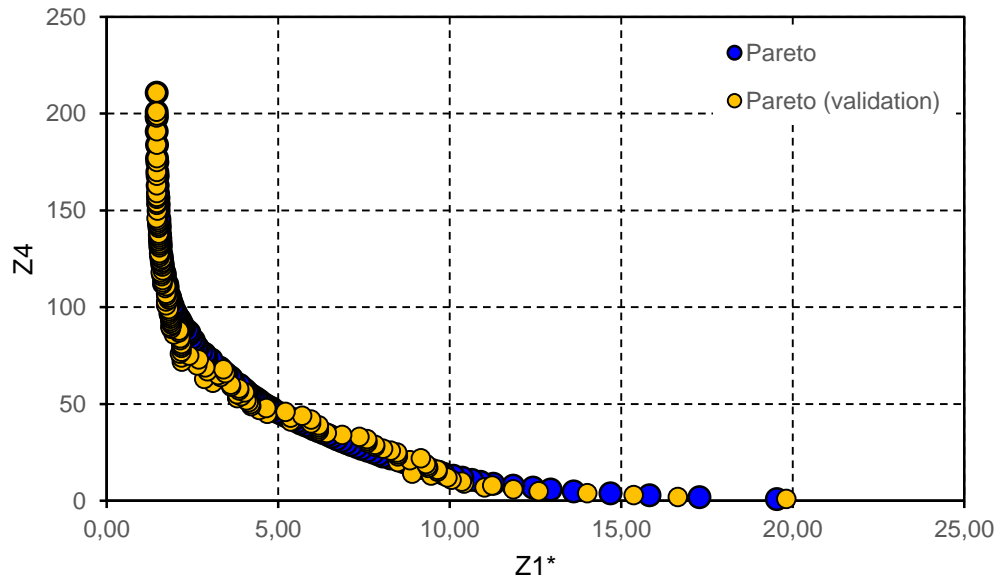
Σχήμα 5.28: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για $N = 30$ (Σενάριο 1 - Δίκτυο 2)

Σενάριο 4



Σχήμα 5.29: Σύγκριση βέλτιστων λύσεων και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 4 - Δίκτυο 2)

Σενάριο 5



Σχήμα 5.30: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 5 - Δίκτυο 2)

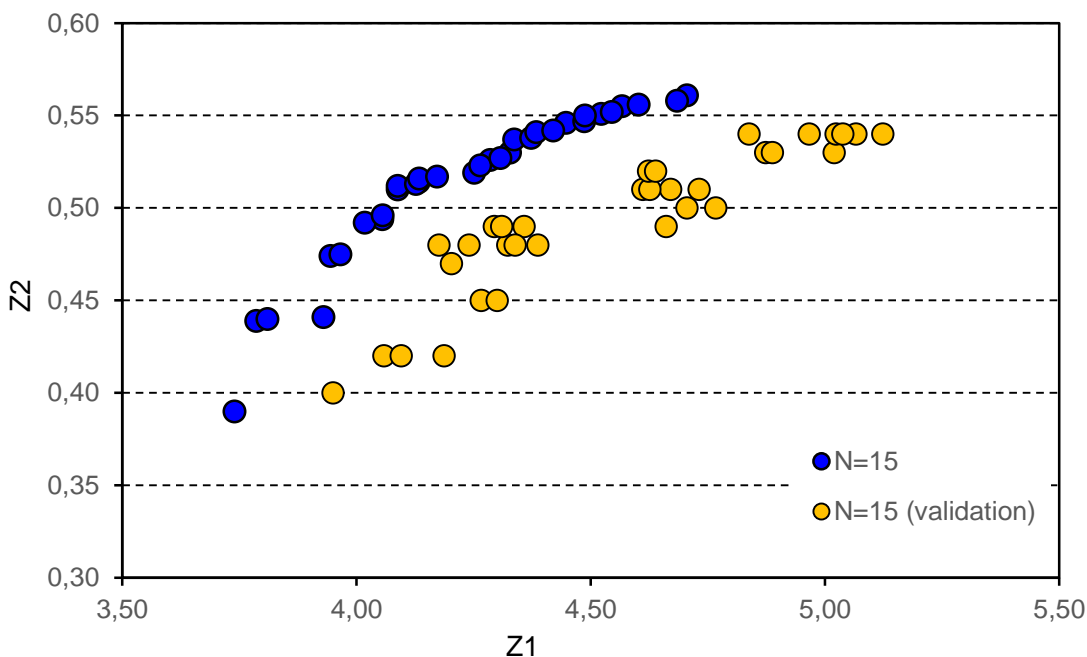
Στο Σενάριο 1 παρατηρούμε ότι για $N = 5$ τα αποτελέσματα της επαλήθευσης ανταποκρίνονται σε γενικές γραμμές πολύ καλά, καθώς οι τιμές είναι πολύ κοντά με αυτές της βελτιστοποίησης και μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις οι λύσεις έχουν καλύτερες αποδόσεις. Για $N = 15$ & 30 τα αποτελέσματα της επαλήθευσης στην πλειοψηφία τους παρουσιάζουν καλύτερες αποδόσεις από την βελτιστοποίηση, γεγονός που αποδεικνύει ότι η χωροθέτηση των αισθητήρων είναι εύστοχη, καθώς καλύπτει και άλλα γεγονότα εισαγωγής χημικής ουσίας και μάλιστα επιτυγχάνοντας την ανίχνευση σε μικρότερο χρόνο και με μεγαλύτερη πιθανότητα.

