



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ »



**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΘΡΑΥΣΕΩΝ ΣΕ
ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ**

Σταυρούλα Σιγούρου

Επιβλέπων: Αναπλ. Καθηγητής Χ. Μακρόπουλος

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ
&
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων.....	3
Κατάλογος ορολογίας, συμβολισμών και ακρωνύμων.....	5
Ευρετήριο πινάκων	7
Ευρετήριο εικόνων.....	9
Ευχαριστίες.....	13
Περίληψη	15
Abstract.....	17
Δήλωση αποποίησης ευθυνών	19
1 Εισαγωγή	21
1.1 Το δίκτυο ύδρευσης ως πεδίο εφαρμογής και το πρόβλημα της ιεράρχησης αντικατάστασης αγωγών	21
1.2 Τοποθέτηση του προβλήματος.....	22
2 Διαρροές και θραύσεις.....	25
2.1 Αστικό νερό.....	25
2.2 Αίτια διαρροών και θραύσεων	26
2.3 Κατηγορίες απωλειών	26
2.3.1 Μη ανταποδοτικό νερό	28
2.4 Παραδείγματα καταγραφής και αντιμετώπισης των απωλειών σε δίκτυα διανομής	30
3 Σύνολα δεδομένων (datasets).....	35
4 Εκτίμηση τρωτότητας/επικινδυνότητας θραύσης (vulnerability) αγωγών	41
4.1 Η μέθοδος EPR	41
4.2 Προετοιμασία δεδομένων για είσοδο στο EPR (Data preparation) και ρυθμίσεις EPR (EPR settings).....	45
4.3 Αποτελέσματα – Συζήτηση.....	56
5 Εκτίμηση κρισιμότητας (criticality) αγωγών.....	73
5.1 Θεωρία γράφων - Προεπεξεργασία δεδομένων	73
5.2 Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	80
6 Μεθοδολογία ιεράρχησης/προτεραιότητας αντικατάστασης αγωγών (optimization strategy)	91
6.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση	91

6.1.1	Χωρικά Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Spatial decision support systems - SDSS).....	92
6.2	Διαδικασία λήψης απόφασης (decision making) - Επιλογή κριτηρίων αξιολόγησης	93
6.2.1	Πυκνότητα πληθυσμού και Διατεταγμένος Σταθμισμένος Μέσος Όρος (Order weighted averaging) – Αποτελέσματα	94
6.2.2	Ενναλακτικά σενάρια και εκτίμηση κόστους αντικατάστασης αγωγών ανά σενάριο.....	106
6.2.3	Ιεράρχηση αντικατάστασης αγωγών	111
7	Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	113
	Κώδικας	117
	Παράρτημα Χαρτών	119
	Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	127
	Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία	131

Κατάλογος ορολογίας, συμβολισμών και ακρωνύμων

Ελληνική ορολογία	Αγγλική ορολογία	Ακρόνυμο
Παράμετρος μοντέλου των εκφράσεων EPR	Model parameters for EPR expressions	a_j
Μέσο σφάλμα	Average error	AVG
Παρατηρημένες θραύσεις	Bursts as facts	Brt
Προσομοιωμένες θραύσεις μέσω EPR	Bursts modelled by EPR	Brt _{EPR}
Έλλειψη συνδεσιμότητας	connectivity loss	C _L
Συντελεστής προσδιορισμού	Coefficient of Determination	CoD
Ισοδύναμη εξωτερική διάμετρος αγωγών ανά κλάση	Equivalent external diameter of pipe class	DI
Σύστημα λήψης αποφάσεων	Decision Support System	DSS
Υδραυλικά απομονωμένη περιοχή	Districted Metered Area	DMA
Εξελικτική Πολυωνυμική παλινδρόμηση	Evolutionary Polynomial Regression	EPR
Εξελικτικό πολυώνυμο	Evolutionary Polynomial	EP
Πίνακας εκθετών μεταβλητών εισόδου EPR	matrix of exponents of EPR input variables	ES
Γενετικός αλγόριθμος	Genetic Algorithm	GA
Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών	Geographical Information System	GIS
Παγκόσμιος Οργανισμός Νερού	International Water Association	IWA
Συνολικό μήκος αγωγών ανά κλάση	Total length of pipe class	L, L _{class}
Ελάχιστα τετράγωνα	Least Square	LS
Μεγάλης κλίμακας Ορθοφωτοχάρτες	Large Scale Orthophotomaps	LSO
Αριθμός ψευδοπολυωνυμικών όρων	number of EPR pseudo-polynomial terms	m
Ισοδύναμο υλικό κατασκευής αγωγών ανά κλάση	Equivalent construction material of pipe class	M
Πολυκριτηριακή λήψη απόφασης	Multi-criteria decision making	MCDM
Γενετικός Αλγόριθμος Πολλαπλών στόχων	Multi - Objective Genetic Algorithm	MOGA
Πλήθος αγωγών ανά κλάση	number of pipes in pipe class	N
Διατεταγμένος Σταθμισμένος Μέσος Όρος	Ordered Weighted Averaging	OWA
Δείκτες απόδοσης	Performance Indicators	PI
Χωρικά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων	Spatial decision support systems	SDSS
Άθροισμα τετραγωνικών σφαλμάτων	Sum of Square Errors	SSE

Δίκτυο διανομής νερού	Water Distribution Network	WDN
Μεταβλητή εισόδου EPR	EPR input variable	X_i
Μεταβλητή εξόδου EPR	EPR output variable	Y

Ευρετήριο πινάκων

- Πίνακας 1: Πρότυπο Ισοζύγιο Νερού (IWA Standard Water Balance) (IWA, 2000)
- Πίνακας 2: Κατηγοριοποίηση απωλειών σε δίκτυο ύδρευσης (IWA, 2000)
- Πίνακας 3: Όγκος Μη Ανταποδοτικού Νερού (δισ.μ3/έτος), όπως αναφέρουν οι Kingdom et al., 2006 (Κανακούδης & Τσιφτσιλή, 2015)
- Πίνακας 4: Αξία μη ανταποδοτικού νερού (δισ.USD/έτος) για τις ανεπτυγμένες χώρες, για την Ευρασία και για τις αναπτυσσόμενες χώρες (Κανακούδης & Τσιφτσιλή, 2015)
- Πίνακας 5: Ποσοστό και κόστος μη ανταποδοτικού νερού ανά έτος (Appendix E, 2014)
- Πίνακας 6: Χρονική εξέλιξη απολήψεων από ταμιευτήρες, παροχής διυλιστηρίων και τιμολογημένης κατανάλωσης σύμφωνα με μετρήσεις της ΕΥΔΑΠ (Ευστρατιάδης κ.συν. 2009)
- Πίνακας 7: Αντιστοιχία υλικού κατασκευής αγωγών με κωδικοποιημένο αριθμό
- Πίνακας 8: Σύνολο δεδομένων κατηγοριοποιημένα ανά υλικό κατασκευής (M) και εξωτερική διάμετρο (DI)
- Πίνακας 9: Τύποι υλικών κατασκευής και πλήθος αγωγών για κάθε ένα τύπο
- Πίνακας 10: Τιμές εξωτερικής διαμέτρου και πλήθος αγωγών για κάθε μία
- Πίνακας 11: Σύνολα και υποσύνολα δεδομένων εισόδου στο EPR
- Πίνακας 12: Δεδομένα εκμάθησης (training data) κατηγοριοποιημένα ανά υλικό κατασκευής (M) και εξωτερική διάμετρο (DI)
- Πίνακας 13: Δεδομένα ελέγχου (testing data) κατηγοριοποιημένα ανά υλικό κατασκευής (M) και εξωτερική διάμετρο (DI)
- Πίνακας 14: Ο συντελεστής ακρίβειας CoD και $1 - \text{CoD}$ για κάθε μία από τις πολυωνυμικές σχέσεις που προέκυψαν
- Πίνακας 15: Τιμές των συντελεστών ακρίβειας/απόδοσης του EPR ανά μοντέλο
- Πίνακας 16: Τιμές του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης και ελέγχου στις πολυωνυμικές σχέσεις που εξετάζονται
- Πίνακας 17: Τιμές του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης και ελέγχου, πλήθος όρων και πλήθος μεταβλητών στις πολυωνυμικές σχέσεις
- Πίνακας 18: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές θραύσεων (μοντέλο 3) και τιμή τρωτότητας/επικινδυνότητας θραύσης ανά κλάση αγωγών
- Πίνακας 19: Τιμές του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης και ελέγχου, πλήθος όρων και πλήθος μεταβλητών στις πολυωνυμικές σχέσεις (TEΛΙΚΑ)
- Πίνακας 20: Τιμές του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης και ελέγχου, πλήθος όρων και πλήθος μεταβλητών στις πολυωνυμικές σχέσεις (ΑΡΧΙΚΑ)
- Πίνακας 21: Σύνολα και υποσύνολα δεδομένων εισόδου στο γράφο
- Πίνακας 22: Σύνολα και υποσύνολα δεδομένων εισόδου στο γράφο
- Πίνακας 23: Κωδικός σύνδεσης, κωδικός αγωγού από τον οποίο προέκυψε, κόμβος αρχής, κόμβος τέλος, πλήθος κόμβων χωρίς τροφοδοσία, τιμή έλλειψης συνδεσιμότητας, βαθμολογία, τιμή κρισιμότητας/σημαντικότητας

Πίνακας 24: Συχνότητα εμφάνισης και αθροιστική συχνότητα εμφάνισης για κάθε τιμή κρισιμότητας στο σύνολο των συνδέσεων

Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός Πίνακας συνόλων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στα στάδια της μεθοδολογίας

Πίνακας 26: Αντιστοιχία της γλωσσικής περιγραφής του βαθμού επιρροής με τιμές βαρών, θεωρώντας ότι πρόκειται για δύο κριτήρια αξιολόγησης (Bradshaw et al., 2011)

Πίνακας 27: Υποσύνολο των αγωγών με τις τιμές του εξυπηρετούμενου πληθυσμού για κάθε έναν

Πίνακας 28: Υποσύνολο των αγωγών με τις τιμές του εξυπηρετούμενου πληθυσμού και το αντίστοιχο βάρος για κάθε έναν

Πίνακας 29: Αρχικός κωδικός αγωγού (XTRID), κλάση (class), τιμή τρωτότητας (vuln), κρισιμότητας (criticality), εξυπηρετούμενος πληθυσμός (sum_pop), διατεταγμένο βάρος (weight_pop) και τιμή του δείκτη OWA για υποσύνολο αγωγών

Πίνακας 30: Εκτίμηση κόστους εγκατάστασης αγωγού ανά μέτρο

Πίνακας 31: Συνολικό μήκος και εκτιμώμενη δαπάνη αντικατάστασης για καθεμία από τις τρεις μεγαλύτερες κλάσεις

Πίνακας 32: Οι προς αντικατάσταση αγωγοί του 1ου σεναρίου

Πίνακας 33: Οι προς αντικατάσταση αγωγοί για καθεμία από τις 10 εργολαβίες που προτείνονται στο 2ο σενάριο

Πίνακας 34: Οι προς αντικατάσταση αγωγοί για το 1ο και για το 2ο σενάριο

Ευρετήριο εικόνων

- Εικόνα 1: Συνοπτικό διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που ακολουθείται
- Εικόνα 2: Πηγές μη ανταποδοτικού νερού (Appendix B, 2014)
- Εικόνα 3: Χρονική εξέλιξη απωλειών (Ευστρατιάδης κ.συν. 2009)
- Εικόνα 4: Ποσοστιαία μεταβολή απωλειών σε εσωτερικό δίκτυο ύδρευσης και σε εξωτερικό υδραγωγείο το χρονικό διάστημα 1978 έως 2000
- Εικόνα 5: Υδροδοτικό σύστημα της πόλης της Θεσσαλονίκης (Ζαφειράκου, 2013)
- Εικόνα 6: Εκσκαφή για επιδιόρθωση σε αγωγή με διαρροή στην Θεσσαλονίκη (Ζαφειράκου, 2013)
- Εικόνα 7: Θεματικός χάρτης των αγωγών και των υδραυλικών τεμαχίων στη Ζώνη Μουράτη
- Εικόνα 8: Ζώνη Μουράτη με υπόβαθρο ορθοφωτογραφία του Εθνικού Κτηματολογίου έτους 2007-2008
- Εικόνα 9: Απόσπασμα της Google Maps της ευρύτερης περιοχής της Ζώνης Μουράτη
- Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής της μεθόδου EPR (Giustolisi et al., 2008)
- Εικόνα 11: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης αγωγών βάσει κλάσης υλικού κατασκευής - εξωτερικής διαμέτρου
- Εικόνα 12: Θεματικός χάρτης ταξινομημένων αγωγών βάσει του υλικού κατασκευής τους
- Εικόνα 13: Θεματικός χάρτης ταξινομημένων αγωγών βάσει της εξωτερικής τους διαμέτρου
- Εικόνα 14: Διακύμανση του πλήθους των θραύσεων για κάθε κλάση στο σύνολο των δεδομένων εκμάθησης (training data) και στο σύνολο δεδομένων ελέγχου (testing data)
- Εικόνα 15: Ρυθμίσεις του EPR πριν την εκτέλεση (user interface)
- Εικόνα 16: Διακύμανση των δεδομένων εισόδου και εξόδου ανά κλάση για το σύνολο εκμάθησης (training data) και για το σύνολο ελέγχου (testing data), αντίστοιχα
- Εικόνα 17: Διαγράμματα Pareto της βέλτιστης γενιάς που επιλέχθηκε από τον αλγόριθμο
- Εικόνα 18: Διάγραμμα Pareto ακρίβειας - πλήθους μεταβλητών εισόδου X_i των πολωνύμων της βέλτιστης γενιάς
- Εικόνα 19: Διάγραμμα Pareto ακρίβειας - πλήθους σταθερών πολωνυμικών παραμέτρων a_j των πολωνύμων της βέλτιστης γενιάς
- Εικόνα 20: Συμβολικές εκφράσεις πολωνυμικών σχέσεων που προκύπτουν
- Εικόνα 21: Διαγράμματα Pareto ακρίβειας - πλήθους μεταβλητών εισόδου X_i και ακρίβειας - πλήθους σταθερών πολωνυμικών παραμέτρων a_j των πολωνύμων της βέλτιστης γενιάς
- Εικόνα 22: Διακύμανση των προσομοιωμένων τιμών θραύσεων σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές εφαρμόζοντας τις σχέσεις των μοντέλων στα δεδομένα εκμάθησης (training data) και στα δεδομένα ελέγχου (testing data)
- Εικόνα 23: Τιμές των συντελεστών ακρίβειας/απόδοσης του EPR ανά μοντέλο, ανάλογα με τον αριθμό των όρων στην εκάστοτε πολωνυμική σχέση
- Εικόνα 24: Τιμές των συντελεστών απόδοσης SSE και CoD ανά μοντέλο, ανάλογα με τον αριθμό των όρων στην εκάστοτε πολωνυμική σχέση εφαρμόζοντας το σύνολο δεδομένων ελέγχου (testing data)
- Εικόνα 25: Διακύμανση παρατηρημένων (Brt) και προσομοιωμένων (Brt EPR) τιμών θραύσεων για κάθε κλάση αγωγών βάσει του μοντέλου 3

Εικόνα 26: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων αγωγών βάσει της τιμής τρωτότητας (leakage vulnerability map)

Εικόνα 27: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων αγωγών βάσει της τιμής τρωτότητας σε συνδυασμό με τις καταγεγραμμένες θραύσεις

Εικόνα 28: Συμβολικές εκφράσεις πολυωνυμικών σχέσεων που προκύπτουν μετά την μεταβολή των τιμών των εκθετών (αριστερά) σε σχέση με τις αρχικές τιμές εκθετών (δεξιά)

Εικόνα 29: Συμβολικές εκφράσεις πολυωνυμικών σχέσεων που προκύπτουν για $m=6$ (ΑΡΧΙΚΑ), $m=3$, $m=4$ και $m=8$

Εικόνα 30: Τμήμα του δικτύου διανομής στη Ζώνη Μουράτη

Εικόνα 31: Απόσπασμα του πίνακα συνδεσιμότητας (connectivity table) των αγωγών σε περιβάλλον ArcGIS (attribute table)

Εικόνα 32: Απόσπασμα του πίνακα συνδεσιμότητας (connectivity table) των αγωγών σε περιβάλλον ArcGIS (attribute table)

Εικόνα 33: Σημείο υδροδότησης της Ζώνης

Εικόνα 34: Εκτύπωση μη συνεκτικού γράφου

Εικόνα 35: Δίκτυο διανομής της Ζώνης Μουράτη, όπου φαίνονται οι συνδέσεις και οι κόμβοι που ανήκουν σε αγωγούς μεταφοράς (transit)

Εικόνα 36: Τμήμα του δικτύου (συνεκτικές συνιστώσες) που δεν συνδέονται με το υπόλοιπο δίκτυο

Εικόνα 37: Τμήμα του δικτύου με συνδέσεις και κόμβους που δεν συνδέονται στο υπόλοιπο δίκτυο

Εικόνα 38: Εκτύπωση τελικού μη κατευθυνόμενου γράφου (undirected graph)

Εικόνα 39: Εξαγωγή τελικού μη κατευθυνόμενου γράφου (undirected graph) στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87)

Εικόνα 40: Απόσπασμα των αρχικών συνδέσεων δικτύου διανομής

Εικόνα 41: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης συνδέσεων ανά κλάση τιμών κρισιμότητας

Εικόνα 42: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης των συνδέσεων βάσει έλλειψης συνδεσιμότητας

Εικόνα 43: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης των συνδέσεων βάσει τιμής κρισιμότητας

Εικόνα 44: Επιμέρους ζώνες αγωγών υψηλής κρισιμότητας

Εικόνα 45: Οι δύο πιο κρίσιμες συνδέσεις της Ζώνης

Εικόνα 46: Απόσπασμα του δικτύου διανομής

Εικόνα 47: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης εξυπηρετούμενου πληθυσμού ανά ιδιωτική σύνδεση και μεγάλων καταναλωτών

Εικόνα 48: Τμήμα του δικτύου, όπου απεικονίζονται τα πολύγωνα με την αθροιστική τιμή του εξυπηρετούμενου πληθυσμού

Εικόνα 49: Πίνακας ιδιοτήτων γραμμών που προέκυψαν από τα πολύγωνα

Εικόνα 50: Ιστόγραμμα συχνότητας τιμών εξυπηρετούμενου πληθυσμού

Εικόνα 51: Ιστόγραμμα συχνότητας τιμών δείκτη OWA

Εικόνα 52: Διάγραμμα διασποράς των τιμών του δείκτη OWA για το σύνολο των αγωγών κατανεμημένων σε φθίνουσα σειρά βάσει του εξυπηρετούμενου πληθυσμού

Εικόνα 53: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων τιμών του δείκτη OWA

Εικόνα 54: Ιστόγραμμα συχνοτήτων τιμών δείκτη OWA

Εικόνα 55: Θεματικός χάρτης 1ου προτεινόμενου σεναρίου αντικατάστασης

Εικόνα 56: Θεματικός χάρτης 2ου προτεινόμενου σεναρίου αντικατάστασης

Εικόνα 57: Θεματικός χάρτης 1ου σεναρίου και του 2ου σεναρίου αντικατάστασης

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Αναπληρωτή καθηγητή του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), κ. Χρήστου Μακρόπουλου, επιβλέποντα της εργασίας αυτής, για τη βοήθεια και τις εύστοχες υποδείξεις του.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επίκουρη καθηγήτρια κ. Αικατερίνη Νάνου και τον ΕΔΙΠ κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή καθώς και όλους τους διδάσκοντες του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων» για τις γνώσεις που μου προσέφεραν στα πλαίσια των σπουδών μου.

Παράλληλα, από τη θέση αυτή αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τη Διευθύντρια Ύδρευσης της ΕΥΔΑΠ κ. Σταυρούλια για την βοήθειά της ως προς την συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και τις σχετικές συζητήσεις γύρω από θέματα κόστους και εργασιών, αλλά και γενικότερα για το ενδιαφέρον που έδειξε εξ αρχής για το θέμα της Διπλωματικής Εργασίας. Ακόμα, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Τομεάρχη Πειραιά κ. Σπύρο Ζέρβο για τη βοήθειά του κατά την επίσκεψή μου στο κτίριο του Τομέα Πειραιά καθώς και τις Πολιτικούς Μηχανικούς Παναγιώτα Παπαδημητρίου και Αθηνά Περακάκη από τη Διεύθυνση Δικτύου Ύδρευσης εξίσου, όπως επίσης και τους αρμόδιους από την Υπηρεσία Εφαρμογών G.I.S., της Διεύθυνσης Πληροφορικής για την παροχή όλων των απαραίτητων πληροφοριών για την Ζώνη Μουράτη.

Ακόμα, θερμές ευχαριστίες οφείλω στους υπ. Διδάκτορες Γεώργιο Μωραΐτη και Διονύσιο Νικολόπουλο για την υποστήριξη, την διάθεση σχετικής βιβλιογραφίας και τα εύστοχα σχόλια τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην κ. Ανδριανή Σκοπελίτη από το Εργαστήριο Χαρτογραφίας, της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών για την πολύτιμη βοήθειά της, βάσει της σπουδαίας εμπειρίας που έχει, στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, αλλά κυρίως για το ενδιαφέρον και την καλή διάθεση που δείχνει σε κάθε επιστημονικό μου εγχείρημα.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

Περίληψη

Η εν λόγω εργασία προτείνει μια μεθοδολογία πρόβλεψης και διαχείρισης θραύσεων σε δίκτυο ύδρευσης και συγκεκριμένα γίνεται εφαρμογή στην Υδραυλικά Απομονωμένη Περιοχή (DMA), που καλείται Ζώνη Μουράτη και ανήκει στον Τομέα Πειραιά της ΕΥΔΑΠ. Το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας αφορά στην εκτίμηση της τιμής τρωτότητας των αγωγών, βάσει του υλικού κατασκευής, του μήκους και της εξωτερικής διαμέτρου. Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιείται το μοντέλο EPR, το οποίο προβλέπει τις εκάστοτε θραύσεις για κάθε κατηγορία αγωγών βάσει των καταγεγραμμένων της Ζώνης, εφόσον προϋπόθεση λειτουργίας του μοντέλου αποτελεί η εισαγωγή κατηγοριοποιημένων δεδομένων σε αυτό. Συνεπώς, αρχικά κατηγοριοποιούνται οι αγωγοί βάσει του υλικού κατασκευής και της εξωτερικής διαμέτρου, επιλέγεται ένα τμήμα του συνόλου δεδομένων ως δεδομένα εκπαίδευσης και χρησιμοποιώντας συνδυασμό γενετικών αλγορίθμων και αριθμητικής παλινδρόμησης, προκύπτει ένα σύνολο πολυωνυμικών σχέσεων μεταξύ των θραύσεων και των μεταβλητών που εισάχθηκαν. Από το σύνολο αυτό, επιλέγεται η βέλτιστη σχέση με κριτήριο την ακρίβεια προσαρμογής στις παρατηρημένες τιμές των θραύσεων, αλλά και της φειδωλότητας της κάθε σχέσης. Εφαρμόζοντας την σχέση που επιλέχθηκε, υπολογίζονται οι θραύσεις και έπειτα κανονικοποιώντας προκύπτουν οι τιμές της τρωτότητας για κάθε κατηγορία αγωγών. Επόμενο βήμα είναι η εκτίμηση της τιμής κρισιμότητας των αγωγών, η οποία συντελείται προσομοιώνοντας το δίκτυο της Ζώνης σε γράφο και εκτιμώντας την έλλειψη συνδεσιμότητας σύμφωνα με τη θεωρία των γράφων και την τοπολογία του δικτύου. Από την έλλειψη συνδεσιμότητας προκύπτει η τιμή της κρισιμότητας για κάθε αγωγό. Σημειώνεται ότι οι τιμές που λαμβάνουν οι δύο δείκτες κυμαίνονται μεταξύ του μηδενός και της μονάδας και έχουν την ίδια αξιολόγηση, καθώς μεγάλες τιμές υποδεικνύουν ιδιαίτερα τρωτούς και κρίσιμους αγωγούς, οι οποίοι χρήζουν αντικατάστασης επειδή είναι επικίνδυνοι στο να αστοχήσουν κι αντίστροφα για τις μικρές τιμές. Έπειτα, συνδυάζονται οι δύο αυτοί δείκτες σε έναν κοινό, εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Διατεταγμένου Σταθμισμένου Μέσου Όρου (OWA), όπου εισάγεται ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός ως διατεταγμένο βάρος. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται έμφαση σε περιοχές με πολλούς καταναλωτές, καθώς ο συνδυαστικός δείκτης επηρεάζεται από τη μεγάλη τιμή του βάρους, το οποίο εκχωρείται στη μεγαλύτερη τιμή από τους δύο δείκτες. Ταξινομούνται σε κλάσεις λοιπόν οι αγωγοί βάσει του συνδυαστικού δείκτη και η κατανομή τους στο χώρο υποδεικνύει εκείνους τους αγωγούς ή τις συστάδες αγωγών που χρήζουν αντικατάστασης. Τέλος, προτείνονται δύο σενάρια αντικατάστασης αγωγών με παρόμοιο κόστος και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους.

Abstract

This present Diploma Thesis suggests a methodology of prevention and management of pipe breaks in a water supply network. Specifically, the suggested methodology is applied in a Districted Metered Area (DMA), called Mourati Zone, which belongs to one of the three main Sectors of Athens Water Supply and Sewerage Company (EYDAP S.A.). During the first stage of the methodology, pipe vulnerability score is estimated based on pipe material (for construction of pipes), pipe length and pipe external diameter. The vulnerability is estimated using EPR model, which predicts pipe breaks for every category referring to recorded pipe breaks of the Zone, since the model is required to accept categorized data as input data. So, at first, pipes are categorized according to their material and their external diameter and then, one part of data set is chosen as training data and a set of polynomial expressions between breaks and input parameters is produced, by using a combination of genetic algorithms and numerical regression. By this set of polynomial expressions, the optimal expression is chosen due to the model fitness criterion in observed pipe breaks and due to the parsimony of each expression. Applying the chosen expression, the number of pipe breaks is estimated, then normalized and finally the values of vulnerability are exported for every pipe category. The next step is referred to the estimation process of criticality values of the pipes, which refers to modelling the Zone's network into a graph and estimating the lack of connectivity according to the graph theory and the network's topology. The lack of connectivity gives criticality value for each pipe. It is mentioned that the range of the two estimated values above is varied between zero and one and they both have the same definition, since higher values are referred to vulnerable and critical pipes, which need to be replaced due to failure rates and the opposite for lower values. Afterwards, these two indicators are combined into one applying the Ordered Weighted Averaging method (OWA) in which the supplied population is used as an ordered weight. In this way, emphasis is placed on the regions with many consumers, since the combined indicator is affected by the high value of the ordered weight, which is assigned to the one of the two indicators with the higher value of all. A pipe classification is taken place based on the combined indicator's values and the results are shown as thematic maps and those pipes which need to be replaced, are indicated. Finally, two possible replacement scenarios are suggested with similar cost and a comparison is made between them.

Δήλωση αποποίησης ευθυνών

Τα στοιχεία, οι πληροφορίες και οι αναλύσεις που περιέχονται στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, αποτελούν αντικείμενο μελέτης στο πλαίσιο της εκπαιδευτικής δραστηριότητας του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κατά την εκπόνηση της εργασίας, καταβλήθηκε κάθε προσπάθεια, να διασφαλιστεί η ορθότητα και η πληρότητα των στοιχείων, των πληροφοριών και των αναλύσεων που καταγράφονται στη μελέτη αυτή. Ακόμη, η συγγραφέας δεν ευθύνεται για ανακρίβειες, παραλήψεις και αναξιοπιστίες σε πληροφορίες ή στοιχεία, που έλαβε από τρίτους, ούτε για τυχόν ζημία προερχόμενη άμεσα ή έμμεσα από τη χρήση των παραπάνω πληροφοριών και στοιχείων, αλλά και των αναλύσεων και αποτελεσμάτων, που είναι βασισμένες στις πληροφορίες και στα στοιχεία αυτά. Συνεπώς, δεν υπάρχει ευθύνη για την καταβολή αποζημιώσεων ή για οποιεσδήποτε άλλες αξιώσεις και απαιτήσεις ενδέχεται να προκύψουν εξαιτίας της χρήσης των στοιχείων, πληροφοριών, αναλύσεων και αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης αυτής.

1 Εισαγωγή

1.1 Το δίκτυο ύδρευσης ως πεδίο εφαρμογής και το πρόβλημα της ιεράρχησης αντικατάστασης αγωγών

Το αστικό περιβάλλον αποτελεί ένα σύνθετο και χωρικά ευαίσθητο ως προς τη λήψη αποφάσεων περιβάλλον και για αυτό το λόγο αποτελεί ιδανικό πεδίο εφαρμογής τεχνικών και εργαλείων των χωρικών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων· δεδομένου ότι ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων αντιμετωπίζονται λαμβάνοντας αποφάσεις βάσει της γεωγραφικής/χωρικής συνιστώσας των στοιχείων (Makroulos & Butler, 2005).

Στο αστικό περιβάλλον εμπεριέχονται δομές όπως οδοί, δίκτυα ύδρευσης/αποχέτευσης/όμβριων/τηλεφωνίας/διαδικτύων, συγκοινωνίες, κ.ά., οι οποίες αλληλεπιδρούν με διάφορους παράγοντες του αστικού περιβάλλοντος αλλά και μεταξύ τους. Το δίκτυο ύδρευσης ή δίκτυο διανομής νερού (Water Distribution Network, WDN), μαζί με τις συναφείς υποδομές, αποτελούν έργα πρώτης ανάγκης για την κοινωνία, απαραίτητα για την προστασία της Δημόσιας Υγείας και για την οικονομική ανάπτυξη, μιας και το δικαίωμα σε πόσιμο νερό είναι αναμφισβήτητο. Αποτελεί ένα από τα έργα κοινής ωφέλειας μαζί με τα δίκτυα αφορούν στην ενέργεια, στις τηλεπικοινωνίες και στην αποχέτευση. Η σωστή διαχείριση των δικτύων διανομής είναι εθνικής σημασίας και η έκταση κάλυψής τους εκτείνεται στο σύνολο μιας χώρας.