Στο Σενάριο 4 παρατηρούμε ότι οι τιμές ταυτίζονται για $N = 5$ ενώ για $N = 15$ & 30 η επαλήθευση δίνει καλύτερες τιμές χρόνου και πιθανότητας ανίχνευσης, επιβεβαιώνοντας την καλή συμπεριφορά των θέσεων των αισθητήρων και σε άλλα επεισόδια εισαγωγής ρύπου.

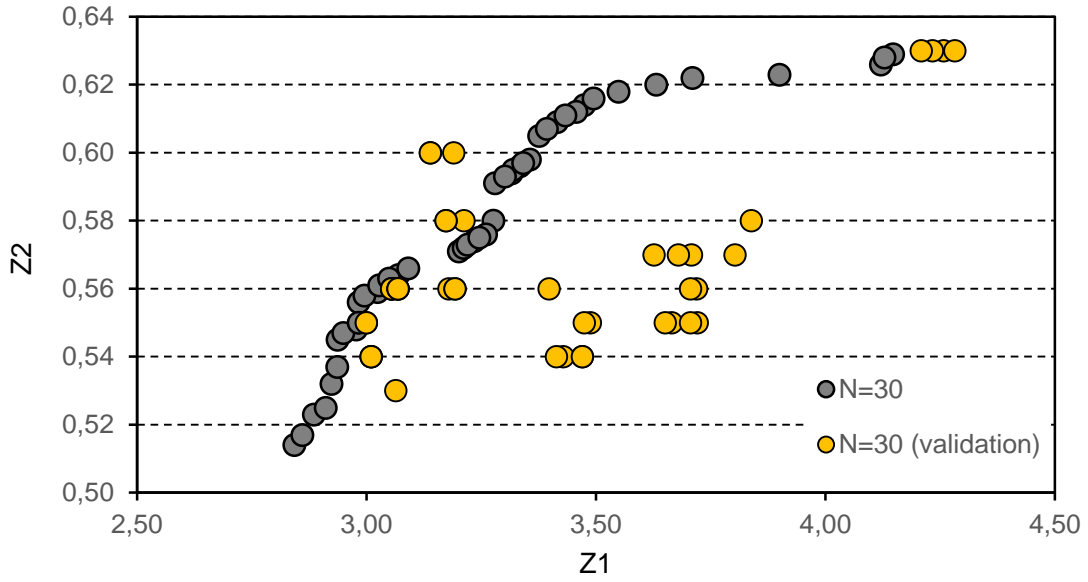
Στο Σενάριο 5 παρατηρείται σχεδόν ταύτιση των τιμών, γεγονός που σημαίνει ότι αναμένεται παρόμοια συμπεριφορά του δικτύου αισθητήρων και σε άλλα τυχαία σενάρια επίθεσης.