Δίκτυα διανομής (distribution network) καλούνται τα συστήματα αγωγών υπό πίεση, που διανέμουν το επεξεργασμένο νερό από τις δεξαμενές σε πολλαπλά σημεία προορισμού (καταναλωτές) μίας αστικής περιοχής ή αλλιώς εκείνο το σύστημα αγωγών που παραλαμβάνει νερό από ολιγάριθμες πηγές (σημεία εισόδου) και το οδηγεί προς πολλαπλά σημεία προορισμού (σημεία εξόδου ή καταναλωτές). Τα δίκτυα διανομής βρίσκονται πάντα υπό πίεση, σε αντίθεση με τα δίκτυα αποχέτευσης που λειτουργούν κυρίως με βαρύτητα.

Στο αστικό υδροσύστημα εντάσσονται και τα υδροδοτικά έργα, παρόλο που στην περίπτωση ορισμένων μεγάλων πόλεων είναι πιθανό να εκτείνονται σε μεγάλη απόσταση, εφόσον οι τοπικοί υδατικοί πόροι δεν επαρκούν για την κάλυψη των υδατικών αναγκών, όπως στην περίπτωση της υδροδότησης της Αττικής (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2006).

Φτάνοντας στην σημερινή εποχή, είναι επόμενο οι υποδομές αυτές ή αλλιώς οι *πόροι* (assets) να έχουν μεγάλη ηλικία και για αυτό το λόγο να αυξάνονται οι αστοχίες τους. Συνεπώς, επιβάλλεται η κατασκευή βιώσιμων υποδομών ύδατος (sustainable water infrastructure) με τη *διαχείριση των υφιστάμενων πόρων* (asset management) να είναι απαραίτητη. Η διαχείριση των πόρων αποτελεί εκείνη τη διαδικασία για τη διατήρηση

του επιθυμητού επιπέδου στην εξυπηρέτηση πελατών με όσο το δυνατό πιο συμφέρον κόστος (EPA, 2015).

Σύμφωνα με τη Water Services Association of Australia κατά τα έτη 1998-1999, το κόστος για διατήρηση και αντικατάσταση υπάρχουσας υποδομής ανερχόταν σε πάνω από 250 εκατομμύρια δολάρια Αυστραλίας, δηλαδή ισοδυναμεί σε περίπου 13 δολάρια σε κάθε Αυστραλό πολίτη (Moglia et al., 2005).

1.2 Τοποθέτηση του προβλήματος

Στην εργασία αυτή μελετάται το δίκτυο ύδρευσης ως πεδίο εφαρμογής ενός συστήματος υποστήριξης χωρικών αποφάσεων για την ανάπτυξη, εν προκειμένω, στρατηγικής ιεράρχησης αντικατάστασης αγωγών με σκοπό τη μείωση των υπαρχόντων διαρροών στα πλαίσια της ευρύτερης διαχείρισης της ζήτησης του νερού.

Όπως αναφέρθηκε οι εταιρείες ύδρευσης/πάροχοι παγκοσμίως έχουν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της γήρανσης του δικτύου και συνδυαστικά με άλλες παραμέτρους που θα αναφερθούν παρακάτω, προκαλεί αυξανόμενα ποσοστά αστοχίας (θραύσης) των αγωγών στο δίκτυο αλλά και οικονομικό κόστος που σχετίζεται με αυτά (Moglia et al., 2005). Όμως, οι επιπτώσεις των αστοχιών στο δίκτυο ύδρευσης δεν επιβαρύνουν τον πάροχο μόνο οικονομικά (επισκευή και άλλα κόστη), αλλά έχουν κοινωνικό (διακοπή παροχής νερού, καθυστερήσεις στην κυκλοφορία) και περιβαλλοντικό (νερό και ενέργεια που χάνεται) αντίκρισμα (Berardi et al., 2008). Συνεπώς, υπάρχει μια νέα πρόκληση, η ανάπτυξη περισσότερο εξελιγμένων στρατηγικών ιεράρχησης αντικατάστασης αγωγών, με τη χρήση πολυκριτηριακών συστημάτων λήψης/υποστήριξης απόφασης που εφαρμόζονται παγκοσμίως (Moglia et al., 2005). Βασικός στόχος για την πληρέστερη κατανόηση του προβλήματος αποτελεί η όσο το δυνατόν καλύτερη μοντελοποίηση του ιδιαίτερα σύνθετου περιβάλλοντος λήψης απόφασης, βάσει των υπαρχόντων δεδομένων.

Γενικά η διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί τη βάση για τη λήψη ορθών αποφάσεων, καθώς δίνει τη δυνατότητα στο πάροχο να εξετάσει επενδυτικό πρόγραμμα πενταετίας ή και δεκαετίας, αφού γνωρίζοντας πόσα χρήματα χρειάζονται για τη χρηματοδότηση της συντήρησης και των επενδύσεων σε πόρους, θα βοηθήσει την επιχείρηση να καθορίσει εάν τα ποσοστά και άλλοι μηχανισμοί δημιουργίας εσόδων είναι επαρκείς (EPA, 2015).

Συμπερασματικά με τα παραπάνω, στόχος του παρόχου είναι η λειτουργία και συντήρηση ενός δικτύου ασφαλούς και αξιόπιστου για τους καταναλωτές (EPA, 2015). Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντική λειτουργία του δικτύου αποτελεί η υδραυλική ανθεκτικότητά του, δηλαδή η ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί το επίπεδο απόδοσης σταθερό υπό συνθήκες αστοχίας και λειτουργίας. Πιο αναλυτικά, η ανθεκτικότητα αφορά στην ικανότητα ενός συστήματος να αντιμετωπίζει/καταπολεμά

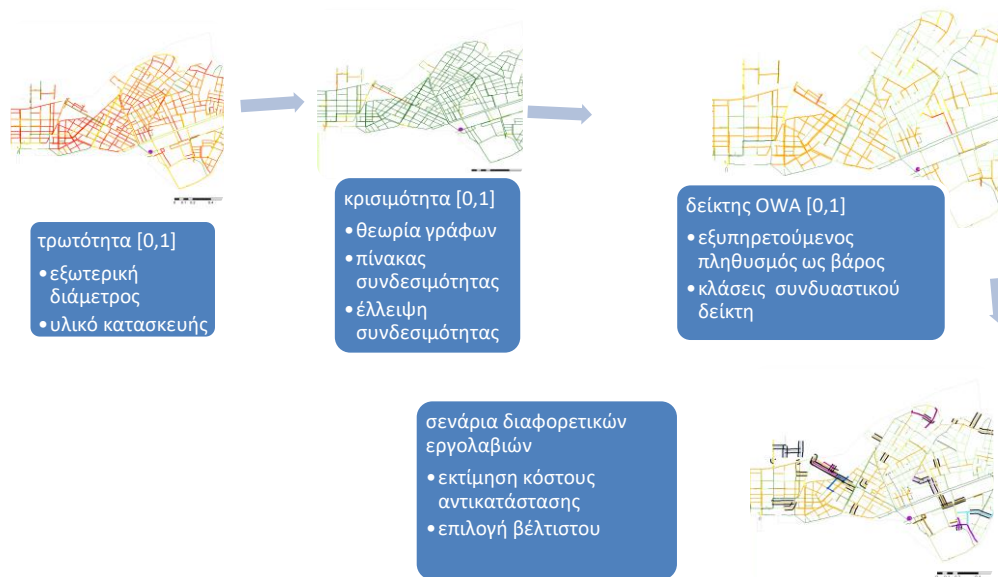
αρνητικά σενάρια χωρίς ανεπιθύμητες επιπτώσεις στις λειτουργίες του και να αυτοπροσαρμόζεται στο νέο λειτουργικό περιβάλλον (Herrera et al., 2015).

Η επέκταση και κυρίως η αντικατάσταση του δικτύου αποτελούν σημαντικές ενέργειες του παρόχου και προϋποθέτουν ολοκληρωμένη διαχείριση του συστήματος με αξιοποίηση και οργάνωση της διαθέσιμης πληροφορίας για τα στοιχεία του δικτύου, ενημέρωση και καταγραφή νέων χρήσιμων δεδομένων, με στόχο την ανάπτυξη εξειδικευμένων εργαλείων για την αντιμετώπιση των αστοχιών.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη μεθοδολογίας πρόβλεψης και διαχείρισης θραύσεων σε δίκτυο ύδρευσης. Η μεθοδολογία που ακολουθείται και προτείνεται είναι η παρακάτω και αποτελείται από τρία σκέλη:

- (1) Εκτίμηση της επικινδυνότητας θραύσης (vulnerability) των αγωγών βάσει των διαθέσιμων χαρακτηριστικών των αγωγών, όπως η εξωτερική διάμετρος, το μήκος, το υλικό κατασκευής. Η τιμή αυτή προκύπτει μέσω της ανάπτυξης και της επιλογής κατάλληλου μοντέλου, το οποίο εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα θραύσεων από την ΕΥΔΑΠ ΑΕ (Brt) κι έτσι προκύπτουν οι νέες τιμές θραύσεων Brt_{EPR} με τη δυνατή καλύτερη απόδοση
- (2) Εκτίμηση της κρισιμότητας (criticality) των αγωγών, αναπτύσσοντας την υπό μελέτη υδραυλική Ζώνη σε μορφή γράφου και εφαρμόζοντας τη θεωρία των γράφων, προκύπτει τελικά μια τιμή κρισιμότητας για κάθε έναν αγωγό βάσει του κατάλληλου μέτρου
- (3) Εκτίμηση συνδυαστικού δείκτη βάσει της τεχνικής του Διατεταγμένου Σταθμισμένου Μέσου Όρου (Ordered Weighted Average, OWA) και ιεράρχηση αντικατάστασης αγωγών ανά εργολαβίες εφαρμόζοντας τεχνικές πολυκριτηριακής ανάλυσης

Αναπτύσσεται συνοπτικό διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που ακολουθείται για την ιεράρχηση αντικατάστασης αγωγών που (Εικ. 1).



Εικόνα 1: Συνοπτικό διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που ακολουθείται

Εκτιμάται ότι το κύριο πλεονέκτημα των εφαρμογών της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η εξοικονόμηση χρημάτων στον πάροχο μέσω της εφαρμογής που θα προβλέπει την αστοχία στους αγωγούς σε πολλαπλά επίπεδα. Βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ότι οι πρακτικές αντιμετώπισης των θραύσεων των αγωγών που ακολουθούνται μέχρι σήμερα (ειδοποίηση για θραύση αγωγού από πολίτες μέσω τηλεφώνου ή εφαρμογής 1022 της ΕΥΔΑΠ και αποκατάσταση αγωγών μετά τη θραύση), αντικαθίστανται με a priori αντιμετώπιση των μελλοντικών αστοχιών, βάσει των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης, που σημαίνει άμεσο οικονομικό όφελος, λόγω ελαχιστοποίησης του κόστους αντικατάστασης κατά την αστοχία. Έπειτα σε δεύτερο επίπεδο, ο προγραμματισμός αντικατάστασης αγωγών συνεπάγεται καλύτερη οργάνωση και διάθεση των πόρων στις εργαλαβίες αντικατάστασης από πλευράς Υπηρεσίας, αλλά και μείωση των διακοπών υδροδότησης λόγω θραύσης, με όφελος στην ικανοποίηση των καταναλωτών και αύξηση της αξιοπιστίας της Εταιρείας. Πιο γενικά η εργασία αυτή δύναται να αποτελέσει αφορμή/ένανσμα και για την ΕΥΔΑΠ, ώστε να προχωρήσει προς αυτή την κατεύθυνση διαχείρισης των δεδομένων που συλλέγει.

2 Διαρροές και θραύσεις

Η αύξηση του πληθυσμού στις πόλεις, η αστικοποίηση δηλαδή, οδηγεί σε αύξηση της ζήτησης σε νερό. Η ορθολογική διαχείριση των αστικών δικτύων οδηγεί στην εξοικονόμηση νερού, η οποία επιτυγχάνεται μέσω:

- Της μείωσης των απωλειών νερού λόγω θραύσεων και διαρροών στα δίκτυα (το μεγαλύτερο πρόβλημα οφείλεται στις διαρροές)
- Της απόκτησης υδατικής συνείδησης από τον καταναλωτή με στόχο την εξοικονόμηση νερού χωρίς την υποβάθμιση του επιπέδου ζωής του
- Έμμεσα με την υποχρέωση όλων των Κρατών Μελών της ΕΕ βάσει της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά 2000/60/ΕΚ ότι έως το 2010 οφείλεται να διαμορφωθεί κατάλληλη τιμολογιακή πολιτική για την πλήρη ανάκτηση του κόστους υπηρεσιών νερού (περιλαμβάνονται: άμεσο κόστος + περιβαλλοντικό κόστος + κόστος υδατικού πόρου) (Κανακούδης, χ.χ.).

Συνεπώς η μείωση των απωλειών στο δίκτυο και οι τρόποι εντοπισμού τους και γρήγορης απόκρισης του συστήματος αποτελούν βασική διαχειριστική πολιτική.

Τα επίπεδα απωλειών στη δυτική Ευρώπη κυμαίνονται από 15% έως 20% (Μακρόπουλος, χ.χ⁽¹⁾) (Κανακούδης & Τσιφτσιλή, 2015).

2.1 Αστικό νερό

Το αστικό νερό περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές ροές, *το πόσιμο νερό* (δίκτυο ύδρευσης), *τα ακάθαρτα ύδατα* (δίκτυο αποχέτευσης) και *τα όμβρια ύδατα* (δίκτυο ομβρίων).

Στην επιστημονική κοινότητα τίθενται διάφοροι προβληματισμοί σχετικά με το αστικό νερό. Για παράδειγμα κατά πόσο οι ροές πρέπει να παραμείνουν χωριστές όπως στις περισσότερες αστικές περιοχές στην Ελλάδα ή να γίνουν συνδεδεμένες (Μακρόπουλος, χ.χ⁽²⁾).

Κάποια από τα ζητήματα που αφορούν στο (υπο)σύστημα της ύδρευσης είναι:

α) *η αύξηση της ζήτησης*, συγκεκριμένα στο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας με τον ολοένα αυξανόμενο πληθυσμό ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες, που καθιστά μη βιώσιμη την συνεχή επέκταση του δικτύου

β) *η απαίτηση υψηλότερης αξιοπιστίας* σε σχέση με το υπάρχον καθεστώς συνεχούς αβεβαιότητας

γ) *η αύξηση των διαρροών*, που απαιτούνται συνήθως ακριβείς υποδομές για την αντιμετώπισή τους (Μακρόπουλος, χ.χ⁽¹⁾).

Από τα παραπάνω θέματα εξετάζεται το ζήτημα των απωλειών/διαρροών στο εσωτερικό δίκτυο ύδρευσης.

2.2 Αίτια διαρροών και θραύσεων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες νερού είναι τα χαρακτηριστικά του δικτύου των αγωγών και άλλοι τοπικοί παράγοντες καθώς και η λειτουργική πρακτική της επιχείρησης ύδρευσης.

Τα τοιχώματα των αγωγών καταστρέφονται κυρίως εξαιτίας εσωτερικής ή εξωτερικής διάβρωσης. Τα υλικά των ενώσεων των αγωγών αστοχούν, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται θραύσεις σε αυτά, είτε από πίεση που προέρχεται από μόνιμες ή απότομες εσωτερικές πιέσεις (υδραυλικό πλήγμα), είτε από εξωτερικές φορτίσεις (αυξημένες πιέσεις από το Υδραγωγείο λόγω λανθασμένου χειρισμού), είτε από κακή διασύνδεση των αγωγών. Επίσης η ηλικία και η διάμετρος των αγωγών αποτελούν καθοριστικοί παράγοντες επίδρασης αστοχίας των δικτύων. Συγκεκριμένα, αγωγοί με μεγάλες ηλικίες, μικρές διαμέτρους και μεγάλα μήκη παρουσιάζουν αυξημένο ρυθμό θραύσης (Giustolisi et al., 2007) (Berardi et al., 2008). Με τους συνήθεις ρυθμούς αντικατάστασης των δικτύων ένας αγωγός πρέπει να μείνει εν λειτουργία γύρω στα 200 χρόνια (Μακρόπουλος, χ.χ (1)).

Ακόμα τοπικοί παράγοντες όπως η κατάσταση του εδάφους και ο κυκλοφοριακός φόρτος μπορεί να αποτελέσουν λόγο θραύσης ή εκπόνησης των αγωγών (Puust et al., 2010). Επιπλέον, ο λανθασμένος χειρισμός μηχανημάτων κατά τη διάρκεια εργασιών μπορεί να προκαλέσει συχνά τη θραύση του αγωγού κατά την διάρκεια εργασιών γειτονικού δικτύου, οι εργασίες στην επιφάνεια τους εδάφους που δημιουργούν επιπλέον φόρτιση (stress) στους αγωγούς ώστε να προκαλέσουν θραύση (Κανακούδης, χ.χ). Επιπρόσθετα, ο σεισμός, οι τυχαίες αστοχίες αλλά και δυσλειτουργίες δικτύου λόγω κακής κατασκευής αποτελούν μηχανισμούς διαταραχής του συστήματος και δύναται να οδηγήσουν σε αστοχία ολόκληρου του συστήματος (Dueñas -Osorio et al., 2007) και για αυτό το λόγο διερευνώνται συστηματικά σε πολλές εργασίες στη βιβλιογραφία.

Επακόλουθο των αστοχιών του δικτύου ύδρευσης είναι οι διακοπές παροχής νερού, οι ζημιές λόγω πλημμυρισμένων χώρων (υπογείων κυρίως), οι δαπανηρές επισκευές με μη προγραμματισμένη μεταβολή της κυκλοφορίας των οχημάτων κατά την άμεση επιδιόρθωση, περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος λόγω απώλειας νερού (Moglia et al., 2005) με την έλλειψη αξιοπιστίας των καταναλωτών προς τον πάροχο

2.3 Κατηγορίες απωλειών

Σε κάθε αστικό δίκτυο ύδρευσης υπάρχουν δύο κύριοι χρήστες: α) οι διάφορων τύπου καταναλωτές και β) το ίδιο το δίκτυο (απώλειες νερού). Αυτό μεταφράζεται με παρόμοιο τρόπο στην παρακάτω κατάταξη των όγκων εισόδου σε ένα σύστημα, όπως το εσωτερικό δίκτυο ύδρευσης σύμφωνα με την International Water Association (Πιν. 1).

Πίνακας 1: Πρότυπο Ισοζύγιο Νερού (IWA Standard Water Balance) (IWA, 2000)

System Input Volume	Authorised Consumption (Εξουσιοδοτημένη κατανάλωση)	Billed Authorised Consumption (Τιμολογούμενη)	Billed Metered Consumption	Revenue Water (Ανταποδοτικό νερό)
			Billed Unmetered Consumption	
	Water Losses (Απώλειες)	Unbilled Authorised Consumption (Μη τιμολογούμενη)	Unbilled Metered Consumption	Non Revenue Water (Μη ανταποδοτικό νερό)
			Unbilled Unmetered Consumption	
		Apparent Water Losses (Φαινόμενικές)	Unauthorised Consumption <i>Κλοπή</i>	
		Real Losses (Πραγματικές) = διαρροές + υπερχειλίσεις	Customer Meter Inaccuracies <i>Μετρητές</i>	
	Leakage on Transmission and Distribution Mains			
	Leakage and Overflows at Reservoirs			
	Leakage on Service Connections up to Metering Point			

Η κατάταξη της IWA χρησιμοποιείται και συνίσταται από τεχνικούς οργανισμούς, ρυθμιστικούς φορείς και διεθνείς οργανισμούς χρηματοδότησης σε διάφορες χώρες με όλο και αυξανόμενους ρυθμούς. Σύμφωνα με την παραπάνω κατάταξη λοιπόν οι απώλειες διαχωρίζονται από την εξουσιοδοτημένη κατανάλωση σε φαινομενικές και πραγματικές. Οι επιμέρους υποκατηγορίες αναλύονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίν. 2).

Πίνακας 2: Κατηγοριοποίηση απωλειών σε δίκτυο ύδρευσης (IWA, 2000)

Απώλειες	φαινομενικές	μη εξουσιοδοτημένη κατανάλωση (παράνομες συνδέσεις) ανακρίβειες στους μετρητές κατανάλωσης
	πραγματικές	διαρροές σε δίκτυο μεταφοράς και διανομής διαρροές και υπερχειλίσεις σε ταμιευτήρες διαρροές από τις δικλείδες σύνδεσης μέχρι τους μετρητές

Συνεπώς, οι φαινομενικές απώλειες αφορούν στην μη εξουσιοδοτημένη κατανάλωση, δηλαδή στις παράνομες συνδέσεις στο δίκτυο ύδρευσης καθώς και σε ανακρίβειες στους μετρητές κατανάλωσης. Από την άλλη οι πραγματικές απώλειες αφορούν στις διαρροές και στις υπερχειλίσεις και συγκεκριμένα διαχωρίζονται σε διαρροές σε δίκτυο μεταφοράς και διανομής, σε διαρροές και υπερχειλίσεις σε ταμιευτήρες καθώς και σε διαρροές που λαμβάνουν χώρα από τις δικλείδες σύνδεσης μέχρι τους μετρητές. Σε αντίστοιχο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών των απωλειών σύμφωνα με στοιχεία της ΕΥΔΑΠ.

Οι όροι αποδοτικότητα και ανταποδοτικότητα χρήσης νερού εισάγονται από την IWA και εκτιμούνται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Απόδοση χρήσης [όγκος]} = \frac{\text{Χρησιμοποιούμενο Νερό}}{\text{Νερό Εισερχόμενο στο Σύστημα}}$$

$$\text{Ανταπόδοση χρήσης [έσοδα]} = \frac{\text{μοναδιαίων εσόδων}}{\text{Νερό Εισερχόμενο στο Σύστημα}}$$

Αύξηση της απόδοσης της χρήσης νερού μετρούμενη σε όγκο νερού, προϋποθέτει αύξηση του χρησιμοποιούμενου νερού με σταθερό το εισερχόμενο νερό στο σύστημα και συνεπώς μείωση των απωλειών. Για αύξηση της ανταπόδοσης της χρήσης νερού, η οποία υπολογίζεται σε χρηματικό ποσό, απαιτείται αύξηση των μοναδιαίων εσόδων και ως επακόλουθο έχει τη μείωση του μη ανταποδοτικού νερού και κυρίως αυτού που σχετίζεται με τις παράνομες συνδέσεις (Κανακούδης, 2016).

2.3.1 Μη ανταποδοτικό νερό

Μια πιο γενική κατηγοριοποίηση του αστικού νερού είναι αυτή μεταξύ του ανταποδοτικού και του μη ανταποδοτικού νερού σύμφωνα με την υπό μελέτη κατάταξη της IWA (Πίν). Ως ανταποδοτικό νερό λογίζεται μόνο το τιμολογούμενο νερό, ενώ ως μη ανταποδοτικό όλες οι υπόλοιπες υποκατηγορίες, δηλαδή το μη τιμολογούμενο νερό και οι απώλειες, φαινομενικές και πραγματικές.

Το μη ανταποδοτικό νερό αφορά χαμένο νερό αλλά και ενέργεια, η οποία καταναλώνεται σε ενδεχόμενες αντλήσεις και στη διανομή αλλά και εκτός εσωτερικού δικτύου κυρίως κατά την επεξεργασία/διύλιση του νερού μέχρι να γίνει κατάλληλο για πόση. Για τους παραπάνω λόγους το μη ανταποδοτικό νερό βαραίνει την τιμολόγηση του ανταποδοτικού νερού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι εκτιμημένοι όγκοι μη ανταποδοτικού νερού Non – Revenue Water NRW ως ποσοστό του εισερχόμενου όγκου νερού σε παγκόσμια κλίμακα συγκριτικά με τον πληθυσμό και τον εισερχόμενο όγκο νερού (Πίν. 3).

Πίνακας 3: Όγκος Μη Ανταποδοτικού Νερού (δισ. m³/έτος) όπως αναφέρουν οι Kingdom et al., 2006 (Κανακούδης & Τσιφτσιλή, 2015)

		Ανεπτυγμέ νες χώρες	Ευρασία	Αναπτυσσό μενες χώρες	ΣΥΝΟΛΑ
Πληθυσμός σε εκατομμύρια (2002)		744.8	178.0	837.2	1,760
Εισερχόμενος Όγκος Νερού (SIV) Λίτρα/κάτοικο/ημέρα		300	500	250	296.5
	NRW ως % του SIV	15	30	35	25.6
	Φυσικές απώλειες	80	70	60	67
	(%) Εμπορικές απώλειες	20	30	40	33
Εκτίμηση NRW	Ποσό τητα νερού (δισ m ³ /έτ ος)	9.8	6.8	16.1	32.7
	Φυσικές απώλειες	2.4	2.9	10.6	15.9
	Εμπορικές απώλειες	12.2	9.7	26.7	48.6
	Συνολικό NRW				

Βάσει των στοιχείων αυτών, όπως αναφέρουν οι Kingdom et al. το 2006 90 εκατομμύρια άνθρωποι θα αποκτούσαν πρόσβαση σε νερό με την εκμετάλλευση του μη ανταποδοτικού νερού χωρίς αύξηση ζήτησης ή εκμετάλλευση νέων υδατικών πόρων. Συνδυαστικά με τους όγκους παρουσιάζεται μια εκτίμηση της αξίας του μη ανταποδοτικού νερού συνολικά (NRW) και για τις επιμέρους φυσικές και εμπορικές απώλειες καθώς μια μέση χρέωση του μη ανταποδοτικού νερού για κάθε μία περιοχή (Πίν. 4).

Πίνακας 4: Αξία μη ανταποδοτικού νερού (δισ. US\$/έτος) για τις ανεπτυγμένες χώρες, για την Ευρασία και για τις αναπτυσσόμενες χώρες (Κανακούδης & Τσιφτσιλή, 2015)

	Μέση χρέωση (US\$/ m ³)	Κόστος φυσικών απωλειών	Απώλεια εσόδων λόγω εμπορικών απωλειών	Συνολικό κόστος NRW
		Εκτιμώμενο κόστος (US\$ δις/έτος)		
Ανεπτυγμένες χώρες	1.00	2.9	2.4	5.3
Ευρασία	0.50	2.0	1.5	3.5
Αναπτυσσόμενες χώρες	0.25	3.2	2.6	5.8
	ΣΥΝΟΛΑ	8.1	6.5	14.6

Αναφορικά με την αξία του μη ανταποδοτικού νερού, η οποία ανέρχεται σε 14,6 US\$ δις ετησίως σε παγκόσμια κλίμακα σύμφωνα με τους Kingdom et al. και με τη μείωση του όγκου του μη ανταποδοτικού νερού στις αποδεκτές τιμές (5-10%), θα υπάρχει δυνατότητα υδροδότησης επιπλέον 21 – 27.7% πληθυσμού. Σε πολλές περιοχές οι απώλειες φτάνουν ή και ξεπερνούν το 40-50% (Κανακούδης & Τσιφτσιλή, 2015).

2.4 Παραδείγματα καταγραφής και αντιμετώπισης των απωλειών σε δίκτυα διανομής

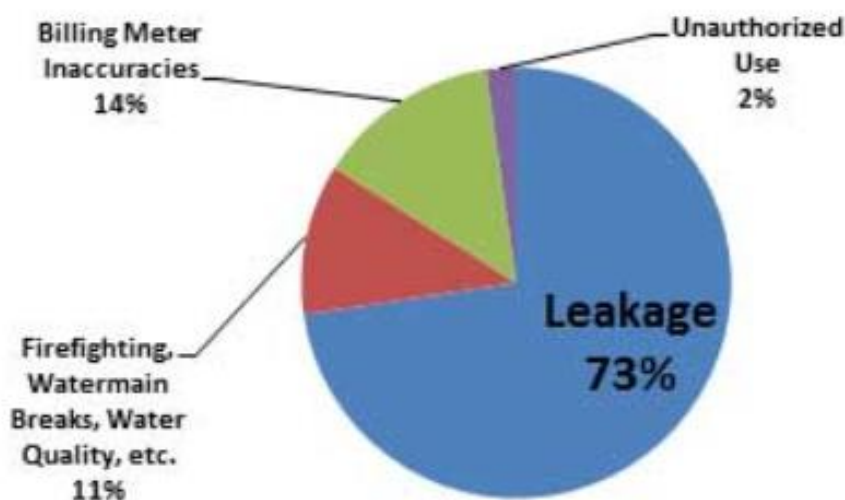
Παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που αφορά στην πόλη του Λονδίνου στο Οντάριο του Καναδά. Εντοπίστηκε ότι η ζημία που είχε η αρμόδια υπηρεσία ύδατος από τις διαρροές στο δίκτυο διανομής ήταν της τάξης των 1.2 εκατομμυρίων δολαρίων ετησίως (Πίν. 5) καθώς και ότι το ποσοστό του μη ανταποδοτικού νερού αυξανόταν από το 4.0% το έτος 2006 έως και 11.2 % το έτος 2012, σύμφωνα με επιχειρηματική έκθεση περίπτωσης (business case study) που εκπονήθηκε (Appendix E, 2014).

Πίνακας 5: Ποσοστό και κόστος μη ανταποδοτικού νερού ανά έτος (Appendix E, 2014)

Έτος	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Ποσοστό NRW	4.0 %	7.7 %	7.4 %	9.0 %	10.2 %	10.8 %	11.2 %	8.9 %	8.5 %
Κόστος NRW (εκατομ. Δολάρια Καναδά)	-	\$1.25	\$1.25	\$1.25	\$1.25	\$1.25	\$1.25	\$1.25	\$1.25

Σύμφωνα με την εν λόγω αναφορά, προσεγγιστικά το 73% του μη ανταποδοτικού νερού εκτιμάται ότι προέρχεται από διαρροές στο σύστημα διανομής, δηλαδή είναι πραγματικές απώλειες, ενώ μόλις το 2% αφορά στη μη εξουσιοδοτημένη χρήση, το 14% σε ανακρίβειες σε μετρητές και το 11% σε νερό για πυρόσβεση, σε θραύσεις σε δίκτυα ύδρευσης κτλ. (Εικ. 2). Αυτό το μεγάλο ποσοστό διαρροών σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του μη ανταποδοτικού νερού οδήγησαν την υπηρεσία να εφαρμόσει την πολιτική διαχείρισης των υδραυλικά απομονωμένων περιοχών DMAs.

Sources of non-revenue water



Εικόνα 2: Πηγές μη ανταποδοτικού νερού (Appendix B, 2014)

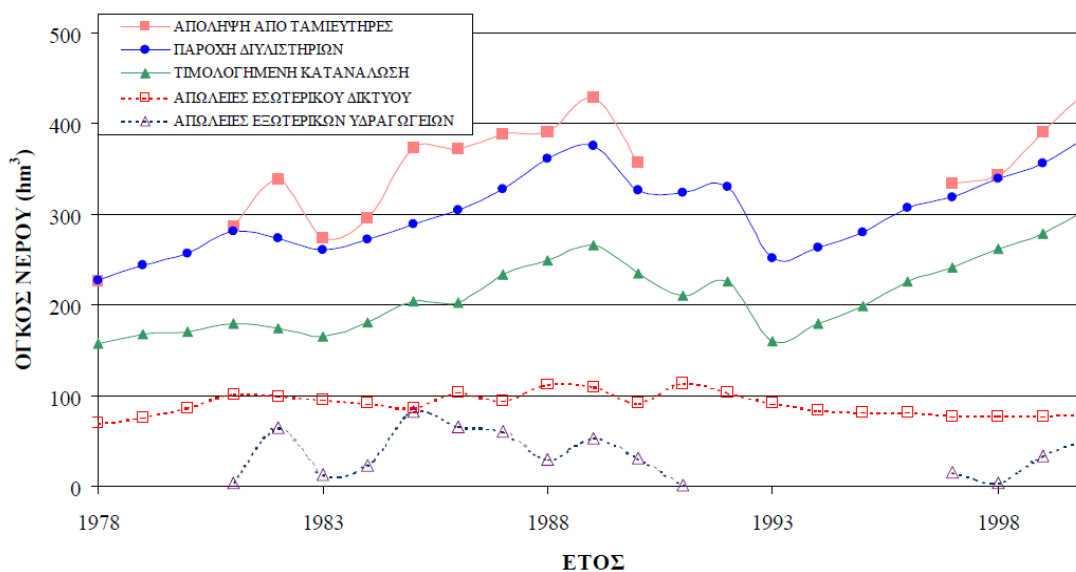
Αυτή η μέθοδος έχει τη λογική αποκεντροποίησης του συστήματος καθώς απομονώνοντας τμήματα του δικτύου, επιτρέπει στους διαχειριστές του συστήματος να εντοπίσουν και να επιδιορθώσουν τις εκάστοτε διαρροές χωρίς να επηρεάζεται κάποια άλλη ζώνη. Γενικά, η μέθοδος ανήκει στη λεγόμενη ενεργητική (proactive) διαχείριση λόγω εντοπισμού της διαρροής πριν εμφανιστεί στην επιφάνεια του εδάφους. Τα καταναμημένα συστήματα τείνουν να γίνονται ολοένα οικονομικά αποδοτικότερα σε σχέση με τα κεντρικά επειδή αυξάνεται η ανθεκτικότητα του συστήματος. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της αποκεντροποίησης του συστήματος είναι η βελτίωση της αξιοπιστίας του, αφού είναι θεμιτό να υπάρχουν αρκετοί τρόποι υδροδότησής του (Μακρόπουλος, 2017).

Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιες αναλύσεις σχετικά με τις διαρροές στα δίκτυα ύδρευσης, που έχουν γίνει στις δύο μεγαλύτερες εταιρείες ύδρευσης αποχέτευσης στη χώρα, την ΕΥΔΑΠ και την ΕΥΑΘ.

- ***ΕΥΔΑΠ - Εταιρεία Ύδρευσης Αποχέτευσης Πρωτεύουσας***

Κατά το Σχέδιο Διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας γίνεται μια ανάλυση των συνολικών απωλειών του βάσει μετρημένων τιμών, που αφορούν στο μη ανταποδοτικό νερό. Οι συνολικές απώλειες νερού υπολογίζονται ως η διαφορά του συνολικού όγκου νερού που τιμολογείται (τιμολογούμενο) από τον όγκο που καταγράφεται στην έξοδο των ταμιευτήρων. Η διαφορά αυτή προέρχεται από τις *απώλειες των εξωτερικών υδραγωγείων κατά τη διαδρομή μέχρι τα διυλιστήρια* και τις *απώλειες του εσωτερικού δικτύου ύδρευσης (πραγματικές και φαινομενικές απώλειες)*. Οι πρώτες περιλαμβάνουν διαρροές, υπερχειλίσεις ή σφάλματα μετρήσεων παροχής στη διαδρομή μέχρι τα διυλιστήρια, ενώ οι δεύτερες προέρχονται από τα σφάλματα των οικιακών υδρομετρητών που υποεκτιμούν την εισερχόμενη ποσότητα και από διαρροές του εσωτερικού δικτύου ή παράνομες απολήψεις. Ακόμη, σημαντικές ποσότητες του εισερχόμενου νερού χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των διυλιστηρίων.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 3 παρουσιάζονται οι απολήψεις από τους ταμιευτήρες και τις γεωτρήσεις, οι ποσότητες που εξέρχονται από τα διυλιστήρια, οι ποσότητες που τελικά φτάνουν στον καταναλωτή και τιμολογούνται και ακόμα οι απώλειες των εξωτερικών υδραγωγείων και των εξωτερικών δικτύων για τη ΕΥΔΑΠ για το χρονικό διάστημα 1978 έως 2000 (Ευστρατιάδης κ.συν. 2009).



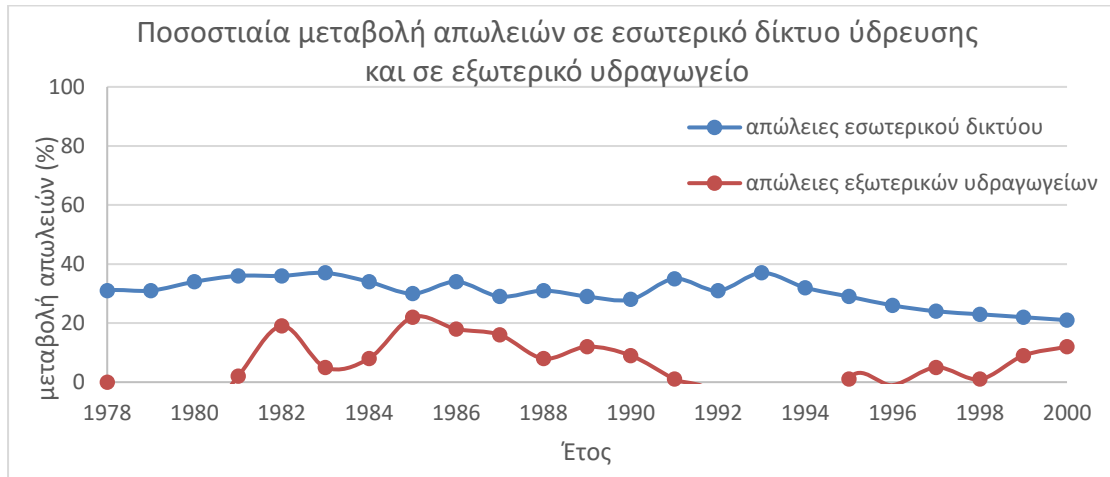
Εικόνα 3: Χρονική εξέλιξη απωλειών (Ευστρατιάδης κ.συν. 2009)

Τα ίδια δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 με τη διαφορά ότι εκτιμώνται επιπλέον τα ποσοστά των απωλειών, η μεταβολή των οποίων παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικ. 4).

Πίνακας 6: Χρονική εξέλιξη απολήψεων από ταμιευτήρες, παροχής δυλιστηρίων και τιμολογημένης κατανάλωσης σύμφωνα με μετρήσεις της ΕΥΔΑΠ (Ευστρατιάδης κ.συν. 2009)

Έτος	Απόληψη από ταμιευτήρες και γεωτρήσεις (1)	Παροχή δυλιστηρίων (2)	Τιμολογημένη κατανάλωση (3)	Διαφορά (1)-(2)	Διαφορά (2)-(3)	Απώλειες (%) (1)-(2)	Απώλειες (%) (2)-(3)
1973		169.4	137.6		31.8		19
1974		172.9	135.3		37.6		22
1975		179.2	139.5		39.7		22
1976		187.9	143.2		44.7		24
1977		211.0	153.8		57.2		27
1978	226.1	226.9	157.3	-0.8	69.6	0	31
1979	218.3	244.0	167.8	-25.7	76.2	-12	31
1980	220.9	256.6	170.4	-35.7	86.2	-16	34
1981	286.5	282.0	179.7	4.5	102.3	2	36
1982	338.5	273.9	174.2	64.6	99.7	19	36
1983	273.9	261.3	165.9	12.6	95.4	5	37
1984	295.8	272.7	180.6	23.1	92.1	8	34
1985	372.9	289.8	203.9	83.1	85.9	22	30
1986	371.5	305.2	202.3	66.3	102.9	18	34
1987	388.7	327.5	233.7	61.2	93.8	16	29
1988	391.8	361.5	249.2	30.3	112.4	8	31
1989	429.1	375.8	266.0	53.3	109.8	12	29
1990	357.7	326.5	235.1	31.2	91.4	9	28
1991	325.6	323.8	210.4	1.9	113.3	1	35
1992	311.5	330.2	226.5	-18.7	103.7	-6	31
1993	169.1	252.3	160.2	-83.3	92.1	-49	37
1994	185.6	263.7	180.1	-78.1	83.6	-42	32
1995	282.9	280.2	199.0	-1.2	81.2	1	29

1996	303.2	307.4	226.5	-7.9	80.9	-1	26
1997	334.9	319.4	241.6	15.5	77.8	5	24
1998	343.3	339.7	262.1	3.6	77.6	1	23
1999	391.1	357.0	279.1	34.1	77.9	9	22
2000	437.0	385.8	305.6	51.2	80.1	12	21



Εικόνα 4: Ποσοστιαία μεταβολή απωλειών σε εσωτερικό δίκτυο ύδρευσης και σε εξωτερικό υδραγωγείο το χρονικό διάστημα 1978 έως 2000

Παρατηρείται ότι ενώ οι απώλειες στα εξωτερικά υδραγωγεία μεταβάλλονται έντονα, οι απώλειες στο εσωτερικό δίκτυο διατηρούνται σε σταθερά επίπεδα και είναι της τάξης του 37%, ενώ φαίνεται να σταθεροποιούνται έντονα τα τελευταία 7 έτη στα 80 hm³.

Η μεγάλη διακύμανση των απωλειών των εξωτερικών δικτύων οφείλεται κυρίως σε σφάλματα μετρήσεων αφού υπάρχουν μερικά έτη κατά τα οποία οι υπολογισμένες με βάση τα δεδομένα απώλειες έχουν αρνητικό πρόσημο. Ακόμη, σε μικρότερο βαθμό, η αβεβαιότητα οφείλεται στη διάθεση ποσοτήτων κατά μήκος των υδραγωγείων για ύδρευση και άρδευση και την πλήρωση του ταμιευτήρα Μαραθώνα.

- **ΕΥΑΘ – Εταιρεία Ύδρευσης Αποχέτευσης Θεσσαλονίκης**

Η ΕΥΑΘ έχει ήδη εφαρμόσει πιλοτικό πρόγραμμα περιορισμού των διαρροών του δικτύου με στόχο τον περιορισμό του ποσοστού διαρροών στο 18%, που είναι κατά κανόνα το ποσοστό όλων των Ευρωπαϊκών μεγαλουπόλεων (Ζαφειράκου, 2013).



Εικόνα 5: Υδροδοτικό σύστημα της πόλης της Θεσσαλονίκης (Ζαφειράκου, 2013)



Εικόνα 6: Εκσκαφή για επιδιόρθωση σε αγωγό με διαρροή στην Θεσσαλονίκη (Ζαφειράκου, 2013)

Γενικά, κάθε κατηγορία απωλειών χρήζει διαφορετική στρατηγική διαχείρισης. Η διαχείριση των πραγματικών απωλειών είναι το κύριο θέμα της εργασίας καθώς είναι περισσότερο διαχειρίσιμες σε σχέση με τις φαινομενικές, κυρίως γιατί μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτές διάφορες τακτικές για την πρόληψη αλλά και την αντιμετώπισή τους.

3 Σύνολα δεδομένων (datasets)

Οι υπηρεσίες διαχείρισης των δικτύων κοινής ωφέλειας, αν και η τεχνολογία του εξοπλισμού έχει αλματώδη ανάπτυξη, δυστυχώς στην πλειοψηφία τους δε διαθέτουν ούτε σύγχρονα, ούτε λειτουργικά υπόβαθρα, στα οποία απαιτείται επιχειρησιακά να γίνεται ο σχεδιασμός, η διαχείριση, η ανάλυση καλής λειτουργίας και η συντήρηση. Συνήθως οι διαθέσιμες πληροφορίες διατίθενται μέσω παλιών σχεδίων, κατά κανόνα σε αναλογική μορφή, σε ανεξάρτητα συστήματα αναφοράς και τις περισσότερες φορές σε απλή σκαριφηματική μορφή χωρίς καλή γεωμετρική ακρίβεια, οδηγώντας τους οργανισμούς που τα διαχειρίζονται σε αδιέξοδο.

Η καταγραφή και η αποθήκευση δεδομένων είναι σημαντικά στάδια κατά τη διαχείριση των πόρων για τους αγωγούς δικτύου, ωστόσο η έλλειψη δεδομένων αποτελεί σύνηθες φαινόμενο. Εάν εξαρχής δεν καταγραφούν τα σωστά δεδομένα, στην συνέχεια όλες οι μελλοντικές διαχειριστικές λειτουργίες θα υποστούν τις επιπτώσεις. Συνεπώς, πολλές φορές οι εταιρείες ύδρευσης οδηγούνται στο να χρησιμοποιούν απλοϊκά μοντέλα, τα οποία ελλείπει δεδομένων προχωρούν σε λάθος εκτιμήσεις με χαρακτηριστικό τους να μην μπορούν να εντοπίσουν εκείνους τους αγωγούς που βρίσκονται σε κακή κατάσταση και πιθανόν να αστοχήσουν για την περίπτωση μελέτης κάποιου παρόμοιου προβλήματος (Moglia et al., 2005). Λεπτομερείς βάσεις με δεδομένα αστοχίας/θραύσεων αποτελούν απαραίτητα δεδομένα, που να καταγράφουν σε πραγματική στιγμή τα συμβάντα όπως τα καταγράφουν στο πεδίο οι υπάλληλοι που επισκέπτονται τη θέση της αστοχίας.

Εκτός από την έλλειψη δεδομένων, εξίσου σημαντικό είναι η σωστή οργάνωση και διαχείριση τους, ώστε να μπορούν να ενημερώνονται και να είναι διαθέσιμα για οποιαδήποτε μελλοντική εφαρμογή. Διάσπαρτα δεδομένα σε κατακερματισμένες βάσεις, χωρίς κωδικοποίηση ή και πολλές φορές χωρίς να είναι ψηφιοποιημένα στο σύνολό τους είναι κάποιες από τις περιπτώσεις που συναντώνται.

Το σύστημα που εξετάζεται στην εργασία αυτή είναι ένα τμήμα του δικτύου ύδρευσης στην Αττική και συγκεκριμένα η υδραυλική ζώνη «Μουράτη» του Τομέα Πειραιά. Αναφορικά με τα απαιτούμενα για την έρευνα αυτή στοιχεία, χρησιμοποιούνται στοιχεία (feature class) από τις υπάρχουσες (γεω)βάσεις δεδομένων Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) της ΕΥΔΑΠ ΑΕ.

Ως κύρια πηγή δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η βάση της ύδρευσης της Εταιρείας, από την οποία εξήχθησαν για τις ανάγκες της εργασίας τα παρακάτω στοιχεία:

- Αγωγοί ύδρευσης
- Δικλείδες
- Δικλείδες εκκένωσης
- Δικλείδες εξαερισμού (εξαεριστήρια)
- Δικλείδα μείωσης πίεσης (Pressure Reduce Valve, PRV)

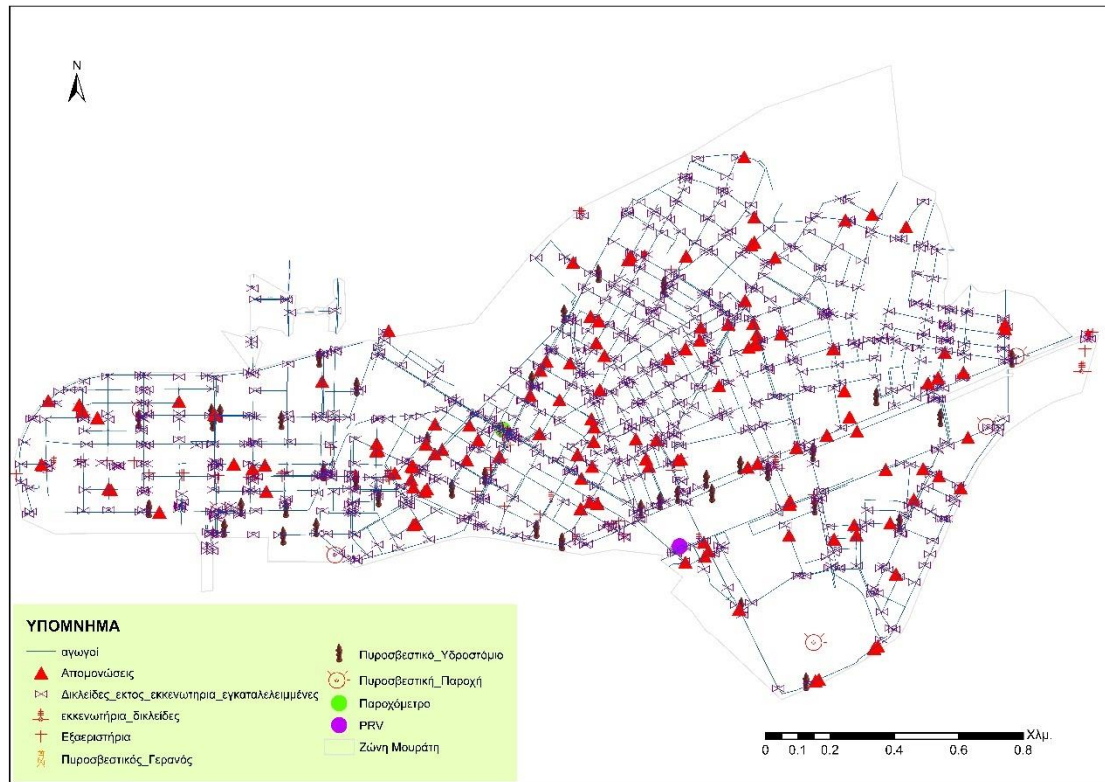
- Παροχόμετρο
- Πυροσβεστική Παροχή
- Πυροσβεστικός Γερανός
- Πυροσβεστικό Υδροστόμιο
- Ειδικές παροχές (μεγάλοι καταναλωτές)
- Μετρητές (υδρόμετρα)
- Απομονώσεις + αρχείο βλαβών (historical records of associated failure events)
- Όριο Υδραυλικά απομονωμένης περιοχής (Districted Metered Area, DMA)
Μουράτη
- Διακύμανση πιέσεων από την έξοδο της PRV, δηλαδή στην είσοδο της Ζώνης

Πολεοδομικά και λοιπά στοιχεία:

- Οικοδομικά τετράγωνα
- Ισοϋψείς καμπύλες (ανά 2 m)

Επισημαίνεται ότι το χρονικό διάστημα, που επιλέχθηκε για την επεξεργασία των απομονώσεων, είναι από τις 09/01/2015 έως τις 29/12/2018, δηλαδή μια σχεδόν ολοκληρωμένη τετραετία.

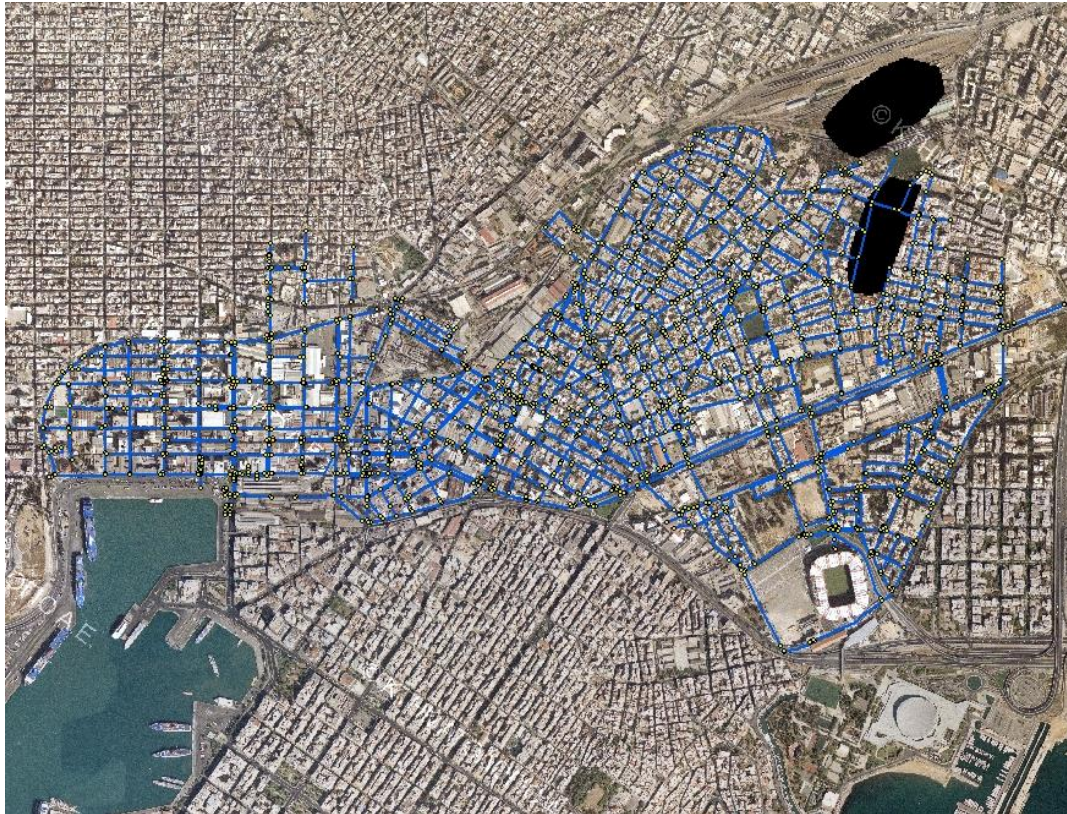
Σχετικά με τη χωρική ανάλυση των ανωτέρω δεδομένων (data exploration), χρησιμοποιείται το περιβάλλον των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, ΣΓΠ και συγκεκριμένα το λογισμικό ArcGIS 10.6.1 της ArcMap. Τα δεδομένα που δόθηκαν, οργανώθηκαν σε δύο γεωβάσεις: 1) Υδραυλικά στοιχεία και 2) Πολεοδομικά στοιχεία, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τους αγωγούς με τα υδραυλικά τεμάχια και απεικονίζονται αναλυτικά στο παρακάτω θεματικό χάρτη (Εικ. 7).



Εικόνα 7: Θεματικός χάρτης των αγωγών και των υδραυλικών τεμαχίων στη Ζώνη Μουράτη

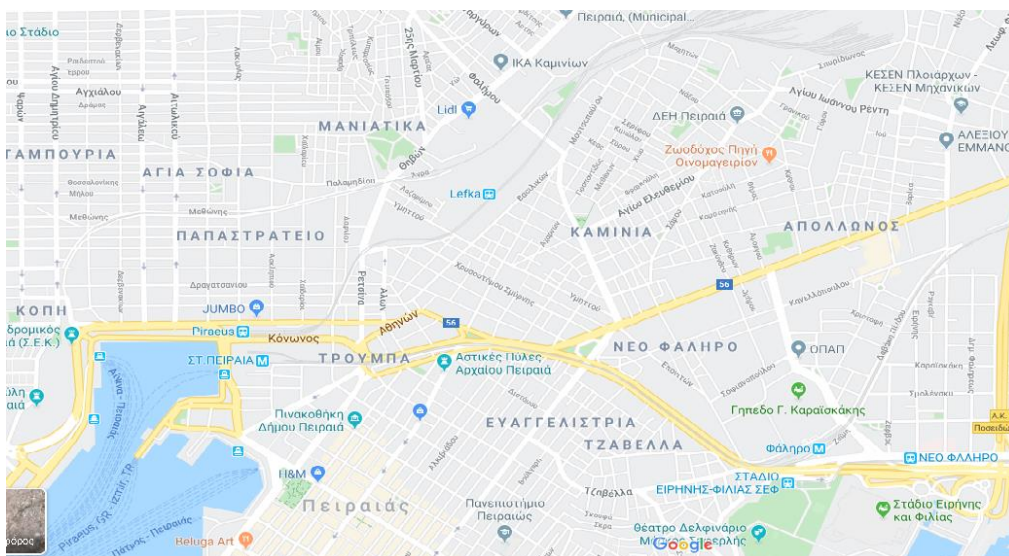
Κάποια στοιχεία σχετικά με την υπό μελέτη Ζώνη είναι ότι το εμβαδόν της ανέρχεται σε 3,012,373 m² ή περίπου 3 km² και η περιμέτρός της 12,399 m ή ισοδύναμα 12.4 km. Εκτείνεται στους Δήμους Πειραιά και Νίκαιας και οι χρήσεις γης της Ζώνης είναι κατοικία, βιοτεχνία, αθλητισμός - τουρισμός, συγκοινωνίες (Σιδηροδρομικός σταθμός Λεύκα), επιχειρήσεις, κρατικά κτίρια - υπηρεσίες, υγεία, δημόσιοι χώροι. Τα τοπωνύμια που περιέχονται στην Ζώνη είναι Καμίνια, Απόλλων, Νέο Φάληρο, Παπαστράτου, Λεύκα, Καλαμάκι, Αγία Σοφία, Χατζηκυριάκειο, Ρετσίνα, κ.ά.

Ακολούθως, απεικονίζεται η Ζώνη Μουράτη έχοντας ως υπόβαθρο την κατάλληλη ψηφιακή ορθοφωτογραφία μεγάλης κλίμακας (LSO) του Εθνικού Κτηματολογίου περιόδου λήψης 03/2007 – 09/2008 στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ '87 (Εικ. 8). Το μέγεθος του εικονοστοιχείου στο έδαφος είναι 0.50 m και καλύπτει τις εξής διαστάσεις στο έδαφος 4000m X 3000m.



Εικόνα 8: Ζώνη Μουράτη με υπόβαθρο ορθοφωτογραφία του Εθνικού Κτηματολογίου έτους 2007-2008

Βλέπουμε ότι στη Ζώνη Μουράτη περιλαμβάνεται το Γήπεδο Καραϊσκάκη στο νοτιοδυτικό τμήμα της Ζώνης, όπως επίσης το Παπαστράτειο Κολυμβητήριο Πειραιά, η Γενική Κλινική «Παναγία η Οδηγήτρια», η εκκλησία της Αγίας Σοφίας, το Γυμνάσιο Καμινίων Πειραιά, το Ράλλειο Γυμνάσιο Θηλέων Πειραιά κ.ά., όπως θα δούμε σε απόσπασμα της ευρύτερης περιοχής από το Google Maps (Εικ. 9).



Εικόνα 9: Απόσπασμα της Google Maps της ευρύτερης περιοχής της Ζώνης Μουράτη

Σημαντικό χαρακτηριστικό της εργασίας αυτής είναι ότι, σε συνεργασία με την ΕΥΔΑΠ ΑΕ, η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε πραγματικά δεδομένα που ήδη συλλέγει η Εταιρεία και άρα εκτιμάται ότι θα είναι περισσότερο ρεαλιστική και άμεσα χρησιμοποιήσιμη. Ταυτόχρονα, εκτιμάται ότι η σχετική προπαρασκευαστική εργασία ανάλυσης και συνδυασμού πληροφορίας από υπάρχουσες βάσεις της ΕΥΔΑΠ, θα αποτελέσει μια χρήσιμη διερεύνηση για την αξία της συνδυαστικής αξιοποίησης πολλαπλών βάσεων που ήδη αναπτύσσει η Εταιρεία για διαφορετικούς σκοπούς και άρα θα συνεισφέρει στην βελτίωση της γενικότερης πολιτικής διαχείρισης δεδομένων και στον καλύτερο σχεδιασμό μελλοντικών προγραμμάτων συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων της Εταιρείας.

4 Εκτίμηση τρωτότητας/επικινδυνότητας θραύσης (vulnerability) αγωγών

Στόχος τους πρώτου σκέλους της μεθοδολογίας είναι να προκύψει ένας αριθμός (vulnerability score) για κάθε αγωγό της Ζώνης. Ενώ υπάρχουν οι παρατηρημένες θραύσεις (συμβάντα, πρωτογενή δεδομένα) στη Ζώνη που μελετάται, προχωρούμε στην παραγωγή των θραύσεων μέσω μοντέλου βάσει των τεχνικών χαρακτηριστικών των αγωγών, διότι θεωρείται δεδομένο ότι δεν είναι καταγεγραμμένες οι θραύσεις σε όλο το μήκος του δικτύου. Συνεπώς, σε εκείνες τις περιοχές εφαρμόζεται το μοντέλο που επιλέγεται, με στόχο την πρόβλεψη των εκάστοτε θραύσεων. Προϋπόθεση αποτελεί η παραγωγή μοντέλων μεγάλης απόδοσης από τα υπάρχοντα δεδομένα, τα οποία να μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικές Ζώνες. Παράλληλα στους αγωγούς με μεγάλη τρωτότητα/επικινδυνότητα θραύσης που προκύπτουν από το μοντέλο και υπάρχουν καταγεγραμμένες οι θραύσεις, προτείνεται να γίνεται αναλυτική μελέτη και σύγκριση με τις παρατηρούμενες τιμές.

Το εργαλείο με το οποίο προκύπτει το μοντέλο πρόβλεψης θραύσεων, εκείνη η σχέση δηλαδή μεταξύ του ρυθμού θραύσης και των δεικτών απόδοσης/μεταβλητών που σχετίζονται με αυτόν, είναι το EPR – MOGA XL, όπου εφαρμόζεται η μέθοδος EPR, η οποία αναλύεται παρακάτω. Το EPR χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια για τη διερεύνηση θραύσεων αγωγών σε δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης (Giustolisi et al., 2008).

Κατά την είσοδο των δεδομένων στο EPR tool είναι αναγκαίο οι αγωγοί να είναι ήδη κατηγοριοποιημένοι σε κλάσεις, βάσει των χαρακτηριστικών τους. Όπως αναφέρουν οι Shamir & Howard το 1979, οι Lei & Saegrov το 1998 και οι Kleiner & Rajani το 1999 (1979, 1998 και 1999, όπ. αναφ. στο Berardi, Giustolisi, Laucelli and Savic, 2008), οι αγωγοί συχνά χρειάζεται να συγκεντρωθούν σε ομοιογενείς ομάδες για να διεξαχθεί αποτελεσματικότερη ανάλυση.