5.2.3 Δίκτυο 3: Ky5

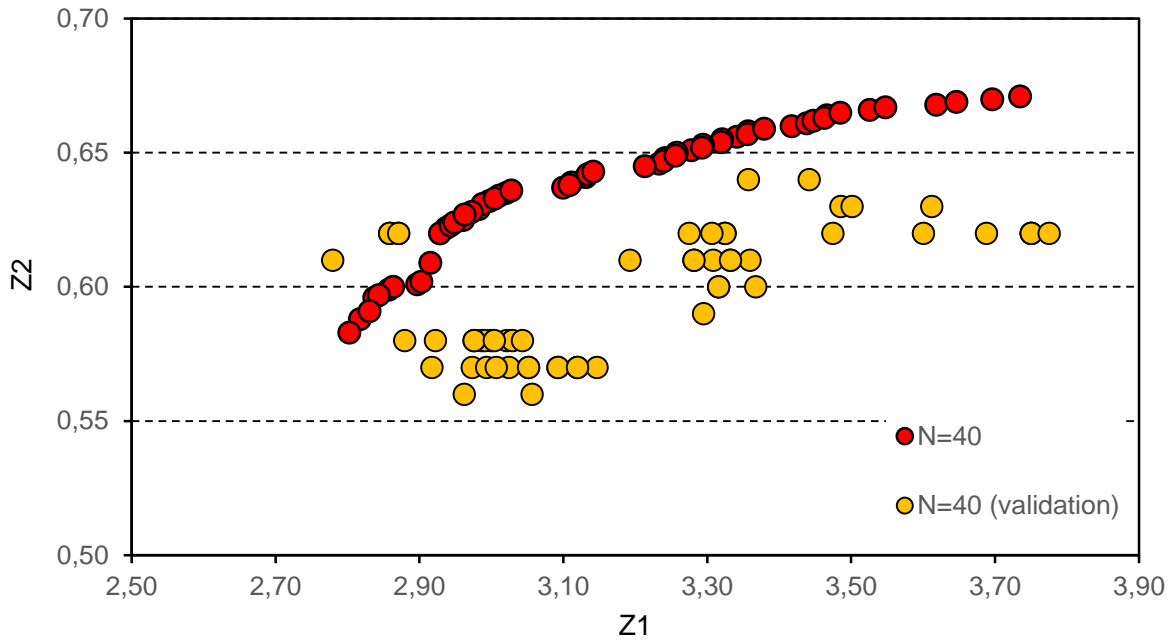
Σενάριο 1



Σχήμα 5.31: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για $N = 15$ (Σενάριο 1 - Δίκτυο 3)