Γενικά, εφόσον στόχος της μελέτης είναι η βέλτιστη διαχείριση των στοιχείων του συστήματος (asset management) και συγκεκριμένα η ιεράρχηση αντικατάστασης αγωγών, επιλέγεται να γίνει προσέγγιση των θραύσεων βάσει των χαρακτηριστικών των αγωγών, που λειτουργούν ως δείκτες απόδοσης (PI, Performance Indicators) του συστήματος (Berardi et al., 2008).

4.1 Η μέθοδος EPR

Η μέθοδος EPR, Evolutionary Polynomial Regression, αποτελεί μία υβριδική τεχνική βασισμένη στα δεδομένα (hybrid data-driven technique), η οποία συνδυάζει την αποτελεσματικότητα και διατηρεί τα καλύτερα χαρακτηριστικά του γενετικού προγραμματισμού (genetic programming) και της αριθμητικής παλινδρόμησης (numerical regression) για την ανάπτυξη απλών και εύκολα ερμηνεύσιμων

μαθηματικών εκφράσεων - μοντέλων. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τους Giustolisi & Savic το 2004 και το 2006.

Αναφορικά με το κομμάτι του γενετικού προγραμματισμού, χρησιμοποιείται ο στρατηγικός γενετικός αλγόριθμος πολλαπλών στόχων (Multi - Objective Genetic Algorithm, MOGA).

Αρχικά υποθέτοντας m ψευδο-πολυωνυμικούς όρους και θεωρώντας εκφυλιστικές περιπτώσεις όλα εκείνα τα ψευδο-πολυωνύμια που έχουν λιγότερους από m όρους, διερευνάται ο χώρος τύπων με m όρους, χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους δύο στόχους:

- ➔ μεγιστοποίηση της ακρίβειας του μοντέλου, CoD
- ➔ ελαχιστοποίηση του αριθμού των πολυωνυμικών συντελεστών στο μαθηματικό τύπο (formulae)

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με την προσέγγιση του MOGA αλγορίθμου, η οποία βασίζεται στο κριτήριο δεσπόζουσας θέσης Pareto. Χρησιμοποιώντας αυτό το κριτήριο η αναζήτηση EPR γίνεται ταχύτερη, διότι γίνεται ταυτόχρονη αναζήτηση μοντέλων με διαφορετικό αριθμό πολυωνυμικών παραμέτρων ($j = 1, 2, \dots, m$) (a_j).

Επιπλέον, τα μοντέλα που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο είναι ήδη ταξινομημένα ανάλογα με: (1) την επιτευχθείσα ακρίβεια (δηλαδή την προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα εκμάθησης) και (2) τον αριθμό των λαμβανομένων όρων (πολυωνυμικών παραμέτρων), που αναφέρθηκε παραπάνω

(1): 1-CoD, επιθυμούμε όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή για τα μοντέλα, δηλαδή μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή ακρίβειας του μοντέλου CoD (fitness, model accuracy)

(2): πλήθος a_j , # a_j , επιθυμούμε όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή για τα μοντέλα

Ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική, η επιπλέον βελτίωση στο EPR είναι η χρήση της MOGA στρατηγικής για τη βελτιστοποίηση του αριθμού των μεταβλητών εισόδου (X_i) επιπλέον. Συνεπώς, οι διευρυμένοι στόχοι για την αναζήτηση EPR είναι οι εξής:

- ➔ Μεγιστοποίηση της ακρίβειας του μοντέλου (μικρή τιμή του 1-CoD)
- ➔ ελαχιστοποίηση του πλήθους των πολυωνυμικών παραμέτρων στο μαθηματικό τύπο (formulae) (μικρή τιμή του πλήθους των σταθερών παραμέτρων # a_j)
- ➔ ελαχιστοποίηση του πλήθους των μεταβλητών εισόδου (% X_i πόσες φορές εμφανίζεται κάθε X_i στο μοντέλο)

Σημειώνεται ότι το EPR μπορεί να προσδιορίσει εκείνο το μέτωπο Pareto που αποτελείται από ένα σύνολο βέλτιστων μοντέλων, τα οποία έχουν έως και m αριθμό όρων, με κριτήρια τη φειδώ (parsimony) της εξίσωσης, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των σταθερών παραμέτρων και μεταβλητών, αλλά και την ακρίβεια του κάθε μοντέλου. Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση αυτή, δηλαδή για το εξελικτικό στάδιο του EPR ονομάζεται OPTIMOGA (Giustolisi & Savic, 2009).

Πιο αναλυτικά, η μέθοδος EPR, Evolutionary Polynomial Regression αποτελεί μια εξελικτική μη γραμμική βηματική παλινδρόμηση, η οποία επιτρέπει ολιστική εξερεύνηση του από τον χρήστη ορισμένου χώρου των μοντέλων και παράγει συμβολικές εκφράσεις (symbolic expressions) για κάθε ένα από αυτά.

Ο όρος παλινδρόμηση αναφέρεται σε τεχνική που στοχεύει στην ερμηνεία - πρόβλεψη της τιμής μιας εξαρτημένης μεταβλητής με χρήση μαθηματικών τύπων. Η απλούστερη μορφή παλινδρόμησης, είναι η γραμμική παλινδρόμηση, που παράγει μια εξίσωση ευθείας γραμμής, της μορφής ($y = ax + b$). Με τη χρήση του αντίστοιχου τύπου, είναι εφικτή η πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής, αν είναι γνωστές οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Προηγμένες τεχνικές παλινδρόμησης, όπως η πολλαπλή παλινδρόμηση, επιτρέπουν τη χρήση περισσότερων από μία μεταβλητών εισόδου, όπως αναφέρει ο Charple το 2011 (Τερζοπούλου, 2015) αλλά και σκοπεύουν στην επιλογή χαρακτηριστικών για γραμμικά μοντέλα λαμβάνοντας υπόψη την προσαρμογή (fit) του μοντέλου στα δεδομένα, όπως η βηματική παλινδρόμηση, η οποία προέρχεται από τη μέθοδο των Draper and Smith (1998). Επομένως, βάσει της στρατηγικής της βηματικής παλινδρόμησης, εξερευνάται ο χώρος των γραμμικών λύσεων, αλλάζοντας τα εισαγόμενα δεδομένα στο μοντέλο βάσει ενός συνόλου κανόνων (set of rules) και παράλληλα αξιολογώντας την προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα, όπως φαίνεται στο σχετικό βίντεο που εξάγεται μέχρι να καταλήξει στη βέλτιστη γενιά λύσεων.

Η EPR γενικεύει την κλασική μέθοδο της βηματικής παλινδρόμησης εξετάζοντας μη γραμμικές εκφράσεις/εξισώσεις, οι οποίες καλούνται ψευδοπολυώνυμα. Στη μέθοδο EPR ο χώρος των μοντέλων ορίζεται από την επιλογή μιας κατηγορίας μοντέλου που αποτελείται από μια βασική ψευδοπολυωνυμική δομή, όπως στην παρακάτω εξίσωση, ένα μέγιστο αριθμό όρων και ένα σύνολο EX πιθανών εκθετών των μεταβλητών εισόδου X_i (Giustolisi & Savic, 2006; 2009).

$$Y = a_o + \sum_{j=1}^m (X_1)^{ES(j,1)} \cdot \dots \cdot (X_k)^{ES(j,k)} \quad (1)$$

Η κατασκευή δομών EPR μοντέλων συνίσταται στην επιλογή των εκθετών $ES_{(j,i)}$ χρησιμοποιώντας εξελικτικό αλγόριθμο, για κάθε i μεταβλητή στον j όρο μεταξύ των τιμών που καθορίζονται από το EX σύνολο χρησιμοποιώντας εξελικτικό αλγόριθμο.

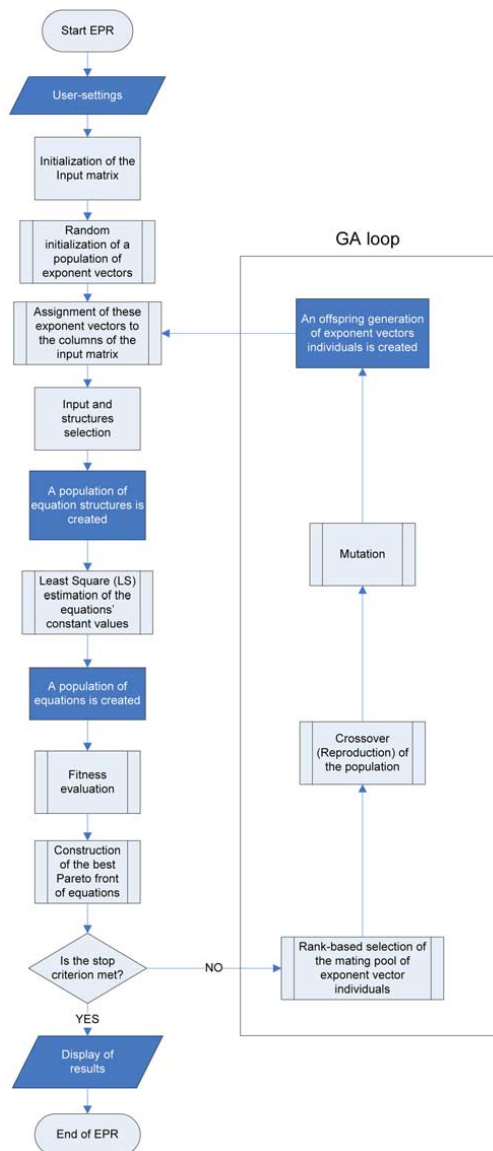
i : ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου (X_i)

j : ο αριθμός των άγνωστων πολυωνυμικών παραμέτρων του μοντέλου (a_j)

k : ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου στα μοντέλα (X_k)

Συνήθως το σύνολο των εκθετών EX περιλαμβάνει και την τιμή 0, έτσι ώστε μία ή περισσότερες μεταβλητές (ή ακόμα και όροι) να μπορούν να διαγραφούν από το τελικό μοντέλο καθώς διαμορφώνεται. Επιπλέον, οι παράμετροι του μοντέλου a_j εκτιμούνται μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (Least Square, LS) ή της μεθόδου των μη αρνητικών ελαχίστων τετραγώνων (Non-negative Least Square) (Giustolisi et al., 2011).

Συνοψίζοντας την όλη διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά, σε πρώτο στάδιο διενεργείται η εύρεση μοντέλων/συμβολικών δομών/εκφράσεων (symbolic expressions) με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του σφάλματος πρόβλεψης και της πολυπλοκότητας του μοντέλου (π.χ. αριθμός όρων και αριθμός δεδομένων εισόδου με μη μηδενικούς εκθέτες) και σε δεύτερο στάδιο, εκτιμούνται οι σταθερές παράμετροι a_j επιλύοντας γραμμικό πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων, δημιουργώντας μια αμφίδρομη σχέση μεταξύ δομής μοντέλου και των παραμέτρων του (Giustolisi & Savic, 2006) (Giustolisi et al., 2011). Επιπρόσθετα, η εξερεύνηση του χώρου των λύσεων χρησιμοποιώντας τον εξελικτικό αλγόριθμο δεν προϋποθέτει την έρευνα μίας μοναδικής λύσης (Giustolisi et al., 2011), όπως περιγράφεται αναλυτικά στα αποτελέσματα. Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας της EPR μεθόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα που ακολουθεί (Εικ. 10). Τα επιμέρους στάδια της διαδικασίας εκτέλεσης του EPR επεξηγούνται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής της μεθόδου EPR (Giustolisi et al., 2008)

Η μέθοδος EPR πλεονεκτεί σε σχέση με άλλες τεχνικές βασισμένες σε δεδομένα (data driven techniques) από την πλευρά της παλινδρόμησης. Ένα βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι αποφεύγονται προβλήματα υπερ-προσαρμογής (overfitting) στα δεδομένα, ειδικά για τις μικρές βάσεις δεδομένων αφού το πλήθος των σταθερών παραμέτρων που εκτιμούνται είναι μικρό (Giustolisi et al., 2011).

Η μέθοδος EPR εφαρμόζεται στο στατιστικό πακέτο EPR-MOGA XL. Το EPR-MOGA XL αποτελεί ένα πρόσθετο του MS Excel, το οποίο εκκινείται ως συνάρτηση στο MS Excel.

4.2 Προετοιμασία δεδομένων για είσοδο στο EPR (Data preparation) και ρυθμίσεις EPR (EPR settings)

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, αναπόσπαστο κομμάτι στη διαδικασία λήψης αποφάσεων ως προς τη βέλτιστη διαχείριση των πόρων (asset management) ενός συστήματος ύδρευσης, αποτελεί η επιλογή των κατάλληλων δεικτών απόδοσης (Performance Indicators, PI), όπως αναφέρουν οι McDonald & Zao το 2001, οι Shepherd et al. το 2004 και οι Giustolisi et al. το 2006 (2001, 2004 και 2006, όπ. αναφ. στο Berardi et al., 2008). Ο σκοπός της επιλογής κατάλληλων δεικτών είναι η περιγραφή του ρυθμού θραύσης μέσω μιας μοναδικής έκφρασης, η οποία περιλαμβάνει τις ίδιες επεξηγηματικές μεταβλητές για όλους τους αγωγούς.

Το International Water Association, IWA έχει δημιουργήσει ένα σύστημα δεικτών απόδοσης, που προέκυψαν από την προσομοίωση της υδραυλικής συμπεριφοράς και της απόδοσης των στοιχείων του συστήματος (asset performance) και συχνά λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς για τον καθορισμό και την επιλογή των σχετικών δεικτών. Τέτοιοι δείκτες μπορούν να είναι ο χρόνος εγκατάστασης των αγωγών (ή αλλιώς η ηλικία), το υλικό κατασκευής, οι ασκούμενες πιέσεις, το βάθος τοποθέτησης, η τραχύτητα, οι χρήσεις γης, ο τύπος εδάφους κ.ά., καθώς έχει αποδειχθεί και αναφέρεται στην σχετική βιβλιογραφικά ότι αγωγοί με παρόμοια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν παρόμοιο ρυθμό θραύσης.

Η ηλικία όπως και η διάμετρος των αγωγών έχει αποδειχθεί ότι έχουν ισχυρή συσχέτιση με το ρυθμό θραύσης τους, με την ηλικία να έχει το μέγιστο βαθμό επιρροής σε θραύσεις σε σχέση με το χρόνο (Berardi et al., 2008) (Giustolisi et al., 2007). Μετά από μελέτη των Pelletier et al. το 2003 (όπ. ανάφ. στο Berardi et al. το 2008), αποδείχθηκε ότι εκτός της ηλικίας και της διαμέτρου των αγωγών, υπάρχει επιπλέον στενή εξάρτηση μεταξύ του υλικού κατασκευής και των θραύσεων. Ακόμα, το μήκος του εκάστοτε

αγωγού μπορεί να λειτουργήσει ως επιπρόσθετη επεξηγηματική μεταβλητή (Berardi et al., 2008).

Η ηλικία τοποθέτησης των αγωγών, που αποτελεί την πιο ισχυρή μεταβλητή, δεν έχει συλλεχτεί από την ΕΥΔΑΠ για την συγκεκριμένη Ζώνη και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, δεν χρησιμοποιούνται οι πιέσεις, διότι πρόκειται για ζώνη ελεγχόμενης πίεσης, όπου με εξαίρεση κάποιες αστοχίες του υδραγωγείου που μπορούν να προκαλέσουν θραύση στους αγωγούς, οι πιέσεις κυμαίνονται σε πολύ συγκεκριμένο εύρος [4.4 - 5.3 atm].

Δεδομένου των υπαρχόντων βάσεων που έχουν δοθεί για την υπό μελέτη Ζώνη, επιλέγεται το υλικό κατασκευής, η εξωτερική διάμετρος και το μήκος των αγωγών ως εξεταζόμενα κριτήρια απόδοσης και ανεξάρτητες μεταβλητές για το μοντέλο πρόβλεψης θραύσεων μέσω της μεθόδου EPR. Συγκεκριμένα, αγωγοί με μεγάλες ηλικίες, μικρές διαμέτρους και μεγάλα μήκη παρουσιάζουν αυξημένο ρυθμό θραύσης (Giustolisi et al., 2007) (Berardi et al., 2008).

Όπως έχει προαναφερθεί, για την είσοδο των δεδομένων στο EPR, είναι αναγκαία η κατηγοριοποίηση των αγωγών σε ομοιογενείς κλάσεις. Δεδομένου ότι δεν προέκυψαν κανόνες κατηγοριοποίησης μέσω του classification Learner του MatLab, προβαίνουμε σε απλούστερες μεθόδους κατηγοριοποίησης βάσει χαρακτηριστικών των υπό μελέτη αγωγών, τους δείκτες απόδοσης που επιλέγονται, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της εκάστοτε βάσης. Εφόσον εφαρμόζεται το πρόγραμμα των Berardi, Laucelli και Giustolisi, ακολουθείται πιστά η μεθοδολογία που προτείνεται και είναι κοινή σε όσα επιστημονικά άρθρα έχουν παρουσιάσει οι ίδιοι μαζί με τους υπόλοιπους συνεργάτες τους.

Οι κλάσεις διαμορφώνονται ανάλογα το υλικό κατασκευής τους και την εξωτερική διάμετρο τους. Βιβλιογραφικά επιλέγονται συνήθως η ηλικία και η εξωτερική διάμετρος των αγωγών ως τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά για την κατηγοριοποίηση των αγωγών (Berardi et al., 2008). Λόγω έλλειψης δεδομένων για την ηλικία των αγωγών, επιλέχθηκε αντ' αυτής το υλικό κατασκευής τους, που συνδέεται έμμεσα με την ηλικία των αγωγών.

Για κάθε κλάση, υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός θραύσεων (Brt), το άθροισμα των μηκών των αγωγών (L_{class}) και ο συνολικός αριθμός αγωγών που ανήκουν σε κάθε μία (N). Ακόμα, προσδιορίζεται μια ισοδύναμη τιμή της εξωτερικής διαμέτρου για κάθε κλάση (D_{class}), που είναι μέση σταθμισμένη τιμή της εξωτερικής διαμέτρου βάσει του μήκους των αγωγών σε κάθε κλάση.

$$DI_{class} = \frac{\sum_{class}(L \cdot DI)}{L_{class}} \quad (\text{Berardi et al., 2008})$$

Για την εισαγωγή της μεταβλητής του υλικού κατασκευής είναι αναγκαία η κωδικοποίηση της πληροφορίας και η μετατροπή της από κείμενο σε αριθμό. Παρατηρείται ότι υπάρχει έλλειψη της πληροφορίας του υλικού κατασκευής για κάποιους αγωγούς (πρωτογενής πληροφορία από βάση δεδομένων, ΑΓΝΩΣΤΟ), όπου

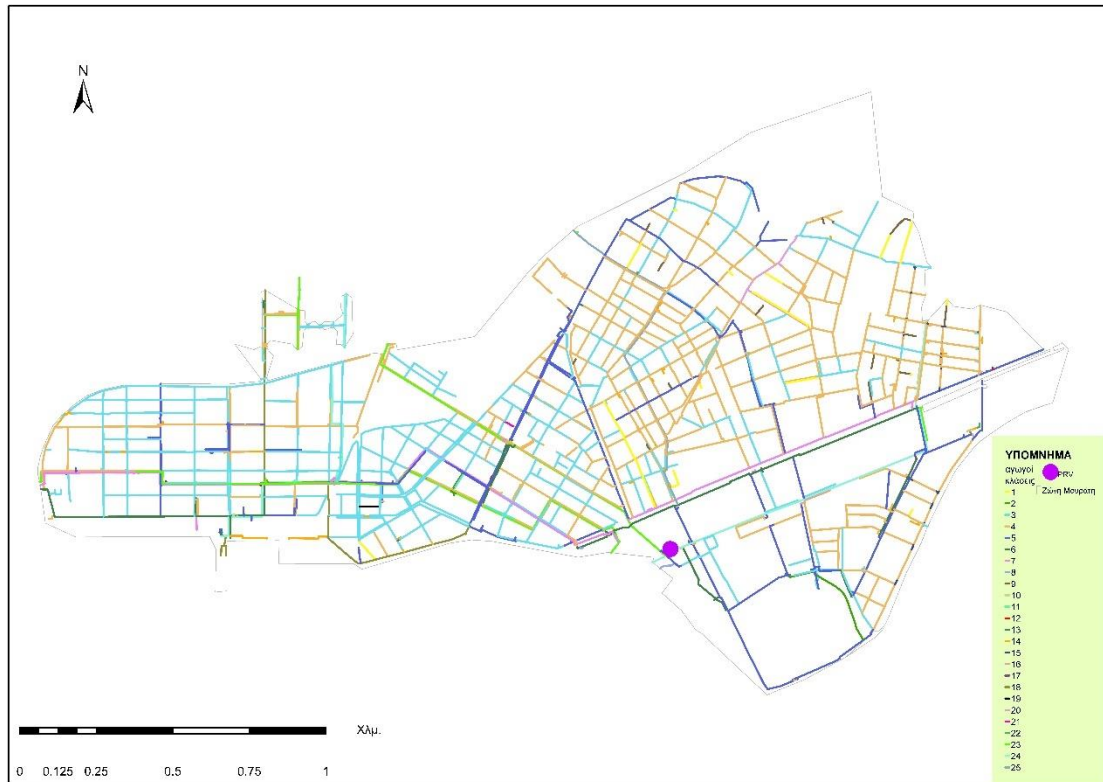
και δεν κωδικοποιείται και συνεπώς αφαιρούνται οι συγκεκριμένοι αγωγοί από το σετ δεδομένων. Συνεπώς, ο Πίνακας της κωδικοποίησης του υλικού κατασκευής διαμορφώνεται ως εξής (Πίν. 7).

Πίνακας 7: Αντιστοιχία υλικού κατασκευής αγωγών με κωδικοποιημένο αριθμό

Υλικό κατασκευής αγωγών	Κωδικοποίηση
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1
P.V.C.	2
ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3
ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4
ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5
ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6

Η κωδικοποίηση έχει ακολουθήσει την χρονολογική σειρά εγκατάστασης αγωγών από κάθε ένα υλικό κατασκευής, με το πολυαιθυλένιο 3^{ης} γενιάς να είναι αυτό που χρησιμοποιείται κατά τις πρόσφατες εγκαταστάσεις αγωγών εδώ και 20 χρόνια, από το έτος 1999. Σύμφωνα με προφορικές μαρτυρίες υπαλλήλων της ΕΥΔΑΠ, αγωγοί από PVC τοποθετούνταν κατά τη χρονική περίοδο 1993 – 1999, αγωγοί από αμιαντοτσιμέντο κατά το 1980 – 1989 και αγωγοί από χυτοσίδηρο φαιό κατά τις δεκαετίες του '20 και του '30. Οι χαλύβδινοι (μαντεμένιοι) χρησιμοποιούταν κατά κύριο λόγο για την εγκατάσταση τροφοδοτικών αγωγών με μεγαλύτερες διαμέτρους.

Σχετικά με την κατηγοριοποίηση των αγωγών, προέκυψαν 35 κλάσεις βάσει των παραπάνω, ωστόσο λόγω έλλειψης της πληροφορίας του υλικού κατασκευής, που προαναφέρθηκε, (πρωτογενής πληροφορία από βάση δεδομένων, ΑΓΝΩΣΤΟ) και της εξωτερικής διαμέτρου (πρωτογενής πληροφορία από βάση δεδομένων, D=0) για ορισμένους αγωγούς, οι κλάσεις διαμορφώθηκαν σε 25, με τον αριθμό των αγωγών να μειώνεται σε 1637 από 1715, αντίστοιχα (Πίν.). Ακολουθεί θεματικός χάρτης απεικόνισης των αγωγών κατηγοριοποιημένων στις 25 κλάσεις, όπου αναγράφεται το πλήθος των στοιχείων της κάθε κλάσης (Εικ. 11).



Εικόνα 11: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης αγωγών βάσει κλάσης υλικού κατασκευής - εξωτερικής διαμέτρου

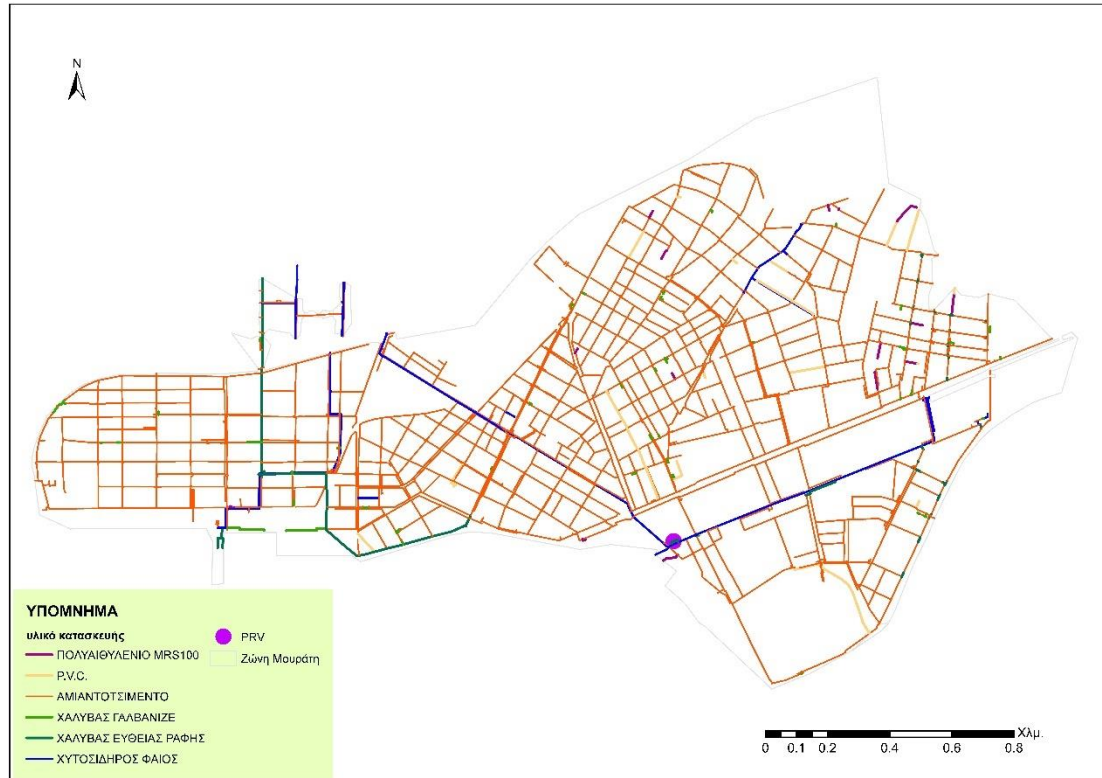
Σχηματικά συμπεραίνεται ότι η πλειοψηφία των αγωγών ανήκει στην κλάση 4 (ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ - Φ100) με την κλάση 3 (ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ - Φ80) να ακολουθεί, κάτι που επαληθεύεται στον Πίνακα με τα κατηγοριοποιημένα δεδομένα ανά υλικό κατασκευής και εξωτερική διάμετρο, όπου καταγράφεται και το πλήθος των αγωγών σε κάθε κλάση μαζί με το πλήθος των θραύσεων.

Πίνακας 8: Σύνολο δεδομένων κατηγοριοποιημένα ανά υλικό κατασκευής (M) και εξωτερική διάμετρο (DI)

Class	Brt	material	M	L	DI	N
1	1	P.V.C.	2	1375.658	110	34
2	1	P.V.C.	2	476.8691	160	6
3	39	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	25485.53	80	462
4	30	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	28623.49	100	618
5	9	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	11292.02	150	204
6	2	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	3456.355	200	51
7	2	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	3451.773	250	30
8	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	66.46587	63	4
9	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	499.9268	110	27
10	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	29.70046	160	4
11	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	67.93843	50.8	7
12	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	42.15767	63.5	5
13	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	56.84306	76.2	7

14	1	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	816.383	101.6	70
15	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	246.4524	100	26
16	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	128.3441	150	3
17	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	19.2576	200	4
18	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	1765.152	300	26
19	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	67.79257	50	2
20	1	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	555.8687	70	11
21	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	34.13047	80	1
22	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	32.0055	100	2
23	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	3933.501	400	20
24	2	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	2577.552	600	8
25	1	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	1209.578	900	5

Θεωρείται ότι είναι πιο εύκολο να εξαχθούν συμπεράσματα όταν παρουσιάζονται δύο ξεχωριστοί χάρτες με την ταξινόμηση των αγωγών ανά υλικό κατασκευής (Εικ. 12) και ανά εξωτερική διάμετρο (Εικ. 13), σε σχέση με τον προηγούμενο χάρτη με τους ταξινομημένους αγωγούς στις σχετικές κλάσεις. Οι χάρτες συνοδεύονται από τους αντίστοιχους πίνακες με το πλήθος των αγωγών για κάθε κατηγορία που εξετάζεται (Πίν. 9) (Πίν. 10).

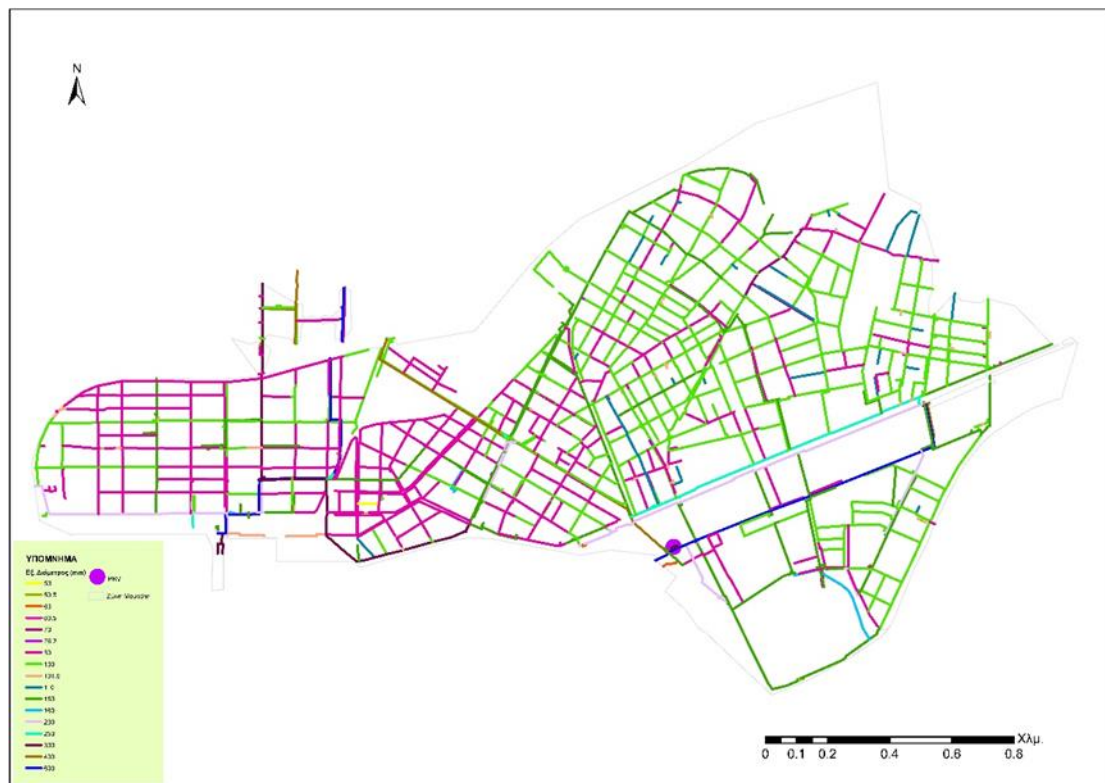


Εικόνα 12: Θεματικός χάρτης ταξινομημένων αγωγών βάσει του υλικού κατασκευής τους

Πίνακας 9: Τύποι υλικών κατασκευής και πλήθος αγωγών για κάθε ένα τύπο

Υλικό κατασκευής	N
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	35
P.V.C.	40
ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	1365
ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	89
ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	59
ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	49

Από τον σχετικό χάρτη και Πίνακα, συμπεραίνεται ότι η συντριπτική πλειοψηφία των αγωγών είναι κατασκευασμένοι από αμιαντοτσιμέντο (1365 αγωγοί από τους 1637 συνολικά) και συμβολίζονται στο χάρτη με κόκκινο χρώμα και ακολουθούν με μεγάλη διαφορά από τους πρώτους, οι αγωγοί από χάλυβα γαλβανιζέ που συμβολίζονται με ανοιχτό πράσινο χρώμα (89 αγωγοί). Είναι εμφανές ότι ελάχιστοι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο 3^{ης} γενιάς (μόλις 35 αγωγοί), που αποτελεί το καταλληλότερο υλικό κατασκευής και αυτό που χρησιμοποιείται στην σημερινή εποχή, όπως προαναφέρθηκε, αλλά και από PVC, που είναι το αμέσως προηγούμενο υλικό που χρησιμοποιούταν (40 αγωγοί). Βάση αυτών, καταλήγουμε ότι η πλειοψηφία των αγωγών στη Ζώνη Μουράτη έχει εγκατασταθεί εδώ και πολλά χρόνια και συγκεκριμένα εκτιμάται πάνω από 30 χρόνια, ενδεχομένως και από τη δεκαετία του 1980.



Εικόνα 13: Θεματικός χάρτης ταξινομημένων αγωγών βάσει της εξωτερικής τους διαμέτρου

Πίνακας 10: Τιμές εξωτερικής διαμέτρου και πλήθος αγωγών για κάθε μία

<u>D(mm)</u>	<u>N</u>
50	2
50.8	7
63	4
63.5	5
70	11
76.2	7
80	463
100	646
101.6	70
110	61
150	207
160	6
200	55
250	30
300	26
400	20
600	8
900	5

Σχετικά με την εξωτερική διάμετρο, διαπιστώνεται ότι οι περισσότεροι αγωγοί έχουν εξωτερική διάμετρο Φ100 και συμβολίζονται με ανοιχτό πράσινο χρώμα (646 αγωγοί) και η δεύτερη σε συχνότητα εμφάνιση διάμετρο είναι η Φ80 με σκούρο μωβ χρώμα και (463 αγωγοί). Πιο γενικά, αγωγοί με εύρος διαμέτρου 80-150mm παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, με τους αγωγούς που ανήκουν στην κατηγορία διαμέτρου 160-900 mm να είναι ελάχιστοι (150 αγωγοί), ειδικότερα εκείνοι με διαμέτρους άνω των 400 mm.

Συνεχίζοντας την προετοιμασία των δεδομένων για είσοδο στο EPR, από το σύνολο των αγωγών επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί το 80% του συνόλου ως δεδομένα εκμάθησης (training data) (X,Y) και το 20% ως δεδομένα ελέγχου (testing data) (XV,YV). Ακολουθείται η κλασσική προσέγγιση κατά την εκτίμηση των παραμέτρων ενός μοντέλου, όπου πρώτα γίνεται η βαθμονόμηση (calibration) και στην συνέχεια η επαλήθευση (validation), όπου ελέγχεται η επίδοση των βελτιστοποιημένων παραμέτρων του μοντέλου σε ένα άλλο σύνολο δεδομένων. Άρα, από τους 1637 αγωγούς, χρησιμοποιούνται οι 1310 ως δεδομένα εισόδου για την κατασκευή του μοντέλου (training data), ενώ οι υπόλοιποι 327 αγωγοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον έλεγχο (testing data), με στόχο τη δοκιμή των δυνατοτήτων γενίκευσης των μοντέλων που θα προκύψουν και δεν περιλαμβάνονται στην κατασκευή των μοντέλων. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, αυτός είναι ο βασικός στόχος της χρήσης του EPR, η γενίκευση μοντέλων πρόβλεψης θραύσεων σε περιοχές που δεν

υπάρχουν καταγεγραμμένες οι θραύσεις. Επιπλέον, το EPR έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει με μη ολοκληρωμένες εγγραφές δεδομένων εξόδου Y , διότι έχει την ικανότητα να ανασχηματίζει (reconstruct) δεδομένα μέσω γραμμικής παρεμβολής κατά την προσομοίωση και να συμπληρώνει τις κενές τιμές από τα μοντέλα που προκύπτουν (Giustolisi et al., 2004).

Στον παρακάτω Πίνακα συνοψίζονται τα σύνολα και τα υποσύνολα δεδομένων, που τελικά εισάγονται στο στατιστικό πακέτο EPR και μελετώνται στην εργασία. (Πίν. 11).

Πίνακας 11: Σύνολα και υποσύνολα δεδομένων εισόδου στο EPR

Χρονική περίοδος μελέτης θραύσεων	2015 - 2018
Σύνολο αγωγών που χρησιμοποιούνται	1637
Αγωγοί με θραύση	122
Αγωγοί χωρίς θραύση	1415
Υποσύνολο δεδομένων εκμάθησης (training data)	1310
Πλήθος αγωγών με θραύση στο υποσύνολο δεδομένων εκμάθησης	90
Υποσύνολο δεδομένων ελέγχου (testing data)	327
Πλήθος αγωγών με θραύση στο υποσύνολο δεδομένων ελέγχου	32

Από τον Πίνακα, είναι εμφανές ότι το πλήθος των καταγεγραμμένων θραύσεων κατά τη χρονική περίοδο που μελετάται στην Ζώνη Μουράτη, αντιστοιχεί σε λιγότερο από 10% (7.45%) του συνόλου των αγωγών, κάτι το οποίο επαληθεύεται στην πλειοψηφία των δικτύων διανομής νερού (Berardi et al., 2008).

Συνοψίζοντας, βάσει των ανωτέρω και της μεθοδολογίας του EPR που ακολουθείται, ως μεταβλητές εισόδου ή επεξηγηματικές ή ανεξάρτητες μεταβλητές X_i θεωρείται το υλικό κατασκευής των αγωγών (M) X_1 , το μήκος αγωγών (L) X_2 , η εξωτερική διάμετρος (DI) X_3 καθώς και ο αριθμός των αγωγών που ανήκουν σε κάθε κλάση (N) X_4 . Η μεταβλητή εξόδου Y αφορά στον συνολικό αριθμό των θραύσεων (παρατηρημένες τιμές) Brt , που έχουν καταγραφεί για κάθε μία από τις 25 κλάσεις.

Παρουσιάζονται οι Πίνακες με τα κατηγοριοποιημένα δεδομένα εισόδου εκμάθησης (Πίν. 12) και ελέγχου (Πίν. 13) στο EPR, αντίστοιχα.

Πίνακας 12: Δεδομένα εκμάθησης (training data) κατηγοριοποιημένα ανά υλικό κατασκευής (M) και εξωτερική διάμετρο (DI)

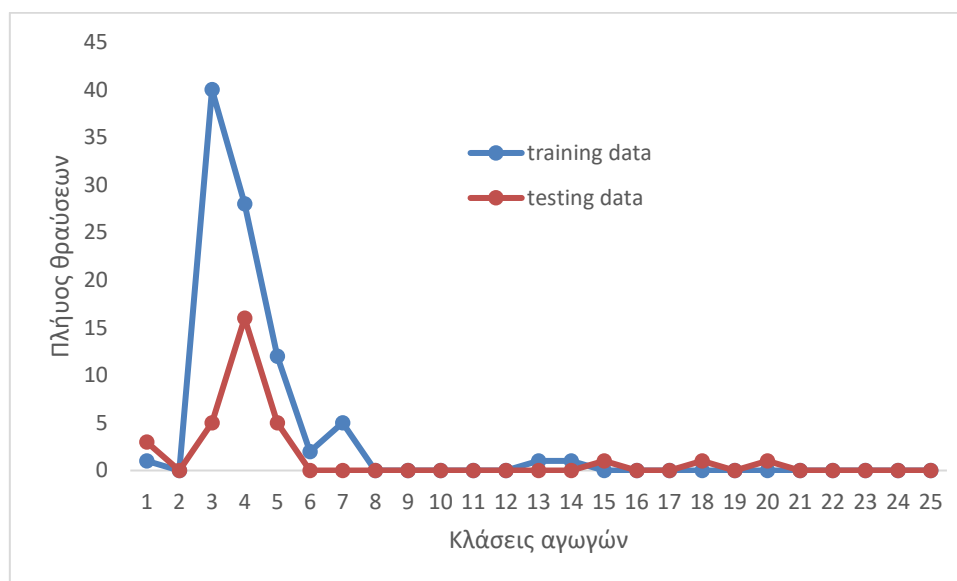
Class	Brt	material	M	L	DI	N
1	1	P.V.C.	2	387.58	110	16
2	0	P.V.C.	2	466.16	160	4
3	40	AMIANTOTΣΙΜΕΝΤΟ	3	21748.35	80	413
4	28	AMIANTOTΣΙΜΕΝΤΟ	3	20684.23	100	514
5	12	AMIANTOTΣΙΜΕΝΤΟ	3	8216.36	150	159
6	2	AMIANTOTΣΙΜΕΝΤΟ	3	2401.27	200	33
7	5	AMIANTOTΣΙΜΕΝΤΟ	3	2305.03	250	17
8	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	0.00	63	0
9	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	335.69	110	14
10	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	10.74	160	2
11	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	67.94	50.8	7

12	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	42.16	63.5	5
13	1	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	54.48	76.2	6
14	1	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	737.61	101.6	61
15	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	86.67	100	14
16	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	128.34	150	3
17	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	9.17	200	2
18	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	498.36	300	12
19	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	67.79	50	2
20	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	265.54	70	7
21	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	34.13	80	1
22	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	14.62	100	1
23	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	287.50	400	10
24	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	1718.31	600	5
25	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	1161.73	900	2

Πίνακας 13: Δεδομένα ελέγχου (testing data) κατηγοριοποιημένα ανά υλικό κατασκευής (M) και εξωτερική διάμετρο (DI)

Class	Brt	material	M	L	DI	N
1	3	P.V.C.	2	988.08	110	18
2	0	P.V.C.	2	10.71	160	2
3	5	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	3737.19	80	49
4	16	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	7939.25	100	104
5	5	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	3075.66	150	45
6	0	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	1055.09	200	18
7	0	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	3	1146.75	250	13
8	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	66.47	63	4
9	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	164.24	110	13
10	0	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	1	18.96	160	2
11	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	0.00	50.8	0
12	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	0.00	63.5	0
13	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	2.37	76.2	1
14	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	4	78.77	101.6	9
15	1	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	159.79	100	12
16	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	0.00	150	0
17	0	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	10.09	200	2
18	1	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	5	1266.79	300	14
19	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	0.00	50	0
20	1	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	290.33	70	4
21	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	0.00	80	0
22	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	17.39	100	1
23	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	3646.00	400	10
24	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	859.24	600	3
25	0	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	6	47.85	900	3

Συγκρίνεται η διακύμανση του πλήθους των θραύσεων για κάθε κλάση στο σύνολο των δεδομένων εκμάθησης (training data) και των δεδομένων ελέγχου (testing data) (Εικ. 14).



Εικόνα 14: Διακύμανση του πλήθους των θραύσεων για κάθε κλάση στο σύνολο των δεδομένων εκμάθησης (training data) και στο σύνολο δεδομένων ελέγχου (testing data)

Από το διάγραμμα παρατηρείται μια γενική μείωση του πλήθους των θραύσεων στο σύνολο ελέγχου και κυρίως ξεχωρίζει έντονη μείωση των θραύσεων για τις κλάσεις 3, 4 και 5, οι οποίες περιέχουν και τους περισσότερους αγωγούς με διαφορά από τις υπόλοιπες κλάσεις.

Παρακάτω περιγράφονται οι ρυθμίσεις του EPR, οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη. Αρχικά, εισάγεται το όνομα με το οποίο αποθηκεύεται το αρχείο, επιλέγεται ο τρόπος εμφάνισης (Plot option) του διαγράμματος των παρατηρημένων B_{rt} και των προσομοιωμένων τιμών B_{rt}^{EPR} των θραύσεων για κάθε μοντέλο που προκύπτει, όπου επιλέγεται το καρτεσιανό διάγραμμα (το διάγραμμα σκέδασης μπορεί εξίσου να επιλεγεί καθώς είναι ένας εξίσου ικανοποιητικός τρόπος παρουσίασης των δεδομένων). Ως δομή έκφρασης/συνάρτησης (expression structure) επιλέγεται η πιο απλή $Y = \sum(a_i * f(X_1 * X_2)) + a_0$, δεν επιλέγεται εσωτερική συνάρτηση, ο τύπος μοντελοποίησης είναι η κατηγοριοποίηση, οι όροι $[n_a \ n_b \ n_k]$ χρησιμοποιούνται σε άλλα είδη προσομοίωσης και για αυτό μηδενίζονται καθώς και επιλέγεται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου να παραμείνουν ως έχουν χωρίς να αλλάξει η κλίμακά τους (scale input: 0 0, scale output: 0-0). Ως μέγιστος αριθμός όρων στα πολυώνυμα/στις συναρτήσεις που προκύπτουν, m επιλέγεται αρχικά ο αριθμός 6 γιατί θεωρείται ικανός αριθμός για την έκφραση των τεσσάρων μεταβλητών και αποεπιλέγεται το bias (a_0). Αναφορικά με τους εκθέτες (exponents), αποτελούν τον πίνακα των αγνώστων εκθετών, που κωδικοποιούνται ως ακέραιοι αριθμοί στο MOGA-XL και αντιπροσωπεύουν τους αύξοντες αριθμούς των προαιρετικών τιμών των εκθετών, που

τις ορίζει ο χρήστης. Ακόμα, οι τιμές των εκθετών πρέπει να είναι διακριτές και να περιέχουν την μηδενική τιμή, πράγμα το οποίο μηδενίζει την τιμή $ES_{(j,k)}$ και συνεπώς ορίζεται ίση με τη μονάδα η τιμή της k -οστής μεταβλητής εισόδου X_k που βρίσκεται στον j -οστό πολυωνυμικό όρο με αποτέλεσμα η μεταβλητή αυτή να μην συμπεριλαμβάνεται πια στη δομή του μοντέλου. Άρα, η συγκεκριμένη μεταβλητή εισόδου δεν θεωρείται στατιστικά σημαντική για την περιγραφή του συγκεκριμένου φαινομένου (Berardi et al., 2008). Οι τιμές που επιλέχθηκαν αρχικά είναι οι εξής [-2, -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2].

$$Y = a_o + \sum_{j=1}^m a_j f((X_1)^{ES(j,1)} \cdot \dots \cdot (X_k)^{ES(j,k)})$$

i: ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου (X_i)

j: ο αριθμός των άγνωστων σταθερών πολυωνυμικών παραμέτρων του μοντέλου (a_j)

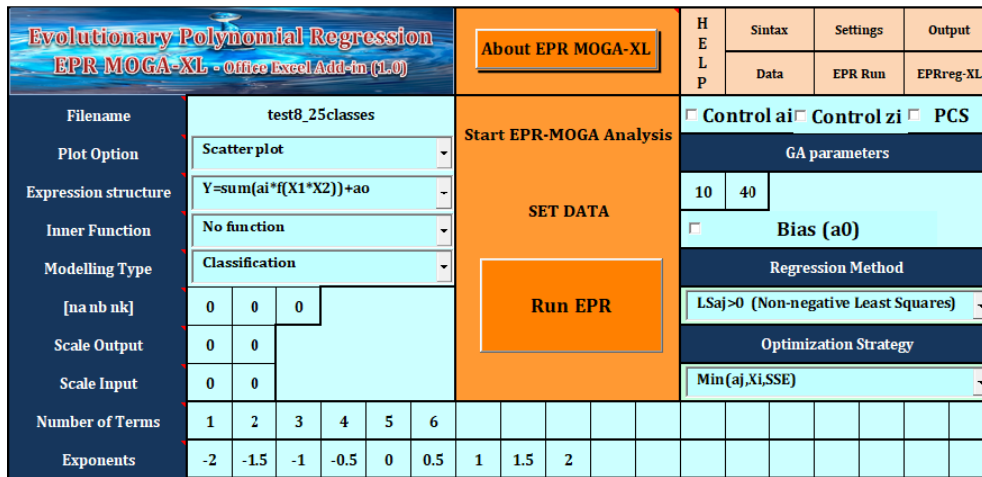
k: ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου στα μοντέλα (X_k)

Στο πεδίο της μεθόδου παλινδρόμησης για την εκτίμηση των σταθερών παραμέτρων a_j , επιλέγεται η μέθοδος των μη αρνητικών ελαχίστων τετραγώνων διότι η εισαγωγή αρνητικών σταθερών παραμέτρων ($a_j < 0$) έχει νόημα μόνο κατά την προσομοίωση μεγάλων συστημάτων, όπου θα χρειάζονται για να ισορροπούν την συγκεκριμένη πραγμάτωση σφαλμάτων που σχετίζονται με το πεπερασμένο σύνολο δεδομένων εκμάθησης (finite training data set) (Giustolisi et al., 2007).

Τέλος, σχετικά με την στρατηγική της βελτιστοποίησης επιλέγεται εκείνη που αφορά στην παράλληλη ελαχιστοποίηση των σταθερών παραμέτρων του μοντέλου a_j , του πλήθους των μεταβλητών εισόδου X_i που συμμετέχουν στην συνάρτηση και του αθροίσματος των τετραγωνικών σφαλμάτων SSE, Sum of Square Errors. Το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων αποτελεί δείκτη ακρίβειας των μοντέλων με στόχο την ελάχιστη τιμή και συνήθως χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση μοντέλων ως προς τη βέλτιστη προσαρμογή των προσομοιωμένων τιμών στις παρατηρημένες (fitness) (Giustolisi & Savic, 2006).

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{computed} - y_{experimental})^2}{N}$$

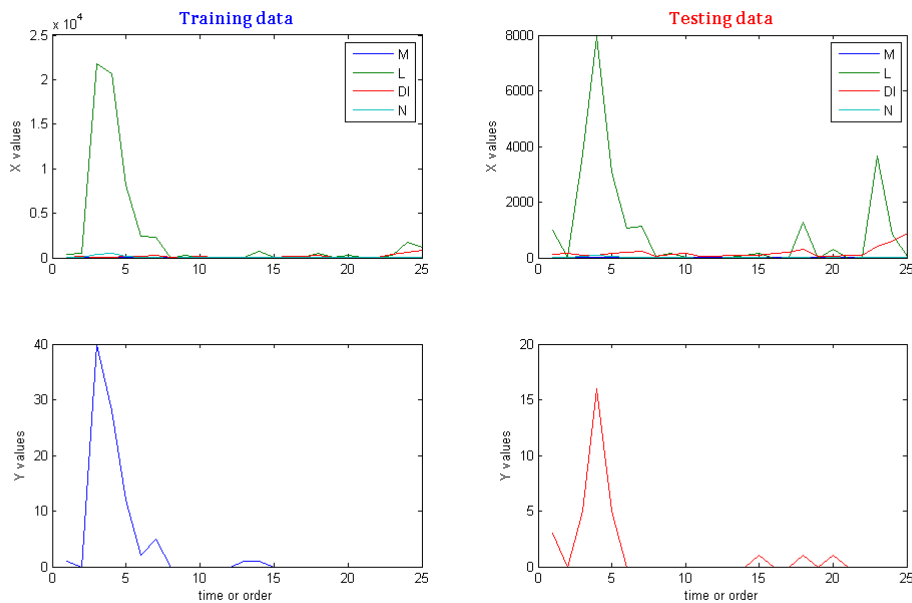
Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του πλήθους των πολυωνυμικών παραμέτρων στο μαθηματικό τύπο και του πλήθους των μεταβλητών εισόδου με παράλληλη μεγιστοποίηση της ακρίβειας. Οι ρυθμίσεις που περιγράφηκαν αναλυτικά παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα στο περιβάλλον του EPR MOGA XL (Εικ. 15).



Εικόνα 15: Ρυθμίσεις του EPR πριν την εκτέλεση (user interface)

4.3 Αποτελέσματα – Συζήτηση

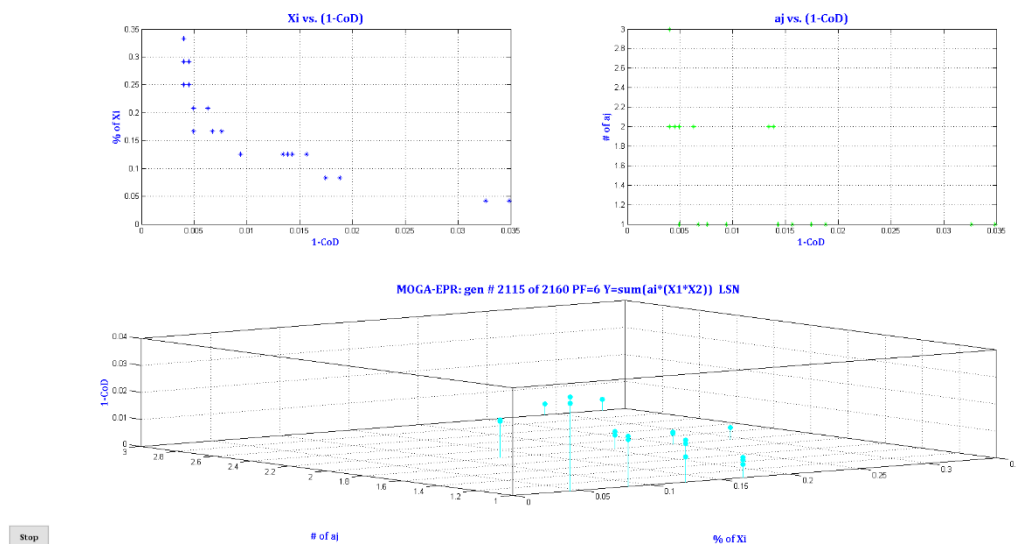
Έχοντας ορίσει κατάλληλα τα δεδομένα (set data) (X, Y – training data, XV, YV – testing data) και έχοντας κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις, το EPR είναι σε θέση για να εκκινηθεί. Εκτελώντας το EPR, αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη διακύμανση των δεδομένων εισόδου (X data) και των δεδομένων εξόδου (Y data) ανά κλάση για το σύνολο δεδομένων εκμάθησης (training data) και για το σύνολο δεδομένων ελέγχου (testing data), αντίστοιχα (Εικ. 16).



Εικόνα 16: Διακύμανση των δεδομένων εισόδου και εξόδου ανά κλάση για το σύνολο εκμάθησης (training data) και για το σύνολο ελέγχου (testing data), αντίστοιχα

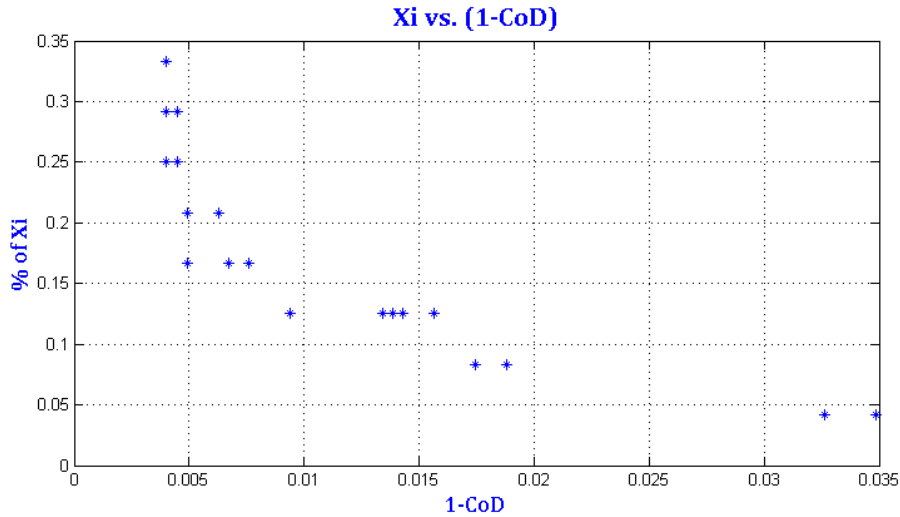
Συνοψίζοντας την όλη διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, αρχικά εκτελείται ο αλγόριθμος OPTIMOGA, όπου παράγονται πολλές γενιές μοντέλων, τα οποία ταξινομούνται ως προς την ακρίβειά τους, τον αριθμό των πολυωνμικών παραμέτρων a_j και τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου X_i , όπου επιλέγεται εκείνη η γενιά μοντέλων με το βέλτιστο κατά Pareto μέτωπο λύσεων για τις παραμέτρους που εξετάζονται (Εικ. 17). Τα μοντέλα της κάθε γενιάς παρουσιάζονται σε μορφή σημείων στα δισδιάστατα διαγράμματα Pareto και σε μορφή στηλών στο τρισδιάστατο διάγραμμα Pareto.

Όπως φαίνεται, η βέλτιστη γενιά μοντέλων, την οποία επέλεξε ο αλγόριθμος, έχει τον αριθμό 2115 από τις 2160 γενιές συνολικά. Επίσης, το πρόγραμμα εξάγει σχετικό βίντεο, στο οποίο φαίνεται η πορεία αναζήτησης εκείνου του χώρου λύσεων που να ικανοποιεί όλες τις παραμέτρους της βελτιστοποίησης, με τα μοντέλα - σημεία να αναπαρίσταται και στα τρία διαγράμματα Pareto.



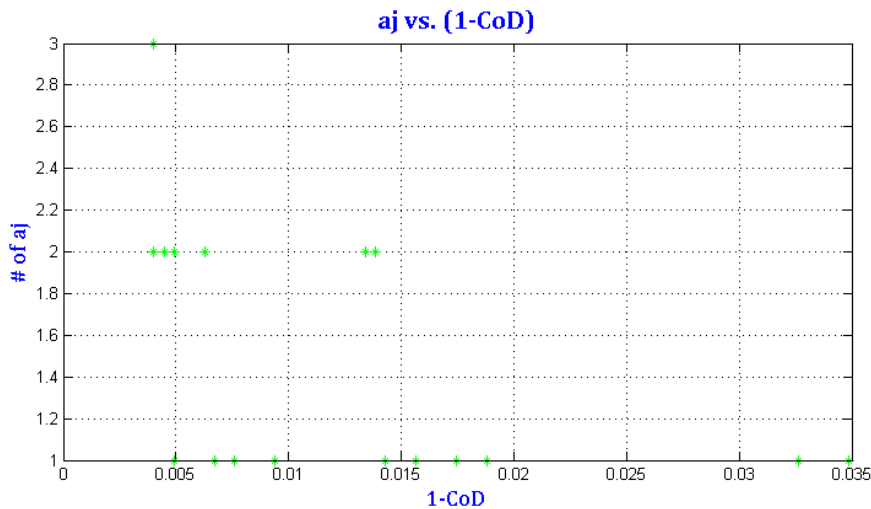
Εικόνα 17: Διαγράμματα Pareto της βέλτιστης γενιάς που επιλέχθηκε από τον αλγόριθμο

Αναλυτικά, ξεκινώντας από το πρώτο διάγραμμα Pareto, απεικονίζεται η σχέση της ακρίβειας (1-CoD) των επιμέρους μοντέλων της βέλτιστης γενιάς με το πλήθος των μεταβλητών εισόδου X_i που χρησιμοποιούνται στο εκάστοτε πολυώνυμο ($\%X_i$) (Εικ. 18).



Εικόνα 18: Διάγραμμα Pareto ακρίβειας - πλήθους μεταβλητών εισόδου X_i των πολωνύμων της βέλτιστης γενιάς

Στο δεύτερο διάγραμμα Pareto απεικονίζεται η σχέση της ακρίβειας (1-CoD) των επιμέρους μοντέλων της βέλτιστης γενιάς με το πλήθος των σταθερών παραμέτρων a_j των πολωνυμικών σχέσεων των μοντέλων αυτών (Εικ. 19) .



Εικόνα 19: Διάγραμμα Pareto ακρίβειας – πλήθους σταθερών πολωνυμικών παραμέτρων a_j των πολωνύμων της βέλτιστης γενιάς

Παράλληλα, δημιουργούνται οι πολωνυμικές σχέσεις των βέλτιστων κατά Pareto μοντέλων που επιλέχθηκαν από τη βέλτιστη γενιά λύσεων, δηλαδή οι συμβολικές εκφράσεις (symbolic expressions) των πολωνύμων (Εικ. 20) με το μέτρο ακρίβειας CoD για την κάθε μία (Πίν. 14). Όπως αναφέρουν οι Giustolisi et al. το 2006, το EPR διενεργά μια πολλαπλών κριτηρίων στρατηγική για να προσδιοριστούν όλα εκείνα τα μοντέλα που απευθύνονται στη βέλτιστη λύση/τομή μεταξύ φειδούς (parsimony) και

προσαρμογής (fitness) του μοντέλου (βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια) (Berardi et al., 2008). Στο τέλος, από αυτό το σετ των συναρτήσεων, επιλέγεται εκείνη η σχέση που λειτουργεί ως βέλτιστη για το φαινόμενο που εξετάζεται. Η διαδικασία επιλογής της κατάλληλης σχέσης περιγράφεται παρακάτω αναλυτικά.