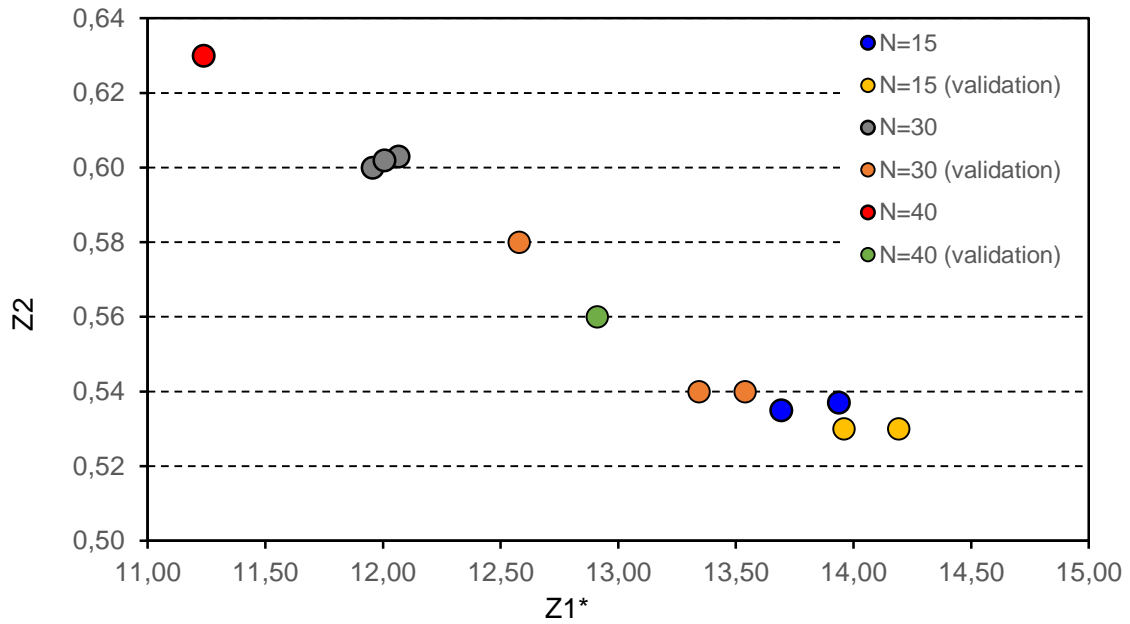


Σχήμα 5.32: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 30 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 3)



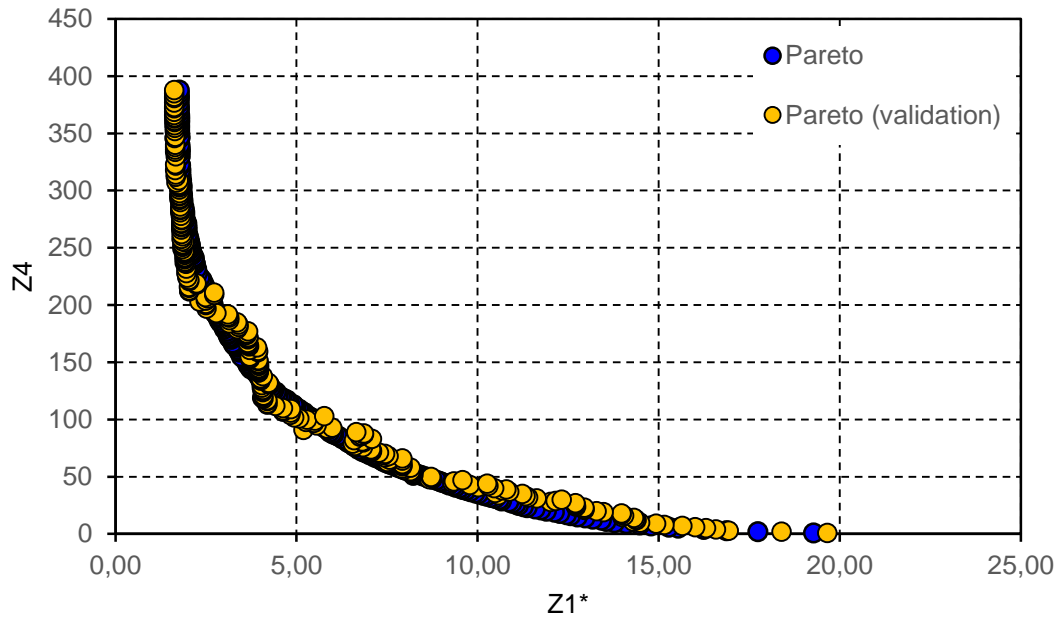
Σχήμα 5.33: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης για N = 40 (Σενάριο 1 - Δίκτυο 3)

Σενάριο 4



Σχήμα 5.34: Σύγκριση βέλτιστων λύσεων και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 4 - Δίκτυο 3)

Σενάριο 5



Σχήμα 5.35: Σύγκριση μετώπου Pareto και αποτελεσμάτων επαλήθευσης (Σενάριο 5 - Δίκτυο 3)