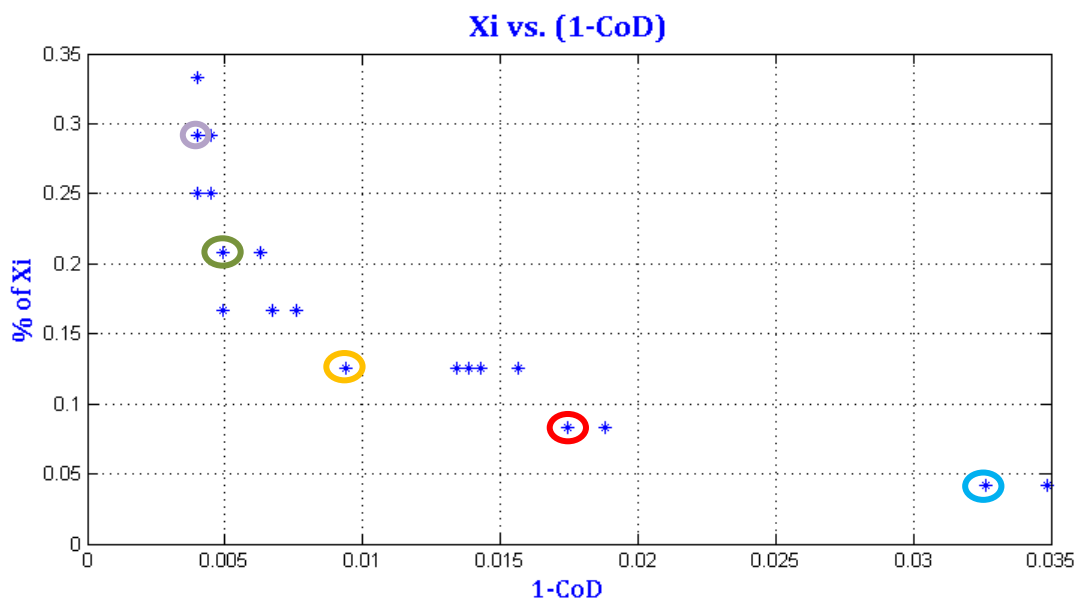
$$\begin{aligned}
 (1) \text{ Brt} &= \text{round}() \\
 (2) \text{ Brt} &= \text{round}(+0.0015887L) \\
 (3) \text{ Brt} &= \text{round}(+0.145 \frac{L}{DI}) \\
 (4) \text{ Brt} &= \text{round}(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}}) \\
 (5) \text{ Brt} &= \text{round}(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}}) \\
 (6) \text{ Brt} &= \text{round}(+0.0091883 \frac{L^2}{M^{1.5}DIN} + 0.001159 \frac{L}{M^{0.5}})
 \end{aligned}$$

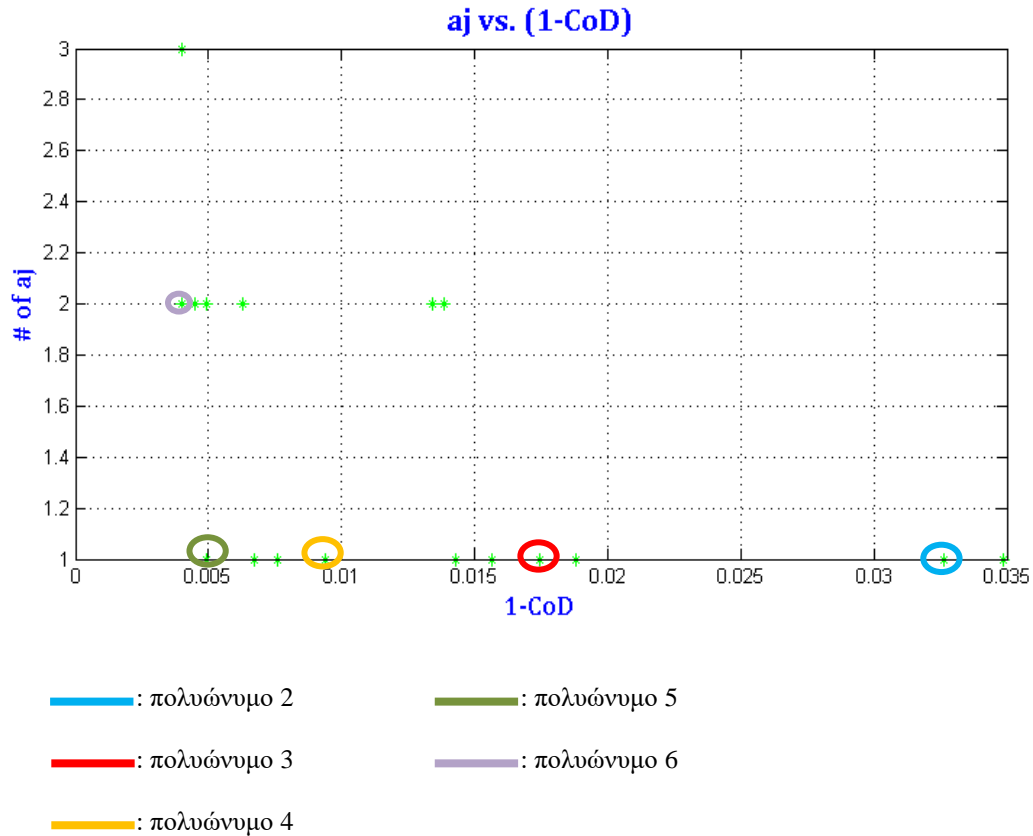
Εικόνα 20: Συμβολικές εκφράσεις πολυωνυμικών σχέσεων που προκύπτουν

Πίνακας 14: Ο συντελεστής ακρίβειας CoD και 1 - CoD για κάθε μία από τις πολυωνυμικές σχέσεις που προέκυψαν

EPR MOGA XL Symbolic expressions	CoD	1 - CoD
(1) $\text{Brt} = \text{round}()$	-0.145	1.145
(2) $\text{Brt} = \text{round}(+0.0015887L)$	0.967	0.033
(3) $\text{Brt} = \text{round}(+0.145 \frac{L}{DI})$	0.983	0.017
(4) $\text{Brt} = \text{round}(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$	0.991	0.009
(5) $\text{Brt} = \text{round}(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$	0.995	0.005
(6) $\text{Brt} = \text{round}(+0.0091883 \frac{L^2}{M^{1.5}DIN} + 0.001159 \frac{L}{M^{0.5}})$	0.996	0.004

Εξετάζοντας τις πολυωνυμικές σχέσεις με τους αριθμούς CoD για την κάθε μία, αντιστοιχίζεται κάθε πολυωνυμική σχέση στο αντίστοιχο σημείο στα παραπάνω διαγράμματα Pareto (Εικ. 21).



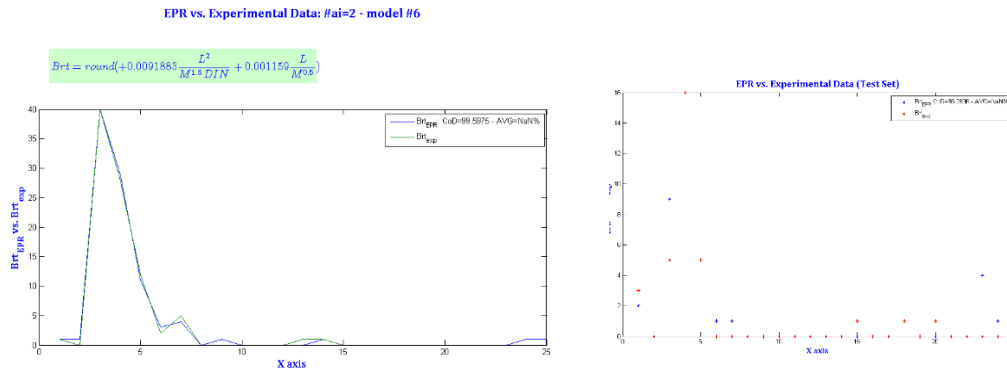


Εικόνα 21: Διαγράμματα Pareto ακρίβειας - πλήθους μεταβλητών εισόδου X_i και ακρίβειας - πλήθους σταθερών πολυωνυμικών παραμέτρων a_j των πολυώνυμων της βέλτιστης γενιάς

Το γεγονός ότι τα μοντέλα (σετ μοντέλων) που προκύπτουν από το MOGA είναι ήδη ταξινομημένα βάσει φειδούς (parsimony) και ακρίβειας (accuracy), καθιστά τα αποτελέσματα του EPR εύκολα ερμηνεύσιμα. Για αυτό το λόγο το συνολικό μέτωπο Pareto δείχνει μια σαφή εικόνα για τη φάση επιλογής των μοντέλων (Giustolisi & Savic, 2009), με τα επιθυμητά μοντέλα να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχή των αξόνων λόγω μικρής τιμής 1-CoD, $\%X_i$ και $\# a_j$. Όπως παρατηρείται, το πολυώνυμο 1 δεν απεικονίζεται στα διαγράμματα Pareto, καθώς η σχέση δεν περιλαμβάνει καμία από τις μεταβλητές (Εικ.) (Πίν.) και θεωρείται εκτός των θεωρητικών επιλογών και για αυτό το λόγο δεν παρουσιάζεται στα αποτελέσματα που ακολουθούν.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διακύμανση των προσομοιωμένων τιμών θραύσεων εφαρμόζοντας τις σχέσεις των μοντέλων σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές. Οι προσομοιωμένες τιμές προκύπτουν από την εφαρμογή του εκάστοτε μοντέλου στα δεδομένα εκμάθησης (training data) και στα δεδομένα ελέγχου (testing data) (Εικ. 22).

Μοντέλο 5



Μοντέλο 6

Εικόνα 22: Διακύμανση των προσομοιωμένων τιμών θραύσεων σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές εφαρμόζοντας τις σχέσεις των μοντέλων στα δεδομένα εκμάθησης (training data) και στα δεδομένα ελέγχου (testing data)

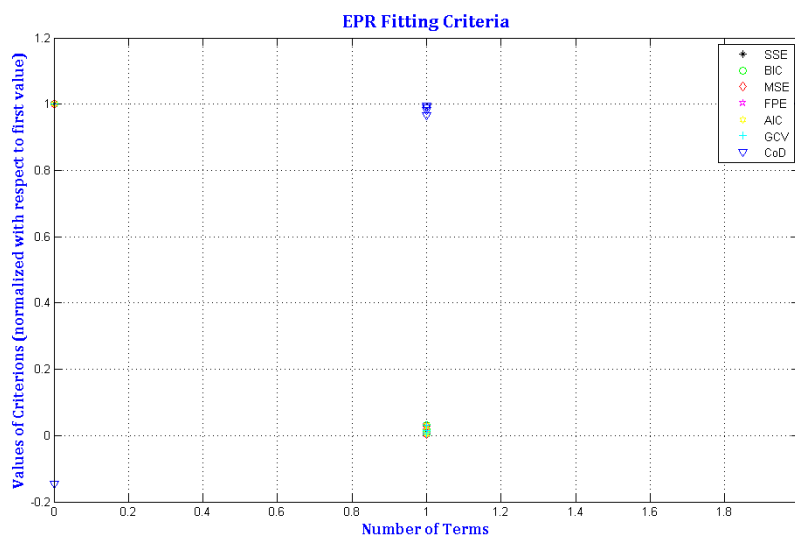
Τα διαγράμματα απεικονίζουν γραφικά την προσαρμογή των μοντέλων στα πρωτογενή δεδομένα των θραύσεων, με τα μοντέλα 3, 4, 5 και 6 να ξεχωρίζουν.

Μέτρο της προσαρμογής ενός μοντέλου στις παρατηρημένες τιμές αποτελεί η ακρίβεια. Από τους διάφορους δείκτες απόδοσης/ακρίβειας που προσφέρει το EPR, αρχικά αναφέρεται ο πιο σημαντικός, ο συντελεστής «προσδιορισμού» Coefficient of Determination, CoD, διότι επιστρέφει τιμές απόδοσης σε απόλυτη τιμή. Όταν η τιμή του CoD είναι μηδενική, για παράδειγμα, τότε η πρόβλεψη αντιστοιχεί στη μέση τιμή των δεδομένων, ενώ όταν ισούται με μονάδα αντιστοιχεί στην τέλεια πρόβλεψη (Giostolici et al., 2007).

$$CoD = 1 - \frac{\#of\ data - 1}{\#of\ data} \frac{\sum_{\#of\ data} (y_{computed} - y_{experimental})^2}{\sum_{\#of\ data} (y_{experimental} - mean(y_{experimental}))^2}$$

(Giostolici et al., 2007)

Επιπλέον ελέγχονται οι ακόλουθοι συντελεστές απόδοσης/ακρίβειας των μοντέλων: Sum of Square Errors SSE (ιδανική τιμή:0), Best Information Criterion BIC (ιδανική τιμή:0), Mean Square Error MSE (ιδανική τιμή:0), Final Prediction Error of Akaike, FPE (ιδανική τιμή:0), Akaike's Information Theoretic, AIC (ιδανική τιμή:0) και Generalized Cross-Validation, GCV (ιδανική τιμή:0). Στο εξαγόμενο από την EPR διάγραμμα και στον Πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών ακρίβειας/απόδοσης του EPR ανά μοντέλο ταξινομημένες βάσει του αριθμού των πολυωνυμικών όρων στην εκάστοτε σχέση (Εικ. 23) (Πίν.). Η κλίμακα του CoD διαφοροποιείται στα αποτελέσματα που εξάγονται, με την τέλεια πρόβλεψη να λαμβάνει την τιμή 100, αντί για 1.



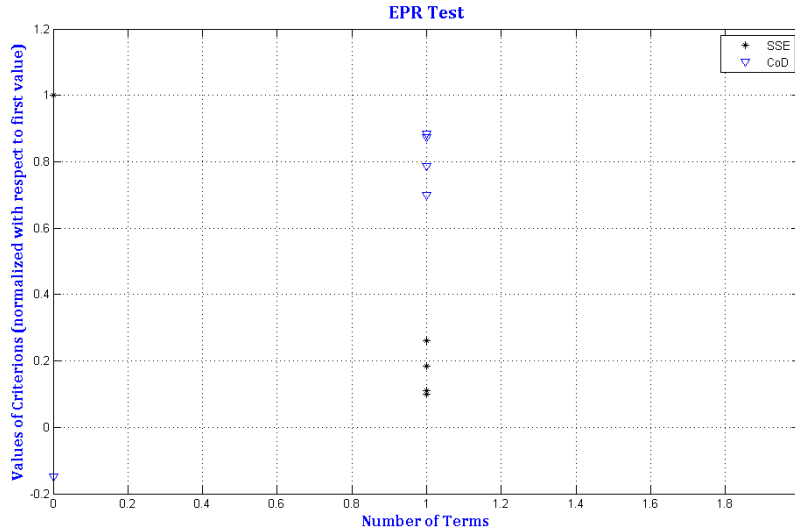
Εικόνα 23: Τιμές των συντελεστών ακρίβειας/απόδοσης του EPR ανά μοντέλο, ανάλογα με τον αριθμό των όρων στην εκάστοτε πολυωνυμική σχέση

Πίνακας 15: Τιμές των συντελεστών ακρίβειας/απόδοσης του EPR ανά μοντέλο

	SSE	BIC	MSE	FPE	AIC	GCV	AVG	CoD	Αριθμός όρων πολυωνύμου
Μοντέλο 1	102.40	102.40	102.40	102.40	102.40	4.10	-	-14.49	1
Μοντέλο 2	2.92	3.30	3.04	3.16	3.15	0.13	-	96.74	1
Μοντέλο 3	1.56	1.76	1.63	1.69	1.68	0.07	-	98.26	1
Μοντέλο 4	0.84	0.95	0.88	0.91	0.91	0.04	-	99.06	1
Μοντέλο 5	0.44	0.50	0.46	0.48	0.48	0.02	-	99.51	1
Μοντέλο 6	0.36	0.45	0.39	0.42	0.42	0.02	-	99.60	2

Γνωρίζοντας τις τιμές των συντελεστών ακρίβειας/απόδοσης για κάθε μοντέλο και σε συνδυασμό με τις γραφικές παραστάσεις, συμπεραίνεται ότι τα μοντέλα 4, 5 και 6 ξεχωρίζουν με τις καλύτερες τιμές και συγκεκριμένα το μοντέλο 6 πετυχαίνει την καλύτερη απόδοση. Ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην σύγκριση των μοντέλων 5 και 6, των οποίων οι τιμές των συντελεστών δεν διαφέρουν έντονα, με τη διαφορά ότι το μοντέλο 6 έχει έναν επιπλέον όρο στο πολυώνυμο συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα. Ακόμα, αρκετά παρόμοιες τιμές συντελεστών έχουν τα μοντέλα 4 και 5· το μοντέλο 3 ακολουθεί και το μοντέλο 2 εμφανίζει την μεγαλύτερη διαφοροποίηση από όλα τα υπόλοιπα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μοντέλο 1 δεν λαμβάνεται υπόψη, δεδομένου ότι δεν περιλαμβάνεται καμία μεταβλητή στην πολυωνυμική σχέση.

Ακόμα, εξετάζονται οι συντελεστές ακρίβειας/απόδοσης SSE και CoD των μοντέλων με χρήση των δεδομένων ελέγχου (testing data), όπου και απεικονίζονται γραφικά στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικ. 24).



Εικόνα 24: Τιμές των συντελεστών απόδοσης SSE και CoD ανά μοντέλο, ανάλογα με τον αριθμό των όρων στην εκάστοτε πολυωνυμική σχέση εφαρμόζοντας το σύνολο δεδομένων ελέγχου (testing data)

Συνεπώς, εφόσον εξετάζεται η προσαρμογή των προσομοιωμένων τιμών στις παρατηρημένες (fitness), είναι αναγκαία η ταυτόχρονη εξέταση των τιμών του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των σχέσεων στα δεδομένα εκμάθησης και στα δεδομένα ελέγχου (Πίν. 16).

Πίνακας 16: Τιμές του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης και ελέγχου στις πολυωνυμικές σχέσεις που εξετάζονται

EPR MOGA XL Symbolic expressions	CoD (training data)	CoD (testing data)
(2) $Brt = round(+0.0015887L)$	96.74	78.70
(3) $Brt = round(+0.145 \frac{L}{DI})$	98.26	88.45
(4) $Brt = round(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$	99.06	70.04
(5) $Brt = round(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$	99.51	87.37
(6) $Brt = round(+0.0091883 \frac{L^2}{M^{1.5}DIN} + 0.001159 \frac{L}{M^{0.5}})$	99.60	86.28

Είναι εμφανές ότι οι τιμές του συντελεστή CoD είναι ιδιαίτερα υψηλές σε όλα τα μοντέλα με εξαίρεση το μοντέλο 1, που θεωρείται εκτός επιλογών. Παρατηρείται ότι τα μοντέλα 3, 5 και 6 έχουν εξαιρετικές τιμές απόδοσης, >98 κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης (training data) και ικανοποιητικές τιμές >87 για τα δεδομένα ελέγχου (testing data).

Στόχος είναι να επιτευχθεί προσαρμογή (fitness) των προσομοιωμένων τιμών των μοντέλων στις παρατηρημένες και παράλληλα επιλογή του πολυωνύμου με την όσο το δυνατόν λιγότερο πολύπλοκη δομή (parsimony). Η απλότητα του μοντέλου επιθυμείται βάση της θεωρίας του Ocham's Razor. Για αυτό το λόγο παρουσιάζεται ένας

συγκεντρωτικός πίνακας με όλες τις παραμέτρους που εξετάζονται για κάθε ένα μοντέλο (Πίν. 17).

Πίνακας 17: Τιμές του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης και ελέγχου, πλήθος όρων και πλήθος μεταβλητών στις πολυωνυμικές σχέσεις

EPR MOGA XL Symbolic expressions	CoD (training data)	CoD (testing data)	Πλήθος όρων α_j	Πλήθος μεταβλητών X_i
(2) $Brt = round(+0.0015887L)$	96.74	78.70	1	1
(3) $Brt = round(+0.145 \frac{L}{DI})$	98.26	88.45	1	2
(4) $Brt = round(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$	99.06	70.04	1	3
(5) $Brt = round(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$	99.51	87.37	1	4
(6) $Brt = round(+0.0091883 \frac{L^2}{M^{1.5}DIN} + 0.001159 \frac{L}{M^{0.5}})$	99.60	86.28	2	6

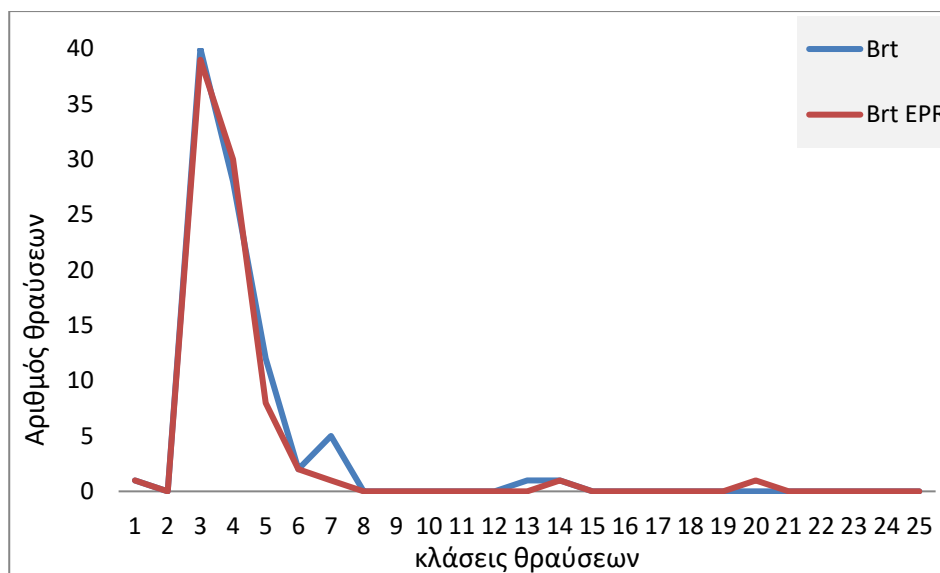
Από την μελέτη των τιμών για κάθε παράμετρο, παρατηρείται ότι βάσει ακρίβειας τα μοντέλα που επιτυγχάνουν μεγαλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα εκμάθησης και ελέγχου είναι τα μοντέλα 5, 3 και 6, από τα οποία ξεχωρίζει το μοντέλο 3 ως το πιο φειδωλό .

Ακόμα, παρατηρείται ότι το μήκος έχει θετική εξάρτηση σε σχέση με τις θραύσεις και υπάρχει σε όλα τα μοντέλα ανεξαρτήτως, ενώ η εξωτερική διάμετρος μαζί με το υλικό κατασκευής έχουν αρνητική εξάρτηση, πράγμα που σημαίνει συνέπεια των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων ως προς το φυσικό-ενοσιολογικό τους υπόβαθρο. Ακόμα, παρατηρείται όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές εμπεριέχονται μόνο στις σχέσεις των δύο τελευταίων μοντέλων. Επίσης, σημειώνεται ότι ενώ το μοντέλο 2 περιγράφει τη διακύμανση των θραύσεων στις κλάσεις με ποσοστό ακρίβειας 96.74% στο σύνολο εκμάθησης και 78.70 στο σύνολο ελέγχου, το μοντέλο 3 παρουσιάζει βελτίωση εισάγοντας την μεταβλητή της εξωτερικής διαμέτρου, αφού παρουσιάζει ποσοστό ακρίβειας 98.26% στο σύνολο εκμάθησης και 88.45% στο σύνολο ελέγχου, αντίστοιχα. Η εισαγωγή επιπρόσθετων μεταβλητών και δεύτερου όρου στις πολυωνυμικές σχέσεις δεν βελτιώνει ιδιαίτερα την ακρίβεια των μοντέλων.

Το μοντέλο 3 επιλέγεται ως βέλτιστο από το σύνολο των μοντέλων που παράχθηκαν, καθώς χρησιμοποιώντας μόλις δύο μεταβλητές από τις τέσσερις και έναν όρο στο πολώνυμο, είναι δυνατό να περιγραφεί το φαινόμενο με μεγάλη ακρίβεια απόδοσης τόσο στα δεδομένα εκμάθησης όσο και στα δεδομένα ελέγχου. Άρα, καλύπτει τόσο τα κριτήρια ακρίβειας απόδοσης των προσομοιωμένων τιμών στις παρατηρημένες, όσο και τα κριτήρια φειδούς της πολυωνυμικής σχέσης με ελάχιστη αύξηση στην πολυπλοκότητα του μοντέλου. Γενικά, η χρήση μοντέλων φειδωλών σε παραμέτρους περιορίζει την αβεβαιότητα και συνεπάγεται πιο ευσταθή και πιο αξιόπιστα μαθηματικά σχήματα (Μακρόπουλος & Ευστρατιάδης, 2011). Όλα τα παραπάνω αποτελούν χαρακτηριστικά γνωρίσματα μια εύρωστης λύσης (robust solution) (Μακρόπουλος, 2017) (Μακρόπουλος & Ευστρατιάδης, 2011). Τέλος, θεωρείται αναγκαίο να ενσωματωθεί η μηχανική κατά την επιλογή των μοντέλων επιλέγοντας

ένα μοντέλο που να έχει φυσική σημασία αλλά και να είναι απλό, εξίσου το μοντέλο 3 τα επαληθεύει.

Παρακάτω φαίνεται η διακύμανση των προσομοιωμένων τιμών του μοντέλου 3 σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές θραύσεων για κάθε κλάση αγωγών (Εικ. 25).



Εικόνα 25: Διακύμανση παρατηρημένων (Brt) και προσομοιωμένων (Brt EPR) τιμών θραύσεων για κάθε κλάση αγωγών βάσει του μοντέλου 3

Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι προσομοιωμένες τιμές και με μπλε χρώμα οι παρατηρημένες τιμές των θραύσεων. Αν και κατά το πλείστον οι προσομοιωμένες τιμές ακολουθούν τις παρατηρημένες, φαίνεται ότι για τις κλάσεις 7, 13 και 20 δεν κατάφερε το μοντέλο να προσομοιώσει τις θραύσεις, όπως παρατηρείται στις τιμές που αναγράφονται αναλυτικά για κάθε κλάση στον Πίνακα 18.

Η τιμή της τρωτότητας/επικινδυνότητας θραύσης για κάθε κλάση εκτιμάται βάσει της εξίσωσης που ακολουθεί, όπου οι τιμές κανονικοποιούνται σε κλίμακα από 0 έως 1. Το εύρος της κλίμακας είναι [a, b], δηλαδή [0, 1] στην προκειμένη περίπτωση και η μέγιστη και ελάχιστη τιμή είναι $\max(x) = 39$ και $\min(x) = 0$.

$$x_{\text{normalized}} = (b - a) * \frac{(x - \min(x))}{(\max(x) - \min(x))} + a \quad (1)$$

Οι τιμές της τρωτότητας που προκύπτουν, παρουσιάζονται στον Πίνακα παρακάτω (Πίν. 18).

Πίνακας 18: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές θραύσεων (μοντέλο 3) και τιμή τρωτότητας/επικινδυνότητας θραύσης ανά κλάση αγωγών

κλάση	υλικό κατασκευής, M	εξωτερική διάμετρος, DI	N	Brt	Brt EPR	τιμή τρωτότητας (vulnerability score)
-------	---------------------	-------------------------	---	-----	---------	---------------------------------------

1	P.V.C.	110	34	1	1	0.026
2	P.V.C.	160	6	0	0	0.026
3	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	80	462	40	39	1.000
4	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	100	618	28	30	0.769
5	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	150	204	12	8	0.231
6	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	200	51	2	2	0.051
7	ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟ	250	30	5	1	0.051
8	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	63	4	0	0	0.000
9	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	110	27	0	0	0.000
10	ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ MRS100	160	4	0	0	0.000
11	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	50.8	7	0	0	0.000
12	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	63.5	5	0	0	0.000
13	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	76.2	7	1	0	0.000
14	ΧΑΛΥΒΑΣ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	101.6	70	1	1	0.026
15	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	100	26	0	0	0.000
16	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	150	3	0	0	0.000
17	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	200	4	0	0	0.000
18	ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΡΑΦΗΣ	300	26	0	0	0.000
19	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	50	2	0	0	0.000
20	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	70	11	0	1	0.026
21	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	80	1	0	0	0.000
22	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	100	2	0	0	0.000
23	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	400	20	0	0	0.000
24	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	600	8	0	0	0.051
25	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ ΦΑΙΟΣ	900	5	0	0	0.026
ΑΘΡΟΙΣΜΑ				90	83	
Α						

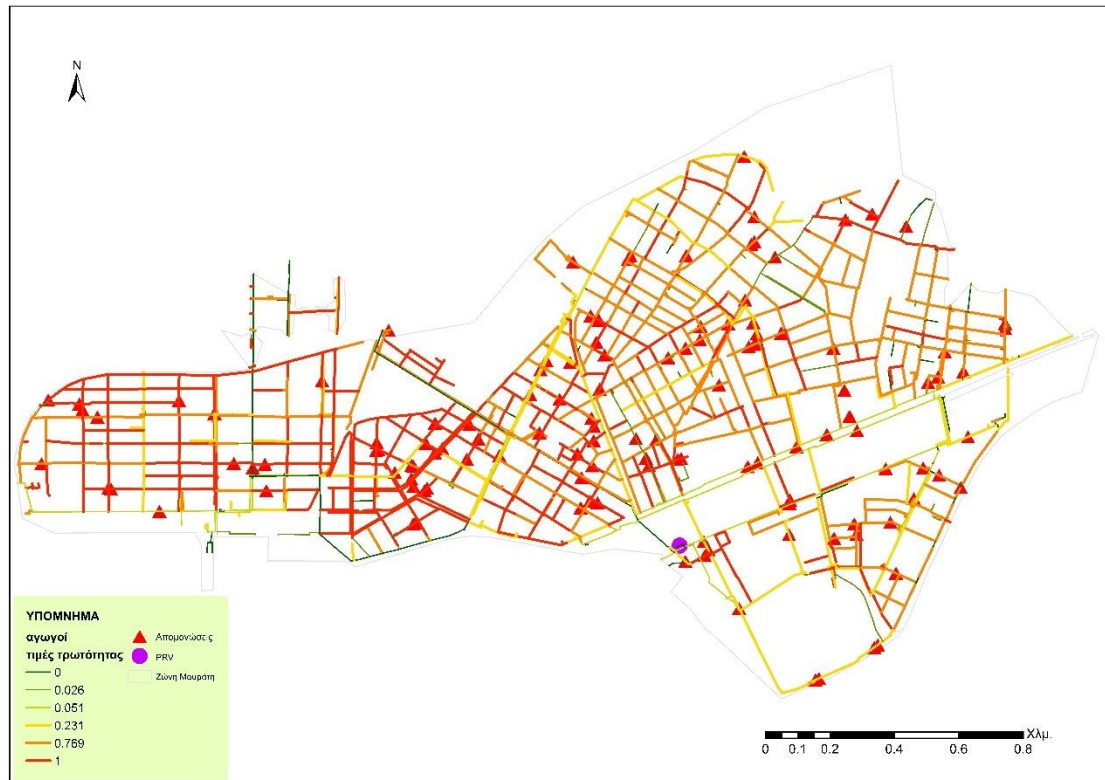
Συμπεραίνεται ότι ενώ το άθροισμα των καταγεγραμμένων θραύσεων είναι 90, το άθροισμα των προσομοιωμένων θραύσεων με το μοντέλο 3 είναι μόλις 83, γεγονός που επαληθεύει ότι το μοντέλο 3 υποεκτιμά τις παρατηρημένες θραύσεις. Οι περιπτώσεις που το μοντέλο δεν κατάφερε να εκτιμήσει ορθά τις παρατηρημένες τιμές αφορούν στις κλάσεις 3, 5, 7 και 13 και μόνο για την κλάση 4 υπερεκτιμούνται οι τιμές κατά την προσομοίωση, κάτι που φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα μεταβολής των παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών των θραύσεων.

Τέλος, οι τιμές της τρωτότητας για κάθε αγωγό απεικονίζονται σε αντίστοιχες κλάσεις στον παρακάτω χάρτη (Εικ. 26) & Παράρτημα Χαρτών (Χάρτης 1). Οι κλάσεις έχουν προκύψει βάσει των μοναδικών τιμών (unique values) που παρατηρούνται στο δείγμα και είναι οι εξής έξι τιμές: 0, 0.026, 0.051, 0.231, 0.769 και 1.



Εικόνα 26: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων αγωγών βάσει της τιμής τρωτότητας (*leakage vulnerability map*)

Συμπληρωματικά, προστίθενται και οι απομονώσεις στους αγωγούς λόγω θραύσης, που είναι καταγεγραμμένες για την τετραετία που μελετάται (Εικ. 27) & Παράρτημα Χαρτών (Χάρτης 2).



Εικόνα 27: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων αγωγών βάσει της τιμής τρωτότητας σε συνδυασμό με τις καταγεγραμμένες θραύσεις

Αξιοσημείωτο είναι ότι οι αγωγοί με τιμή τρωτότητας ίση με μονάδα, που ανήκουν στην υψηλότερη κλάση δηλαδή και συμβολίζονται με κόκκινο χρώμα, συμπίπτουν κατά πλειοψηφία με τις απομονώσεις που έγιναν κατά την τετραετία που μελετάται. Αυτή η οπτική σύγκριση λειτουργεί και ως επαλήθευση για το μοντέλο εκτίμησης των θραύσεων που επιλέχθηκε παραπάνω, το οποίο φαίνεται να «πιάνει» σχεδόν όλες τις καταγεγραμμένες θραύσεις για το σύνολο αγωγών στη Ζώνη.

Στο σημείο αυτό παρατίθενται κάποιες από τις εκτελέσεις του EPR μεταβάλλοντας μέρος των ρυθμίσεων. Αρχικά, εκτελείται το EPR αλλάζοντας τις τιμές των εκθετών από $[-2, -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2]$ σε $[-2, -1, 0, 1, 2]$. Ο Πίνακας με τις τιμές του συντελεστή ακρίβειας, το πλήθος των όρων και των μεταβλητών για κάθε πολυωνυμική σχέση που προκύπτει μετά την σχετική βελτιστοποίηση του EPR για την περίπτωση αυτή παρουσιάζονται στον Πίνακα (Πίν. 19) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αρχικής εκτέλεσης που περιγράφηκε ανωτέρω (Πίν. 20) (Εικ. 25).

Πίνακας 19: Τιμές του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης και ελέγχου, πλήθος όρων και πλήθος μεταβλητών στις πολυωνυμικές σχέσεις (TEAIKA)

EPR MOGA XL Symbolic expressions	CoD (training data)	CoD (testing data)	Πλήθος όρων α_j	Πλήθος μεταβλητών X_i
$(2)Brt = round(+0.0015887L)$	96.74	78.7	1	1

(3) $Brt = \text{round}(+0.145 \frac{L}{DI})$	98.26	88.45	1	2
(4) $Brt = \text{round}(+5.8752 \frac{L}{DI^2} + 0.00087291L)$	98.61	85.21	2	3
(5) $Brt = \text{round}(+0.00098359L + 0.10284 \frac{L^2}{DI^2N})$	99.15	86.28	2	4
(6) $Brt = \text{round}(+0.0030041 \frac{L}{M} + 0.10025 \frac{L^2}{DI^2N})$	99.33	89.89	2	5
(7) $Brt = \text{round}(+0.002015 \frac{L}{M} + 0.0052918 \frac{L^2}{MDIN})$	99.55	86.28	2	6
(8) $Brt = \text{round}(+0.001865 \frac{L}{M} + 0.0054827 \frac{L^2}{MDIN} + 3.725e - 006 \frac{DI^2N^2}{L})$	99.60	85.92	3	9

Πίνακας 20: Τιμές του συντελεστή ακρίβειας CoD κατά την εφαρμογή των δεδομένων εκμάθησης και ελέγχου, πλήθος όρων και πλήθος μεταβλητών στις πολωνυμικές σχέσεις (APXΙΚΑ)

EPR MOGA XL Symbolic expressions	CoD (training data)	CoD (testing data)	Πλήθος όρων α_j	Πλήθος μεταβλητών X_i
(2) $Brt = \text{round}(+0.0015887L)$	96.74	78.70	1	1
(3) $Brt = \text{round}(+0.145 \frac{L}{DI})$	98.26	88.45	1	2
(4) $Brt = \text{round}(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$	99.06	70.04	1	3
(5) $Brt = \text{round}(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$	99.51	87.37	1	4
(6) $Brt = \text{round}(+0.0091883 \frac{L^2}{M^{1.5}DIN} + 0.001159 \frac{L}{M^{0.5}})$	99.60	86.28	2	6

(1) $Brt = \text{round}()$	(1) $Brt = \text{round}()$
(2) $Brt = \text{round}(+0.0015887L)$	(2) $Brt = \text{round}(+0.0015887L)$
(3) $Brt = \text{round}(+0.145 \frac{L}{DI})$	(3) $Brt = \text{round}(+0.145 \frac{L}{DI})$
(4) $Brt = \text{round}(+5.8752 \frac{L}{DI^2} + 0.00087291L)$	(4) $Brt = \text{round}(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$
(5) $Brt = \text{round}(+0.00098359L + 0.10284 \frac{L^2}{DI^2N})$	(5) $Brt = \text{round}(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$
(6) $Brt = \text{round}(+0.0030041 \frac{L}{M} + 0.10025 \frac{L^2}{DI^2N})$	(6) $Brt = \text{round}(+0.0091883 \frac{L^2}{M^{1.5}DIN} + 0.001159 \frac{L}{M^{0.5}})$
(7) $Brt = \text{round}(+0.002015 \frac{L}{M} + 0.0052918 \frac{L^2}{MDIN})$	
(8) $Brt = \text{round}(+0.001865 \frac{L}{M} + 0.0054827 \frac{L^2}{MDIN} + 3.7253e - 006 \frac{DI^2N^2}{L})$	

Εικόνα 28: Συμβολικές εκφράσεις πολωνυμικών σχέσεων που προκύπτουν μετά την μεταβολή των τιμών των εκθετών (αριστερά) σε σχέση με τις αρχικές τιμές εκθετών (δεξιά)

Παρατηρείται ότι τα μοντέλα 1, 2 και 3 είναι κοινά και στις δύο εκτελέσεις. Εξετάζονται συνεπώς τα υπόλοιπα πέντε μοντέλα, τα οποία έχουν όλα περισσότερους από έναν όρους σε σύγκριση με τα τρία πρώτα, όπως και συμμετέχουν σαφώς περισσότερες μεταβλητές στις εξισώσεις. Αναλυτικά, τα μοντέλα 4, 5, 6 και 7 έχουν δύο όρους και το 8^ο έχει τρεις όρους και αυτό σε συνδυασμό με το μεγάλο αριθμό

μεταβλητών που συμμετέχουν στο μοντέλο, δεν μπορούν να συμμετέχουν στη διαδικασία επιλογής του βέλτιστου λόγω ανυπαρξίας φειδωλότητας. Άρα, καταλήγουμε για ακόμα μία φορά στο 3^ο μοντέλο για τους λόγους που ξεχωρίζει και στην αρχική ανάλυση.

Επιπλέον, εκτελείται το EPR μεταβάλλοντας τις τιμές του μέγιστου αριθμού όρων, m σε σχέση με την αρχική τιμή m=6, κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες ρυθμίσεις. Συγκεκριμένα, επιλέγονται οι τιμές m=3, m=4, m=8 και παρακάτω παρατίθενται τα πολώνυμα που προκύπτουν (Εικ. 29).

m=6	m=3
<p>(1) $Brt = round()$</p> <p>(2) $Brt = round(+0.0015887L)$</p> <p>(3) $Brt = round(+0.145 \frac{L}{DI})$</p> <p>(4) $Brt = round(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$</p> <p>(5) $Brt = round(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$</p> <p>(6) $Brt = round(+0.0091883 \frac{L^2}{M^{1.5}DIN} + 0.001159 \frac{L}{M^{0.5}})$</p>	<p>(1) $Brt = round()$</p> <p>(2) $Brt = round(+0.0015887L)$</p> <p>(3) $Brt = round(+0.145 \frac{L}{DI})$</p> <p>(4) $Brt = round(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$</p> <p>(5) $Brt = round(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$</p> <p>(6) $Brt = round(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}} + 29.3426 \frac{MN^{0.5}}{DI^2})$</p>
m=4	m=8
<p>(1) $Brt = round()$</p> <p>(2) $Brt = round(+0.0015887L)$</p> <p>(3) $Brt = round(+0.145 \frac{L}{DI})$</p> <p>(4) $Brt = round(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$</p> <p>(5) $Brt = round(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$</p> <p>(6) $Brt = round(+0.0065499 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}} + 36.5135 \frac{L^{0.5}}{DI^2})$</p>	<p>(1) $Brt = round()$</p> <p>(2) $Brt = round(+0.0015887L)$</p> <p>(3) $Brt = round(+0.145 \frac{L}{DI})$</p> <p>(4) $Brt = round(+0.0022206 \frac{L^{1.5}}{DI^{0.5}N^{0.5}})$</p> <p>(5) $Brt = round(+0.0066824 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}})$</p> <p>(6) $Brt = round(+0.0065499 \frac{L^{1.5}}{MDI^{0.5}N^{0.5}} + 36.5135 \frac{L^{0.5}}{DI^2})$</p>

Εικόνα 29: Συμβολικές εκφράσεις πολωνυμικών σχέσεων που προκύπτουν για m=6 (ΑΡΧΙΚΑ), m=3, m=4 και m=8

Παρατηρείται ότι η συγκεκριμένη πολωνυμική σχέση (3) προκύπτει σε όλες τις εκτελέσεις του EPR με ικανοποιητική αναπαραγωγή των παρατηρημένων αποκρίσεων κάτω από διαφορετικές συνθήκες φορτίσεων και συνεπώς αποδεικνύεται και με την σύγκριση αυτήν η ευρωστία της λύσης που επιλέγεται (Μακρόπουλος, 2017).

5 Εκτίμηση κρισιμότητας (criticality) αγωγών

Εκτός από την τρωτότητα/επικινδυνότητα θραύσης (vulnerability) που προέκυψε για κάθε αγωγό, η ανάλυση προχωρά και εξετάζεται επιπλέον η σημαντικότητα/κρισιμότητα (criticality) του κάθε αγωγού. Αυτή η παράμετρος λειτουργεί συνδυαστικά με την τρωτότητα, με σκοπό την ιεράρχηση της αντικατάστασης των "επικίνδυνων" αγωγών.

Στη βιβλιογραφία, ο όρος κρισιμότητα μπορεί να απαντηθεί ως τρωτότητα (vulnerability) ή ανθεκτικότητα (resilience) ή κρισιμότητα (criticality). Στην εργασία αυτή, έχει επιλεγθεί να αναφέρεται ως κρισιμότητα (criticality), διότι πρόκειται για έναν όρο που δεν εμπλέκεται με την τρωτότητα που εκτιμήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά αναφέρεται αποκλειστικά στην εκτίμηση των συνεπειών από τη θραύση ενός στοιχείου του συστήματος (Lippai and Wright, 2005).

Συνοπτικά λοιπόν, εκτιμάται ο βαθμός εξάρτησης του αγωγού σε σχέση με την τροφοδοσία των υπόλοιπων συνδεδεμένων κόμβων, βάσει τοπολογικού μέτρου, που προκύπτει από τη θεωρία των γράφων και ειδικότερα εκτιμάται η σημαντικότητα του κάθε αγωγού σε σχέση με το πλήθος των τροφοδοτούμενων από αυτόν κόμβων (ιδιότητα του σημείου) και όχι η απόδοση του συστήματος συνολικά.

5.1 Θεωρία γράφων - Προεπεξεργασία δεδομένων

Το δίκτυο που δόθηκε από την ΕΥΔΑΠ ΑΕ, δεν διαχωρίζει τους αγωγούς σε επιμέρους τμήματα όπου υπάρχουν διάφορων ειδών φρεάτια, στις τομές τους δικτύου, κ.ά., γεγονός που καθιστά τα δεδομένα μη ορθά για την εισαγωγή τους σε γράφο.

Άρα, επιτυγχάνεται αρχικά διαχωρισμός των αγωγών στα κατάλληλα σημεία και δημιουργία νέων σημείων στα άκρα τους, επεξεργάζοντας τους αγωγούς που δόθηκαν και εφαρμόζοντας διάφορες εντολές μέσω του προγράμματος ArcGIS. Τα σημεία αυτά καλούνται κόμβοι (nodes ή vertices) και αποτελούν συμβολή αγωγών, δικλείδες, φρεάτια, ιδιωτικές συνδέσεις, δεξαμενές κ.ά. καθώς και τα τμήματα των αγωγών που συνδέονται με κόμβους καλούνται συνδέσεις ή ακμές (edges ή links) (Herrera et al., 2015).

Ως γράφος ορίζεται η μαθηματική αφαίρεση που είναι χρήσιμη κατά την επίλυση πολλών ειδών προβλημάτων. Βασικά, ένας γράφος αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων και ένα σύνολο συνδέσεων, όπου μία σύνδεση είναι κάτι το οποίο ενώνει δύο κόμβους στον γράφο. Ο γράφος είναι ένα ζευγάρι (V,E) , όπου V είναι ένα πεπερασμένο σύνολο και E μία δυαδική σχέση στο V . Το V ονομάζεται ένα σύνολο διανυσμάτων, τα στοιχεία του οποίου καλούνται κόμβοι. Το E αποτελεί μία συλλογή ακμών (edges), όπου κάθε ακμή ή σύνδεση είναι ένα ζεύγος (u,v) , τα οποία ανήκουν στο V . Άρα, ο

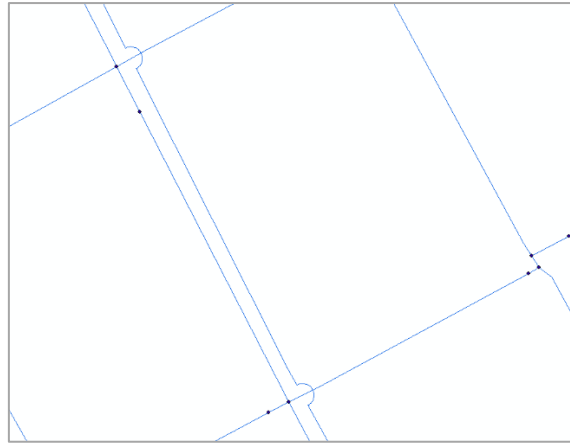
γράφος $G=(V, E)$ αποτελεί μια συλλογή V κόμβων συνδεδεμένων με E συνδέσεις (Sadavare and Kulkarni, 2012). Το πλήθος των κόμβων σε ένα γράφο καθορίζει την τάξη του, n , ενώ το πλήθος των συνδέσεων (links/edges) καθορίζει το μέγεθός του, m , όπως ορίζουν οι Diestel και Bollobás στους Dueñas -Osorio et al. το 2007. Ακόμα ένας βασικός όρος των γράφων είναι η έννοια της διαδρομής (path) από τον κόμβο i στον κόμβο j , που είναι μια ακολουθία ξεχωριστών γειτονικών κόμβων. Η πιο σύντομη διαδρομή (shortest path) μεταξύ των κόμβων i και j είναι εκείνη που σχετίζεται με την πιο σύντομη λίστα γειτονικών κόμβων από τον κόμβο i στο j και συνήθως καλείται απλά απόσταση (distance), $d(i,j)$ (Soldi et al., 2015).

Οι γράφοι διακρίνονται σε *χωρίς κατεύθυνση* και σε αυτούς *με κατεύθυνση*. Ένας γράφος χωρίς κατεύθυνση (undirected graph) είναι εκείνος ο γράφος, του οποίου κάθε σύνδεση συμβολίζει μη διατεταγμένη, αμφίδρομη σχέση μεταξύ δύο κόμβων. Τέτοιες συνδέσεις αποδίδονται ως απλές γραμμές ή καμπύλες και δείχνουν μια αμφίδρομη σχέση, καθώς κάθε σύνδεση μπορεί να διασχίζεται και από τις δύο κατευθύνσεις.

Από την άλλη, ένας γράφος με κατεύθυνση (directed graph ή digraph), είναι εκείνος ο γράφος, που κάθε σύνδεσή του συμβολίζει μία διατεταγμένη (ordered), μη αμφίδρομη προς μία ορισμένη κατεύθυνση σχέση μεταξύ δύο κόμβων. Τέτοιες συνδέσεις αποδίδονται με βέλος κατεύθυνσης στο τέλος της γραμμής ή της καμπύλης (Sadavare and Kulkarni, 2012).

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί γράφος χωρίς κατεύθυνση (undirected graph), διότι εφόσον δεν χρησιμοποιούνται καταναλώσεις και ζητήσεις, που λαμβάνονται κυρίως από κατάλληλη υδραυλική προσομοίωση ή δεδομένα SCADA, δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης ροής στις συνδέσεις, ούτε η ενσωμάτωση ειδικών βαρών σε αυτές. Αντ' αυτού, χρησιμοποιώντας χωρίς κατεύθυνση γράφο, ελέγχεται η συνέπεια του δικτύου που δόθηκε και γενικά ένας απλός χωρίς κατεύθυνση γράφος είναι αρκετός για να εκτελεστούν οι περισσότερες αναλυτικές εργασίες, όπως η ταξινόμηση ανά τομείς (sectorization) και αξιολόγηση της κρισιμότητας/αξιοπιστίας των συνδέσεων (Soldi et al., 2015). Συνεπώς, το δίκτυο διανομής νερού που μελετάται, αντιμετωπίζεται ως ένας απλός, χωρίς κατεύθυνση)και χωρίς βάρη, συνδεδεμένος γράφος.

Επιστρέφοντας στην διαδικασία κατάτμησης των αγωγών σε επιμέρους συνδέσεις ανά κόμβους, δημιουργούνται νέες συνδέσεις κυρίως στις συμβολές των αγωγών, όμως στα σημεία που οι αγωγοί δεν τέμνονται αλλά διέρχονται παράλληλα σε διαφορετικό υψόμετρο, υπάρχουν κυρτά ή κοίλα σύμβολα (Εικ. 30). Αυτός ο απλός κανόνας ακολουθείται κατά την επεξεργασία των αγωγών και για αυτό στις συμβολές όπου δεν υπάρχουν οι συμβολισμοί αυτοί, θεωρείται ότι υπάρχει τομή αγωγών και τοποθετείται κόμβος.



Εικόνα 30: Τμήμα του δικτύου διανομής στη Ζώνη Μουράτη

Συνοψίζοντας, το πλήθος των συνδέσεων (links/edges) και των κόμβων (nodes) που προέκυψαν, καταγράφεται στον Πίνακα που ακολουθεί (Πίν. 21).

Πίνακας 21: Σύνολα και υποσύνολα δεδομένων εισόδου στο γράφο

Πλήθος αγωγών	1637
Πλήθος συνδέσεων (edges/links)	2562
Πλήθος κόμβων (nodes)	2263

Η πληροφορία συνδεσιμότητας των διαχωρισμένων αγωγών που προέκυψαν, δηλαδή των συνδέσεων (links/edges), συνοψίζεται σε έναν Πίνακα, που ονομάζεται πίνακας συνδεσιμότητας (connectivity table) (Εικ. 31). Στον Πίνακα αυτό, κάθε σύνδεση (link/edge) έχει ένα μοναδικό κωδικό (id – OBJECTID), τον κωδικό του αγωγού από τον οποίο προέκυψε από το αρχικό σύνολο αγωγών (initial_pipe_id), τον κωδικό του κόμβου αρχής (source) (source_node_id), τις συντεταγμένες του κόμβου αρχής (X_source, Y_source), τον κωδικό του κόμβου τέλους (to) (to_node_id), τις συντεταγμένες του κόμβου τέλους (X_to, Y_to) και το μήκος κάθε σύνδεσης (Shape Length).

OBJECTID	Shape	initial_pipe_id	source_node_id	X_source	Y_source	to_node_id	X_to	Y_to	mhkos	Shape_Length
1	Polylines	1261217	1	469723.81	4200594.81	2	469722.05	4200592.28	2.972269	2.972269
2	Polylines	15633413	3	470200.94	4200539.71	4	470190.88	4200535.77	13.105453	13.105453
3	Polylines	1349424	5	470706.01	4200548.89	6	470703.61	4200549.26	2.428353	2.428353
4	Polylines	1299398	7	468545.72	4200089.38	8	468545.71	4200079.18	10.200005	10.200005
5	Polylines	15633391	9	469906.18	4200405.63	10	469925.25	4200371.3	39.27103	39.27103
6	Polylines	15633327	11	469840.46	4200135.16	12	469847.8	4200137.12	7.597184	7.597184
7	Polylines	15633359	13	469856.07	4200187.13	14	469865.68	4200189.47	9.890789	9.890789
8	Polylines	15633937	15	468749.3	4200274.98	16	468754.2	4200275.06	4.900711	4.900711
9	Polylines	15633937	17	468760.81	4200275.24	18	468843.08	4200274.47	84.204387	84.204387
10	Polylines	15609904	19	470342.23	4199813.21	20	470343.96	4199813.61	1.775641	1.775641
11	Polylines	13587202	21	469707.04	4199898.96	22	469704.67	4199898.08	3.729786	3.729786
12	Polylines	15642483	23	468530.46	4199983.83	24	468594.5	4199983.41	25.965207	25.965207
13	Polylines	15642483	25	468433.55	4199982.09	26	468423.35	4199981.89	10.200494	10.200494
14	Polylines	15642483	27	468479.31	4199982.83	28	468457.35	4199982.47	21.962951	21.962951
15	Polylines	15642483	29	468434.31	4199982.09	25	468433.55	4199982.09	0.76	0.76
16	Polylines	15642483	28	468457.35	4199982.47	29	468434.31	4199982.09	25.922507	25.922507
17	Polylines	15642483	24	468594.5	4199983.41	27	468479.31	4199982.83	25.196876	25.196876
18	Polylines	15642025	30	467847.25	4200197.05	31	467838.59	4200196.92	8.660976	8.660976
19	Polylines	1265931	32	468660.83	4199976.64	33	468685.87	4199976.63	4.96001	4.96001
20	Polylines	13376355	34	469875.84	4200396.48	35	469870.36	4200406.61	11.517263	11.517263
21	Polylines	1247522	36	470588.81	4199782.83	37	470606.08	4199759.86	6.887336	6.887336
22	Polylines	15633213	38	470294.96	4200895.89	39	470297.25	4200900.24	4.915954	4.915954
23	Polylines	15633405	40	470428.07	4200449.48	41	470419.9	4200494.83	45.8833	45.8833
24	Polylines	15642190	42	468021.74	4200390.87	43	468021.59	4200388.19	4.693969	4.693969
25	Polylines	15642222	44	467903.54	4200287.47	45	467905.84	4200199.28	68.219324	68.219324
26	Polylines	15642222	45	467905.84	4200199.28	46	467903.54	4200133.1	66.233895	66.233895
27	Polylines	1258317	47	470247.81	4200419.01	48	470351.67	4200437.14	105.726073	105.726073
28	Polylines	11981562	49	469118.9	4200236.58	50	469118.12	4200235.11	5.515561	5.515561
29	Polylines	1268505	61	468846.48	4196077.96	60	468838.67	4196077.24	6.760098	6.760098

Εικόνα 31: Απόσπασμα του πίνακα συνδεσιμότητας (connectivity table) των αγωγών σε περιβάλλον ArcGIS (attribute table)

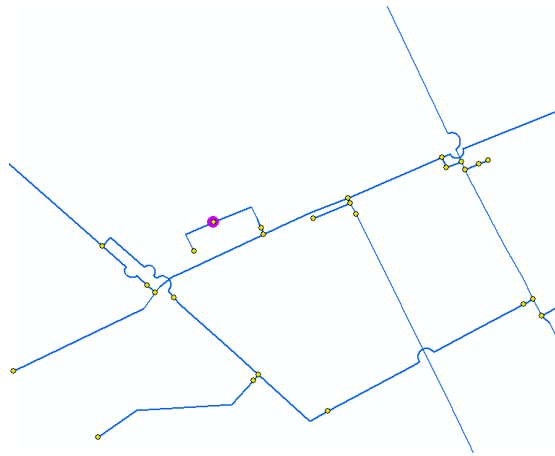
Άρα, διακρίνεται ότι κατά το στάδιο εκτίμησης της κρισιμότητας των αγωγών, η ανάλυση των δεδομένων (data resolution) αυξάνεται σε σχέση με το στάδιο εκτίμησης της τρωτότητας. Αυτό δεν αποτελεί εμπόδιο κατά την σύγκριση των δύο τιμών, αφού είμαστε σε θέση να συνδέσουμε τον κωδικό κάθε νέου αγωγού με τον κωδικό του αγωγού από τον οποίο προκύπτει. Άρα, ένας αγωγός, στην περίπτωση που έχει διατηρηθεί, εμπεριέχει πολλούς νέους, όπως στο παράδειγμα του αγωγού με αρχικό κωδικό 10109417, που έχει διατηρηθεί σε δύο νέους αγωγούς με κωδικό 2371 και 2372 αντίστοιχα (Εικ. 32), οι οποίοι ενδεχομένως να έχουν διαφορετικές τιμές κρισιμότητας, αλλά κοινή τιμή τρωτότητας.

OBJECTID	Shape	XTRID	source_node_id	X_source	Y_source	to_node_id	X_to	Y_to	mhkos	Shape_Length
2263	Polylines	1002617	2178	470879.48	4200369.81	1604	470878.38	4200369.75	8.134803	8.134803
1936	Polylines	1002666	514	470876.46	4200581.89	2089	470882.28	4200580.96	5.893836	5.893836
1883	Polylines	1002694	1867	470752.53	4200474.29	1951	470752.24	4200471	3.302756	3.302756
637	Polylines	1002728	948	470876.28	4200489.03	949	470881.05	4200488.42	4.808846	4.808846
961	Polylines	1002771	1369	470875.7	4200530.39	1369	470881.98	4200529.65	5.737919	5.737919
1770	Polylines	1003035	1270	470876.87	4200447.73	365	470878.19	4200441.11	6.664781	6.664781
1097	Polylines	1003226	332	470887.55	4200554.49	1483	470881.78	4200554.67	5.772807	5.772807
2007	Polylines	1003234	2126	470880.59	4200564.16	331	470880.42	4200564.4	9.76148	9.76148
2008	Polylines	1003234	331	470880.42	4200564.4	2127	470880.26	4200565.05	9.351369	9.351369
970	Polylines	10109369	1353	470449.23	4199947.77	929	470449.25	4199943.5	4.270047	4.270047
2371	Polylines	10109417	1356	470587.06	4200001.17	1168	470588.53	4200000.45	1.636857	1.636857
2372	Polylines	10109417	1168	470588.53	4200000.45	1113	470588.84	4199995.38	14.414985	14.414985
1155	Polylines	10109454	1204	470640.4	4200060.33	557	470633.08	4200064.13	8.249234	8.249234
320	Polylines	10109642	425	470641.29	4200113.39	801	470639.73	4200109.85	3.76809	3.76809
1527	Polylines	10109881	1863	470704.94	4200186.5	1864	470707.44	4200569.23	38.540359	38.540359
1528	Polylines	10109881	1864	470707.44	4200187.95	1865	470832.21	4200238.96	133.713164	133.713164
1529	Polylines	10109881	1865	470832.21	4200238.96	1128	470853.8	4200247.68	23.284469	23.284469
710	Polylines	10259699	210	470756.59	4200462.06	1046	470757.07	4200470.19	8.144157	8.144157
1314	Polylines	10260094	1702	470616.36	4200451.08	1441	470633.77	4200448.46	15.631139	15.631139
837	Polylines	10260184	381	470638.61	4200575.4	1316	470672.44	4200569.23	38.540359	38.540359
1986	Polylines	10686440	431	469890.39	4200808.62	2117	469832.45	4200781.85	32.970154	32.970154
1416	Polylines	10686478	1348	470528.06	4200382.9	1779	470519.02	4200416.73	54.583793	54.583793
706	Polylines	10686498	100	468649.31	4200001.26	943	468649.21	4200005.28	4.021244	4.021244

Εικόνα 32: Απόσπασμα του πίνακα συνδεσιμότητας (connectivity table) των αγωγών σε περιβάλλον ArcGIS (attribute table)

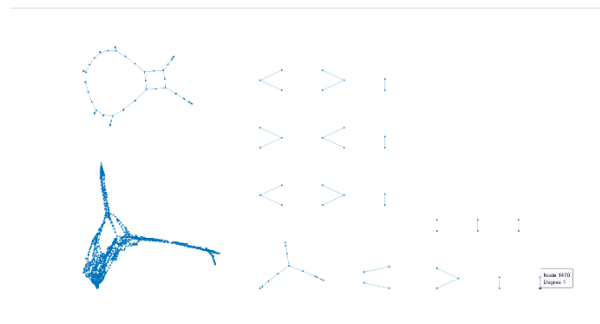
Αρχικά, επιλέχθηκε να δημιουργηθεί ένας χωρίς κατεύθυνση (undirected) και χωρίς βάρη (unweighted) γράφος σε περιβάλλον MatLab, όπου απεικονίζονται οι συνδέσεις (edges/links) με τους αντίστοιχους κόμβους (nodes) του δικτύου. Η ζώνη Μουράτη αποτελεί ζώνη ελεγχόμενης πίεσης, υπάρχει μόνο μία πηγή υδροδότησης (δεξαμενή) και στην σύνδεση της δεξαμενής με το δίκτυο υπάρχει δικλείδα μείωσης πίεσης

(Pressure Reduction Valve, PRV) (node_id: 2002), που στην Εικόνα συμβολίζεται με μωβ χρώμα (Εικ. 33).