Στην περίπτωση του Δικτύου 3 τα αποτελέσματα διαφέρουν αρκετά. Στο Σενάριο 1 και για τις τρεις τιμές πλήθους αισθητήρων τα αποτελέσματα της επαλήθευσης έχουν χειρότερες αποδόσεις στα 100 τυχαία σενάρια που επιλέχθηκαν. Παρόμοια εικόνα παρατηρείται και στο Σενάριο 4. Τα αποτελέσματα αυτά είναι πιθανόν να οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικά για τη βελτιστοποίηση επιλέχθηκε μικρός αριθμός σεναρίων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν 1000 σενάρια από τα 10152 πιθανά σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας και αυτό έγινε, καθώς για μεγαλύτερο αριθμό σεναρίων η προσομοίωση θα ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα ή και πρακτικά αδύνατη δεδομένης της μνήμης ενός συμβατικού υπολογιστή. Επίσης, το πλήθος των αισθητήρων που επιλέχθηκε για δοκιμή πιθανόν να είναι μικρό και γι' αυτό το λόγο δεν ανταποκρίνεται το ίδιο αποτελεσματικά όπως στα σενάρια βελτιστοποίησης.

Ωστόσο, στο σενάριο 5 οι αποδόσεις των λύσεων στην επαλήθευση σχεδόν ταυτίζονται με αυτές της βελτιστοποίησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Συμπεράσματα - Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την βέλτιστη χωροθέτηση των αισθητήρων ποιότητας σε δίκτυα ύδρευσης. Πιο συγκεκριμένα, βελτιστοποιήθηκαν ο αναμενόμενος χρόνος, η πιθανότητα ανίχνευσης, ο αναμενόμενος όγκος νερού που καταναλώθηκε μέχρι την ανίχνευση και μία δεύτερη προσέγγιση του χρόνου ανίχνευσης. Τέλος, με δεδομένες τις βέλτιστες λύσεις, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της επαλήθευσης (validation) με στόχο την εκτίμηση της απόδοσης των λύσεων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση σε άλλα τυχαία σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας στο δίκτυο.

Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται στα εξής:

- Η βελτιστοποίηση της χωροθέτησης των αισθητήρων ποιότητας αποτελεί πολυκριτηριακό πρόβλημα. Ως εκ τούτου κρίσιμο στάδιο της μεθοδολογίας αποτελεί η επιλογή των αντικειμενικών συναρτήσεων. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα η ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου στην ανθρώπινη υγεία αποτελεί έναν, ευρέως, αποδεκτό στόχο και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι κριτηρίων σχετικών με την ανθρώπινη υγεία.
- Όσον αφορά το Σενάριο 1, γίνεται φανερό ότι οι συναρτήσεις Z_1 και Z_2 δεν βελτιστοποιούνται ταυτόχρονα με μία λύση αλλά προκύπτει ένα Pareto μη κυριαρχούμενων λύσεων. Για όλα τα δίκτυα παρατηρείται ότι με την αύξηση του πλήθους αισθητήρων, βελτιώνονται αισθητά οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Επίσης, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των αισθητήρων, τόσο πιο μικρό εύρος τιμών των συναρτήσεων προκύπτει, που σημαίνει ότι οι λύσεις δεν έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους και το δίκτυο αισθητήρων είναι πιο αξιόπιστο.
- Σχετικά με την διάταξη των θέσεων στο δίκτυο, παρατηρείται και στα τρία δίκτυα ότι οι θέσεις που ελαχιστοποιούν τον χρόνο ανίχνευσης ενός επεισοδίου είναι σχετικά συγκεντρωμένες στο δίκτυο. Αντίθετα, οι θέσεις των λύσεων, που μεγιστοποιούν την πιθανότητα ανίχνευσης είναι πιο διάσπαρτες στο δίκτυο και σε κάποιες περιπτώσεις σε πιο ανάντη περιοχές.
- Για το Σενάριο 2, όπου βελτιστοποιούνται παράλληλα οι συναρτήσεις Z_1 , Z_2 και Z_3 προκύπτουν, όπως είναι λογικό, χειρότερες τιμές των συναρτήσεων από τις αντίστοιχες τιμές του Σεναρίου 1, καθώς πρέπει να ικανοποιούνται και τα τρία κριτήρια βελτιστοποίησης.

Επίσης, σε δύο δίκτυα παρατηρείται ότι η λύση που δίνει την καλύτερη τιμή για την Z_1 είναι η χειρότερη για την Z_3 .

- Σχετικά με τη διάταξη των θέσεων, διαφαίνεται ότι όταν υπεισέρχεται η συνάρτηση Z_3 στη βελτιστοποίηση οι θέσεις των αισθητήρων τοποθετούνται σε θέσεις κοντά σε πηγές, δεξαμενές και ακραίους κόμβους του δικτύου.
- Για το Σενάριο 3 είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των αισθητήρων (Z_4), μειώνεται ο χρόνος ανίχνευσης (Z_1) και αυξάνεται η πιθανότητα (Z_2). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι από κάποια τιμή του πλήθους αισθητήρων και άνω, δεν μεταβάλλονται οι δύο άλλες συναρτήσεις. Δηλαδή, παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές της Z_4 οι λύσεις έχουν μεγάλη διασπορά ενώ με την αύξηση της μεταβλητής οι λύσεις συγκλίνουν.
- Στο Σενάριο 4 προκύπτει μία έως τρεις λύσεις για κάθε περίπτωση σε όλα τα δίκτυα. Αυτό συμβαίνει καθώς οι στοιχικές συναρτήσεις Z_1^* και Z_2 είναι ισοδύναμες και ο αλγόριθμος μπορεί να βελτιστοποιήσει ταυτόχρονα με μία λύση και τις δύο. Η τροποποιημένη συνάρτηση Z_1^* ορίστηκε έτσι ώστε να εμπεριέχει εμμέσως την πιθανότητα ανίχνευσης και με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η παράλειψη της Z_2 και κατά συνέπεια μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος. Επιπλέον, παρατηρείται για δίκτυο με περισσότερους αισθητήρες υπάρχει μία σαφής βελτίωση στις επιδόσεις των συναρτήσεων.
- Όσον αφορά το Σενάριο 5, για υψηλές τιμές της μεταβλητής Z_4 , ο χρόνος Z_1^* μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, παρατηρείται ότι από κάποια τιμή του πλήθους αισθητήρων και άνω δε μεταβάλλεται περαιτέρω ο χρόνος.
- Η τιμή άνω της οποίας ο χρόνος δε μειώνεται ποικίλλει από δίκτυο σε δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, για το Δίκτυο 1 η τιμή είναι ίση με το 32% του συνόλου των κόμβων, για το Δίκτυο 2 είναι ίση με το 38% και για το Δίκτυο 3 ίση με 50%.
- Για τη διαδικασία της επαλήθευσης, εξάγονται τα γενικά συμπεράσματα ότι για τα Δίκτυα 1 και 2 οι λύσεις ανταποκρίνονται σε γενικές γραμμές πολύ καλά και σε άλλα σενάρια εισαγωγής χημικής ουσίας. Στην περίπτωση του Δικτύου 3, οι λύσεις έχουν χειρότερες επιδόσεις στα Σενάρια 1 και 4, γεγονός που πιθανόν οφείλεται στο ότι απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός αισθητήρων, ώστε να έχουμε πιο σταθερό ως προς τις επιδόσεις του δικτύου.
- Συγκριτικά τα τρία δίκτυα φαίνεται να έχουν σε γενικές γραμμές παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζοντας, ωστόσο, κάποιες διαφοροποιήσεις. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι στα μεγαλύτερα δίκτυα με την αύξηση του πλήθους αισθητήρων έχουμε και μεγαλύτερη μετατόπιση του μετώπου Pareto προς καλύτερες τιμές.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σχετικά με τη μέθοδο βελτιστοποίησης, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να διατυπωθούν ορισμένες προτάσεις προς την κατεύθυνση της βελτίωσης ή και εξέλιξής της. Πιο συγκεκριμένα:

- Η αρχική επιλογή των συναρτήσεων θα μπορούσε να είναι διαφορετική ή να τεθούν κάποιοι περιορισμοί για τις τιμές που θα λαμβάνουν, ώστε να εξεταστούν διάφοροι συνδυασμοί συναρτήσεων και πώς αυτοί επηρεάζουν τη διαδικασία επίλυσης αλλά και το τελικό αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης.
- Θα είχε ενδιαφέρον να θεωρηθούν σενάρια έγχυσης χημικής ουσίας με διαφορετική διάρκεια (π.χ. 1h, 3h) και διαφορετική πιθανότητα να συμβούν, δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία θεωρήθηκαν ισοπίθανα, δίνοντας μεγαλύτερη πιθανότητα σε εκείνα που θα έκαναν την ανίχνευση δυσχερέστερη.
- Όσον αφορά τα δίκτυα εφαρμογής, η επιλογή διαφορετικών μεγεθών δικτύου αλλά και η εκτέλεση δοκιμών με περισσότερες τιμές πλήθους αισθητήρων θα μπορούσε να συμβάλλει στη διαμόρφωση μίας γενικότερης και ασφαλέστερης εικόνας για το πώς μεταβάλλονται οι τιμές των συναρτήσεων και οι θέσεις των αισθητήρων σε διαφορετικές περιπτώσεις.
- Τέλος, θα μπορούσε να εισαχθούν περιορισμοί για τα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων, δίνοντας προτεραιότητα σε κόμβους με μεγάλη ζήτηση ή κοντά σε ευάλωτες περιοχές ή εγκαταστάσεις, με αποτέλεσμα την πιο εύστοχη αναζήτηση του αλγόριθμου και κατά συνέπεια τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Alzamora, F., & Ayala, H. (2006). *Optimal sensor location for detecting contamination events in water distribution systems using topological algorithms*. Paper presented at the Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.
- Aral, M. M., et al. (2009). Optimal design of sensor placement in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(1), 5-18.
- Araujo, L. S., et al. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 133-149.
- Berry, J. W., et al. (2005). Sensor placement in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3), 237-243.
- Burgschweiger, J., et al. (2009). Optimization models for operative planning in drinking water networks. *Optimization and Engineering*, 43-73.
- Cohon, J. L. (1985). Multicriteria programming: brief review and application. In J. S. Gero (Ed.), *Design Optimization*. Orlando, Florida: Academic Press, 163–191.
- Commission, E. (2004). *Critical Infrastructure Protection in the fight against terrorism*.
- Deb, K., et al. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- Dorini, G., et al. (2006). *An efficient algorithm for sensor placement in water distribution systems*. Paper presented at the Wat. Dist. Syst. An. Conf.
- Eliades, D., & Polycarpou, M. (2006). *Iterative deepening of Pareto solutions in water sensor networks*. Paper presented at the Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.
- Ghimire, S. R., & Barkdoll, B. D. (2006). *Heuristic method for the battle of the water network sensors: Demand-based approach*. Paper presented at the Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Guan, J., et al. (2006). *Optimization model and algorithms for design of water sensor placement in water distribution systems*. Paper presented at the 8th Annual Symp. on Water Distribution Systems Analysis.
- Gueli, R. (2006). *Predator-prey model for discrete sensor placement*. Paper presented at the 8th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis, Cincinnati, Ohio.
- Hart, W. E., & Murray, R. (2010). Review of sensor placement strategies for contamination warning systems in drinking water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(6), 611-619.
- Huang, J. J., et al. (2006). *Multi-objective optimization for monitoring sensor placement in water distribution systems*. Paper presented at the 8th Annual Symp. on Water Distribution Systems Analysis.
- Jolly, M. D., et al. (2013). Research database of water distribution system models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(4), 410-416.

- Kessler, A., et al. (1998). Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(4), 192-198.
- Krause, A., et al. (2008). Efficient sensor placement optimization for securing large water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(6), 516-526.
- Kumar, A., et al. (1999). Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(5), 308-310.
- Liberatore, S., & Sechi, G. M. (2009). Location and calibration of valves in water distribution networks using a scatter-search meta-heuristic approach. *Water resources management*, 1479-1495.
- MATLAB. (2015a). Global Optimization Toolbox, User's Guide.
- McCormick, G., & Powell, R. S. (2004). Derivation of near-optimal pump schedules for water distribution by simulated annealing. *Journal of the Operational Research Society*, 728-736.
- Michalewicz, Z. (1996). *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*. New York: Springer Science & Business Media.
- Nicklow, J., et al. (2009). State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 412-432.
- Nicolini, M., & Zovatto, L. (2009). Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 178-187.
- Ostfeld, A., & Salomons, E. (2004). Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130.5, 377-385.
- Ostfeld, A., et al. (2008). The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(6), 556-568.
- Pareto, V. (1896). *Cours D'Economie Politique*, Volume 1. Lausanne: F.Rouge.
- Preis, A., & Ostfeld, A. (2006). Multiobjective sensor design for water distribution systems security. *8th Annual Symp. on Water Distribution Systems Analysis*. New York: Environmental and Water Resources Institute of ASCE (EWRI of ASCE).
- Preis, A., & Ostfeld, A. (2008). Multiobjective contaminant sensor network design for water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 134.4, 366-377.
- Propato, M. (2006). Contamination warning in water networks: General mixed-integer linear models for sensor location design. *Journal of water resources planning and management*, 132(4), 225-233.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2: users manual*.
- Sakarya, B. A., & Mays, L. W. (2000). Optimal operation of water distribution pumps considering water quality. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 210-220.
- Trachtman, G. B. (2006). A 'strawman' common sense approach for water quality sensor site selection. Paper presented at the Proc., 8th Annual Water Distribution System Analysis Symp.

- Watson, J. P., et al. (2004). A multiple-objective analysis of sensor placement optimization in water networks. *Proceedings of ASCE World Water and Environmental Resources*, 456-465.
- Zitzler, E. (1999). Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications. *Vol. 63. Ithaca: Shaker.*
- Γεωργιλιάκης, Π. Σ. (2004). Εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας *Τεχνικά Χρονικά, III.*
- Ευστρατιάδης, Α. (2008). Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων. *Διδακτορική Διατριβή.*
- Καραλούλης, Α. (2011). Αξιολόγηση αστικών δικτύων ύδρευσης. Εφαρμογή: Πόλη των Σοφάδων. *Διπλωματική Εργασία.*
- Καρκατσούλη, Ε. (2008). Χρήση μοντέλων επίλυσης κυκλοφοριακών δικτύων ύδρευσης οικισμών. *Διπλωματική Εργασία.*
- Κουμούσης, Γ. (2012). Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κατασκευών με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων. *Διπλωματική Εργασία.*
- Κουτσογιάννης, Δ., & Ευστρατιάδης, Α. (2015). *Υδροδοτικά Έργα, Σημειώσεις Αστικών Υδραυλικών Έργων.* Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- Κωνσταντινίδης, Ι. (2009). Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου NSGA:II για τον καθορισμό βέλτιστης τροχιάς σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη. *Διπλωματική Εργασία.*
- Λυκοθανάσης, Σ. (2001). Θεματική Ενότητα: Τεχνητή Νοημοσύνη και Εφαρμογές *Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, (Τόμος Γ')*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας.
- Μακρόπουλος, Χ., & Ευστρατιάδης, Α. (2012). Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Μαθήματος "Υδροπληροφορική": Ε.Μ.Π.
- Μπατιστάκης, Δ. (2010). Υλοποίηση αλγορίθμου πολυκριτήριας εξελικτικής βελτιστοποίησης και εφαρμογή του στην κατασκευή επενδυτικών χατοφυλακίων. *Διπλωματική Εργασία.*
- Παναγόπουλος, Ι. Ν. (2011). Λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων μέτρων για την προστασία της χημικής κατάστασης του υδάτινου περιβάλλοντος από μη σημειακές πηγές ρύπανσης. *Διδακτορική διατριβή.*
- Τσακίρης, Γ. (2010). *Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση Τόμος Ι - Αστικά Υδραυλικά Έργα.* Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.