Εικόνα 33: Σημείο υδροδότησης της Ζώνης

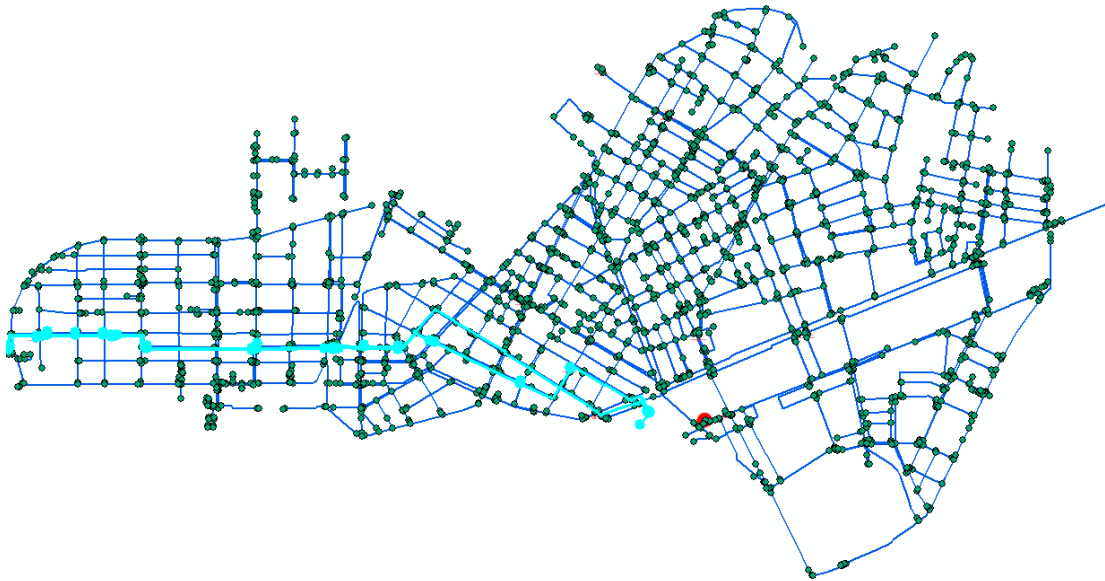
Εισάγεται συνεπώς ο πίνακας συνδεσιμότητας, προσδιορίζονται οι στήλες που περιλαμβάνουν τους κωδικούς των κόμβων αρχής (source_node_id) και τους κωδικούς των κόμβων τέλους (to_node_id) και δημιουργείται το αντικείμενο του γράφου (graph object). Εκτυπώνεται ο γράφος (Εικ. 34), όπου είναι εμφανές ότι υπάρχουν κάποιοι αγωγοί που δεν συνδέονται με τους υπόλοιπους και παρουσιάζονται ξεχωριστά ως ανεξάρτητοι γράφοι, ενώ οι περισσότεροι αγωγοί που συνδέονται διαμορφώνουν έναν κύριο γράφο, ο οποίος απεικονίζεται κάτω αριστερά και αποτελεί το υπό μελέτη δίκτυο.



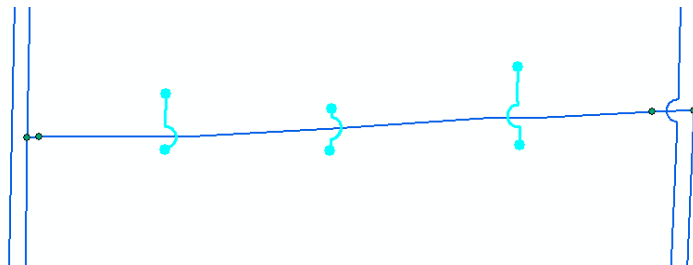
Εικόνα 34: Εκτύπωση μη συνεκτικού γράφου

Συμπεραίνεται ότι πρόκειται για μη συνεκτικό γράφο και για αυτό το λόγο είναι αναγκαία η επιπλέον επεξεργασία της γεωβάσης, όπου διακρίνονται οι συνδέσεις με τους αντίστοιχους κόμβους που παρουσιάζουν πρόβλημα συνδεσιμότητας. Με τον τρόπο αυτό γίνεται έλεγχος της συνέπειας του δικτύου που δόθηκε, καθώς απομακρύνονται οι συνδέσεις που ανήκουν στους αγωγούς μεταφοράς (transit), οι οποίοι δεν τροφοδοτούν ή τροφοδοτούνται από τη Ζώνη, αλλά μεταφέρουν νερό σε άλλες περιοχές του δικτύου (Εικ. 35), αλλά και αυτές που είναι περισσότερο

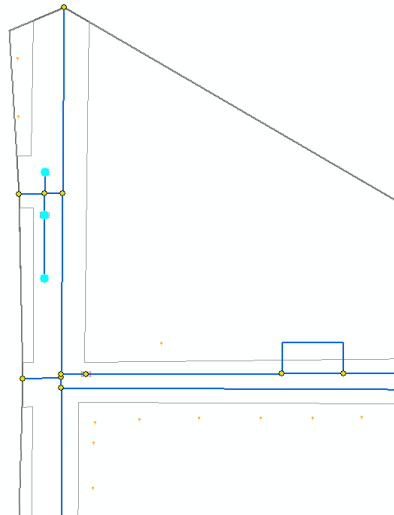
μεμονωμένες και αφορούν παλιές συνδέσεις του δικτύου που δεν χρησιμοποιούνται πλέον (Εικ. 36) (Εικ. 37).



Εικόνα 35: Δίκτυο διανομής της Ζώνης Μουράτη, όπου φαίνονται οι συνδέσεις και οι κόμβοι που ανήκουν σε αγωγούς μεταφοράς (transit)



Εικόνα 36: Τμήμα του δικτύου (συνεκτικές συνιστώσες) που δεν συνδέονται με το υπόλοιπο δίκτυο

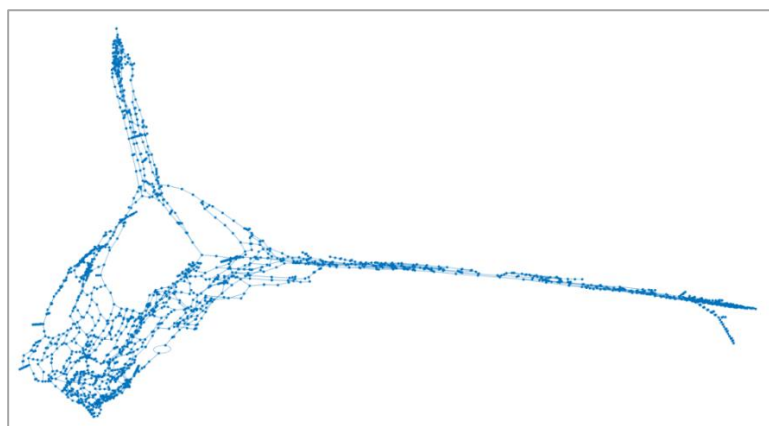


Εικόνα 37: Τμήμα του δικτύου με συνδέσεις και κόμβους που δεν συνδέονται στο υπόλοιπο δίκτυο

Με γαλάζιο χρώμα ξεχωρίζουν οι συνδέσεις και οι κόμβοι που ανήκουν σε αγωγούς μεταφοράς (transit) (Εικ. 35) και αυτοί που ανήκουν σε παλιές συνδέσεις (Εικ. 36) (Εικ. 37) ((OBJECTID =465 OR OBJECTID =466 OR OBJECTID =1521). Αυτά τα στοιχεία αφαιρούνται από τον πίνακα συνδεσιμότητας και δεν συμμετέχουν στη δημιουργία γράφου και άρα δεν λαμβάνουν τιμή κρισιμότητας. Συνεπώς, ενημερώνεται ο πίνακας με το πλήθος των κόμβων και των συνδέσεων (Πίν. 22) και προκύπτει ο τελικός χωρίς κατεύθυνση/ροή (undirected), χωρίς βάρη (unweighted) μιας πηγής υδροδότησης (one source) γράφος (Εικ. 38). Η τάξη και το μέγεθος του γράφου είναι $n_G = 2158$ (< 2263) και $m_G = 2473$ (< 2562), αντίστοιχα.

Πίνακας 22: Σύνολα και υποσύνολα δεδομένων εισόδου στο γράφο

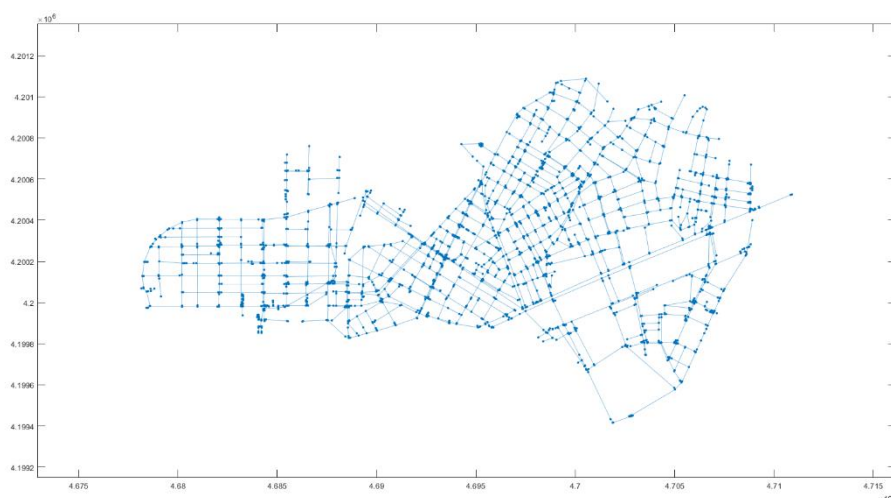
Πλήθος αγωγών	1637
Πλήθος συνδέσεων που προέκυψαν (edges/links)	2473
Πλήθος κόμβων (nodes)	2158



Εικόνα 38: Εκτύπωση τελικού μη κατευθυνόμενου γράφου (undirected graph)

5.2 Αποτελέσματα - Συζήτηση

Στην συνέχεια επιλέγεται να δημιουργηθεί γράφος που τοποθετείται στην ορθή θέση του στο χώρο βάσει των συντεταγμένων των κόμβων (Εικ. 39), δηλαδή γράφος με ορθή τοπολογική δομή (topological structure). Το προβολικό σύστημα που χρησιμοποιείται και είναι αυτό στο οποίο δόθηκαν τα δεδομένα του δικτύου από την ΕΥΔΑΠ, είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87).



Εικόνα 39: Εξαγωγή τελικού μη κατευθυνόμενου γράφου (undirected graph) στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87)

Ήδη διακρίνονται κάποιες επιμέρους περιοχές (υποζώνες) του δικτύου, στις οποίες αναφερόμαστε αναλυτικά παρακάτω.

Μελετώντας την τελική μορφή του γράφου της Ζώνης, εξάγονται κάποια τοπολογικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη δικτύου. Βασικό χαρακτηριστικό του δικτύου διανομής που μελετάται είναι ότι πρόκειται για βρογχωτό δίκτυο (looped network), διότι σχηματίζονται κλειστές διαδρομές μεταξύ των αγωγών, δηλαδή άνω της μίας διαδρομές οδηγούν το νερό σε κάθε σημείο του δικτύου με αφετηρία το μοναδικό σημείο τροφοδοσίας του δικτύου (κεφαλή του δικτύου), όπως στην περίπτωση της Ζώνης Μουράτη ή ένα από τα περισσότερα σημεία τροφοδοσίας σε διαφορετική περίπτωση. Το πεδίο εφαρμογής των βρογχωτών δικτύων είναι τα εσωτερικά δίκτυα ύδρευσης αστικών περιοχών, όπως και η υπό μελέτη Ζώνη. Συνεπώς, κυρίαρχο πλεονέκτημα των βρογχωτών δικτύων είναι η ασφάλεια έναντι βλαβών, αφού εξασφαλίζεται τουλάχιστον μία εναλλακτική διαδρομή τροφοδοσίας για κάθε κόμβο (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2006). Ακόμα, το δίκτυο έχει μερικώς κατανεμημένη τοπολογία (partially connected mesh topology), δηλαδή κάποιοι κόμβοι έχουν περισσότερες από μία συνδέσεις με τους άλλους κόμβους του δικτύου. Σε μια τέτοια

τοπολογία, δύο απομακρυσμένοι κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν ακολουθώντας μια διαδρομή ενδιάμεσων κόμβων. Άρα, λόγω μερικώς κατανεμημένης τοπολογίας και του βρογχωτού δικτύου, υπάρχουν συνήθως διαφορετικές διαδρομές επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων και για αυτό στην περίπτωση που κάποια από τις συνδέσεις τεθεί εκτός λειτουργίας ή για κάποιο λόγο μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης, υπάρχει η δυνατότητα εναλλακτικών διαδρομών. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων αλγόριθμων που καθορίζουν την βέλτιστη διαδρομή δρομολόγησης (routing) ανάλογα με την κάθε περίπτωση (Τοπολογία δικτύου, Μερικώς κατανεμημένη τοπολογία, χ.χ).

Η τοπολογική ερμηνεία μιας Ζώνης εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των βρόγχων (loops) και των εναλλακτικών διαδρομών τροφοδοσίας. Από την άλλη, σε αντίθεση με τα βρογχωτά δίκτυα, οι ακτινωτές δομές παρέχουν περιορισμένες επιλογές για εναλλακτικές διαδρομές (Ulusoy et al., 2018).

Μπορούν να εκτιμηθούν διάφορες παράμετροι που χαρακτηρίζουν την τοπολογία του δικτύου, δηλαδή το γεωμετρικό του προσδιορισμό στο χώρο. Οι παράμετροι αυτοί είτε βασίζονται αποκλειστικά στην τοπολογία του δικτύου, είτε συνδυάζουν την τοπολογία με τα πρότυπα ροής (flow patterns) και στοχεύουν να ταξινομήσουν την τιμή σημαντικότητας κάθε κόμβου ως προς την συνδεσιμότητά του με το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτή η σειρά κατάταξης των κόμβων σχετίζεται με την αστοχία τους, καθώς τα δίκτυα τείνουν να εμφανίζουν αστοχίες σε κόμβους υψηλής κατάταξης με ιδιαίτερα καταστροφικές συνέπειες. Γενικότερα, οι αστοχίες εμφανίζονται όταν ένα συγκεκριμένο στοιχείο του δικτύου παύει να παρέχει την προβλεπόμενη λειτουργία του, λόγω είτε εσωτερικών είτε εξωτερικών κινδύνων (Dueñas-Osorio et al., 2007).

Μία τέτοια παράμετρος που εκτιμά την απόδοση του κάθε στοιχείου ως προς την σημαντικότητά του στο δίκτυο, βάσει τοπολογίας, χρησιμοποιείται στην μεθοδολογία που ακολουθείται για την εκτίμηση της κρισιμότητας των αγωγών και καλείται δείκτης απώλειας συνδεσιμότητας (connectivity loss, C_L). Ο δείκτης αυτός είχε εισαχθεί από τους Albert et al. το 2004 για την μέτρηση της μείωσης της συνδεσιμότητας των κόμβων σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας στις βόρειες ΗΠΑ σε κατάσταση αστοχίας (blackout). Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μέτρων συνδεσιμότητας σύμφωνα με τη θεωρία γράφων, με ενδεικτικά την εγγύτερη κεντρικότητα (closeness centrality) (Herrera et al., 2015) και την ενδιάμεση κεντρικότητα (betweenness centrality) (Yu et al., 2018).

Αναλυτικά, επιλέγεται ως μέτρο εκτίμησης (metric) της σημαντικότητας/κρισιμότητας των αγωγών ο δείκτης απώλειας συνδεσιμότητας C_L , ο οποίος είναι χρήσιμος για να ποσοτικοποιεί τη μέση μείωση της ικανότητας των σημείων διανομής (κόμβων) να παραλάβουν τη ροή που παροχετεύεται από εκείνους τους κόμβους που συνδέονται με τις πηγές υδροδότησης. Με άλλα λόγια, ποσοτικοποιεί τη μείωση του πλήθους των κόμβων τροφοδοσίας, που συνδέονται με ένα σημείο διανομής (κόμβο), λόγω θραύσης σύνδεσης. Η εκτίμηση της παραμέτρου βασίζεται στην τοπολογική δομή του δικτύου και σε κάποιο βαθμό σε πιθανά βέλτιστα μοτίβα ροής. Επομένως αυτή η παράμετρος δεν εξαρτάται από μοντέλα που βασίζονται στη φυσική, αλλά εξακολουθεί να λαμβάνει

την προσφορά και την ζήτηση των περιορισμών της ροής (flow constraints), κάτι το οποίο αποτελεί βασικό της πλεονέκτημα στην εκτίμηση της κρισιμότητας, συγκριτικά με άλλα μέτρα απόδοσης που υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

Ορίζοντας ως n_g^i το πλήθος των κόμβων που είναι ικανοί να παροχετεύσουν ροή στον κόμβο i , μετά τη θραύση στην σύνδεση που υπέστη και ως n_g το πλήθος κόμβων του g υποσυνόλου που παροχετεύουν νερό στο γράφο G σε ήρεμη κατάσταση, το C_L εκτιμάται ως εξής:

$$C_L = 1 - \left\langle \frac{n_g^i}{n_g} \right\rangle_i$$

όπου, η εκτίμηση της μέσης τιμής του κλάσματος, γίνεται για κάθε κόμβο διανομής i του υποσυνόλου κόμβων διανομής d του γράφου G (Dueñas -Osorio et al., 2007).

Εφόσον τίθεται το θέμα της έλλειψης συνδεσιμότητας, αναπτύσσεται η συλλογιστική της διακοπής της ροής νερού από έναν κόμβο σε έναν άλλο, κάτι το οποίο συμβαίνει με τη θραύση της μεταξύ τους σύνδεσης. Η θραύση των συνδέσεων πραγματοποιείται για κάθε μία σύνδεση όπου και προσδιορίζεται η τιμή της έλλειψης συνδεσιμότητας C_L για κάθε κόμβο.

Συμπληρωματικά, επιθυμείται η παράμετρος μέτρησης σημαντικότητας να αναφέρεται σε κάθε σύνδεση, δηλαδή σε κάθε αγωγό του δικτύου και όχι σε κάθε κόμβο, ώστε να μπορεί να συσχετιστεί με την τρωτότητα του κάθε αγωγού, που εκτιμήθηκε παραπάνω. Συνεπώς, εκτιμάται η έλλειψη συνδεσιμότητας κάθε σύνδεσης με την πηγή, εκτελώντας θραύση σε κάθε σύνδεση κατά μήκος του γράφου, δηλαδή με το σύστημα σε κατάσταση πίεσης (stress) και με αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται το γνώρισμα της έλλειψης συνδεσιμότητας από τον κόμβο στην σύνδεση, δηλαδή σε κάθε αγωγό.

Αρχικά, πριν την υλοποίηση των θραύσεων κι ενώ έχει εισαχθεί ο γράφος, εισάγεται η μοναδική πηγή υδροδότησης του δικτύου στον κόμβο με κωδικό 2002 (N2002). Οι αρχικές συνθήκες είναι ότι κάθε κόμβος είναι το ίδιο σημαντικός με οποιονδήποτε άλλο. Εκτελώντας θραύση σε κάθε σύνδεση σειριακά, υπολογίζεται το πλήθος των κόμβων που μένουν χωρίς τροφοδοσία λόγω της εκάστοτε θραύσης (nodes_out), με τα δεδομένα απόκρισης (response data) από τις εκτελέσεις να εξάγονται σε πίνακα. Πιο αναλυτικά, υπολογίζεται το πλήθος των κόμβων χωρίς τροφοδοσία αθροίζοντας το πλήθος των πιο σύντομων διαδρομών (shortest path/distance) του κάθε υπογράφου (GRaptured) από το σημείο που σπάει η σύνδεση μέχρι την πηγή τροφοδοσίας για κάθε μία σύνδεση. Έπειτα, εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση, υπολογίζεται η τιμή της έλλειψης συνδεσιμότητας C_L για κάθε σύνδεση, υπολογίζοντας το πλήθος των κόμβων που τροφοδοτούνται από την πηγή n_g^i συναρτήσει της διαφοράς του συνολικού πλήθους κόμβων στο δίκτυο [2158] και του πλήθους των κόμβων που μένουν χωρίς τροφοδοσία για τη θραύση της αντίστοιχης σύνδεσης (nodes_out) (2158 - nodes_out).

$$C_L = 1 - \left(\frac{n_g^i}{n_g} \right) = 1 - \left(\frac{2158 - nodes_out}{2158} \right)$$

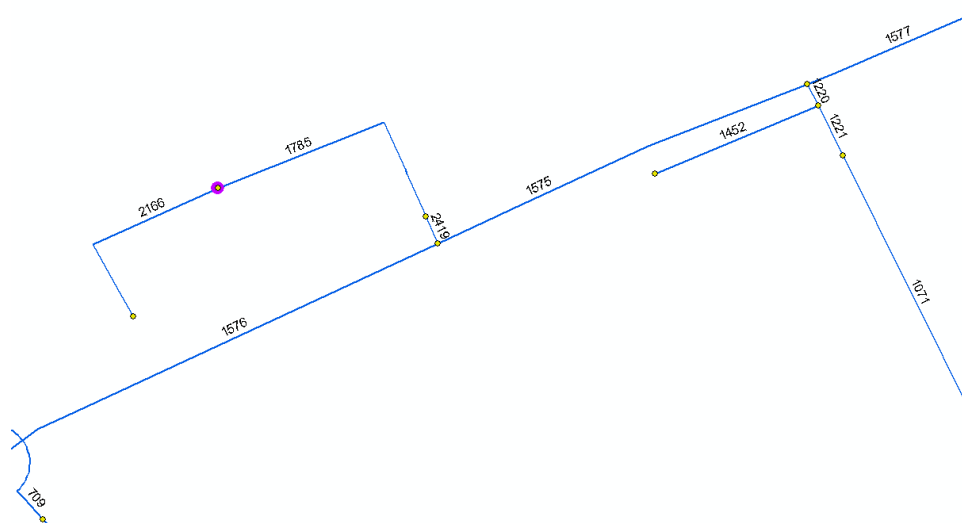
Πράγματι, διαπιστώνεται ότι βασικό πλεονέκτημα της επιλογής του δείκτη C_L είναι ο συνδυασμός μεταξύ ελάχιστης υπολογιστικής πολυπλοκότητας και μεγάλης ικανότητας καταγραφής της ροής στο δίκτυο διανομής (Dueñas -Osorio et al., 2007) (Albert et al., 2004). Κάποιοι κόμβοι ενδέχεται να έχουν *φτωχή τοπολογική συνδεσιμότητα* με την πηγή, δηλαδή να εξαρτώνται αποκλειστικά από μία μοναδική διαδρομή από την πηγή υδροδότησης, για τους οποίους αναμένεται μεγάλη τιμή της έλλειψης συνδεσιμότητας.

Εν συνεχεία, ταξινομούνται τα δεδομένα των τιμών έλλειψης συνδεσιμότητας C_L με αύξουσα σειρά (connectivity_loss_ranked) και αντιστοιχίζεται σε κάθε διαφορετική τιμή μία βαθμολογία (ranking), ξεκινώντας από την τιμή 1 έως και την τιμή 32, διότι υπάρχουν 33 διαφορετικές τιμές έλλειψης συνδεσιμότητας. Έπειτα, διαιρώντας την κάθε βαθμολογία με τη μέγιστη βαθμολογία [32], κανονικοποιείται η τιμή της έλλειψης συνδεσιμότητας, λαμβάνοντας τιμές από 0 έως και 1, με την τιμή αυτή να αποτελεί το μέτρο της κρισιμότητας/σημαντικότητας κάθε σύνδεσης (criticality). Παρακάτω, παρουσιάζεται Πίνακας με ένα δείγμα από το σύνολο των συνδέσεων, με τις δέκα πιο κρίσιμες συνδέσεις της Ζώνης, σε αύξουσα σειρά κατάταξης βάσει της τιμής έλλειψης συνδεσιμότητας (connectivity_loss_ranked) (Πίν. 23). Αναλυτικά, για κάθε σύνδεση αναγράφεται ο κωδικός της (OBJECTID), ο κωδικός του αγωγού από τον οποίο έχει προκύψει (XTRID), ο κόμβος αρχής (source_node), ο κόμβος τέλους (to_node), το πλήθος των κόμβων χωρίς τροφοδοσία (nodes_out), η τιμή της έλλειψης συνδεσιμότητας (connectivity_loss_ranked), η βαθμολογία κάθε τιμής (rank) και το μέτρο κρισιμότητας/σημαντικότητας (criticality). Ο αναλυτικός Πίνακας με όλες τιμές των συνδέσεων που μελετώνται, παρουσιάζεται στο Ηλεκτρονικό Παράρτημα (Πίνακας Παραρτήματος 1).

Πίνακας 23: Κωδικός σύνδεσης, κωδικός αγωγού από τον οποίο προέκυψε, κόμβος αρχής, κόμβος τέλος, πλήθος κόμβων χωρίς τροφοδοσία, τιμή έλλειψης συνδεσιμότητας, βαθμολογία, τιμή κρισιμότητας/σημαντικότητας

OBJECTID	XTRID	source_node	to_node	nodes_out	connectivity_loss_ranked	rank	criticality
193	15902443	315	316	30	0.014	24	0.750
1964	15905303	1586	1695	30	0.014	24	0.750
1306	15910921	50	1695	31	0.014	25	0.781
192	15902443	313	316	32	0.015	26	0.813
189	15902443	309	313	36	0.017	27	0.844
510	15638760	256	777	37	0.017	28	0.875
186	15902443	309	310	38	0.018	29	0.906
187	15902443	118	310	40	0.019	30	0.938
2419	15764749	1890	2001	2155	0.999	31	0.969
1785	16085507	2001	2002	2156	0.999	32	1.000

Είναι προφανές ότι όσο αυξάνονται οι τιμές της έλλειψης συνδεσιμότητας (connectivity_loss) και το πλήθος των κόμβων χωρίς τροφοδοσία (nodes_out), τόσο πιο κρίσιμη είναι μία σύνδεση. Οι δύο τελευταίες και πιο κρίσιμες συνδέσεις (OBJECTID = 1785 και 2419) αποτελούν τις περισσότερο άμεσα συνδεδεμένες με την πηγή και για αυτό το λόγο κατά τη θραύση της πρώτης σύνδεσης απομονώνονται 2156 [2158-2=2156] και 2155 [2158-3=2155] κόμβοι για τη δεύτερη αντίστοιχα, κάτι το οποίο εξάγεται από το συγκεκριμένο απόσπασμα του δικτύου (Εικ. 40). Αναλυτικά, με μωβ χρώματος κύκλο συμβολίζεται η πηγή υδροδότησης και πραγματοποιώντας θραύση στην σύνδεση 1785, τροφοδοτούνται με νερό μόνο δύο κόμβοι και για την θραύση της σύνδεσης 2419, τρεις κόμβοι, αντίστοιχα.

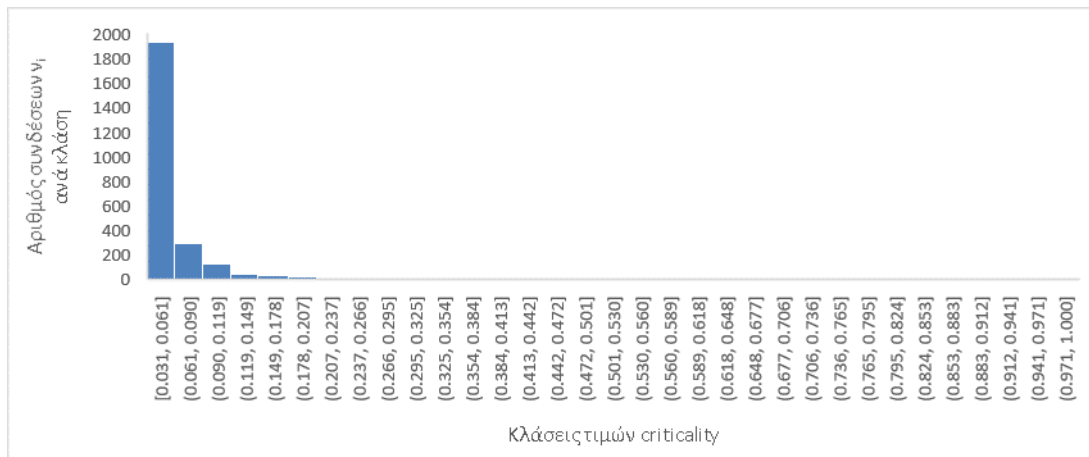


Εικόνα 40: Απόσπασμα των αρχικών συνδέσεων δικτύου διανομής

Εξαίρεση αποτελούν οι αγωγοί με κωδικό 1575 και 1576, οι οποίοι αν και θεωρητικά κρίσιμοι, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε δεν νοούνται ως κρίσιμοι· γεγονός που μας ωθεί στην υιοθέτηση μιας βελτιωμένης μεθοδολογίας εκτίμησης της κρισιμότητας.

Ακόμα, πολλές συνδέσεις έχουν μηδενικό πλήθος κόμβων χωρίς τροφοδοσία [nodes_out = 0, connectivity_loss = 0] με την τιμή της κρισιμότητας να αντιστοιχεί σε 0.031 [criticality=0.031], πράγμα που σημαίνει ότι το νερό ακολουθεί εναλλακτική διαδρομή από την πηγή και δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την σύνδεση που έχει υποστεί θραύση.

Για την καλύτερη απεικόνιση της κατανομής των τιμών κρισιμότητας (ανά κλάση) για κάθε σύνδεση στο σύνολο τους [2473 συνδέσεις], δημιουργείται κατάλληλο ιστόγραμμα συχνοτήτων (Εικ. 41) και σε Πίνακα καταγράφεται το πλήθος των συνδέσεων που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις τιμές της κρισιμότητας (Πίν. 24).



Εικόνα 41: Ιστογράμμο συχνότητων εμφάνισης συνδέσεων ανά κλάση τιμών κρισιμότητας

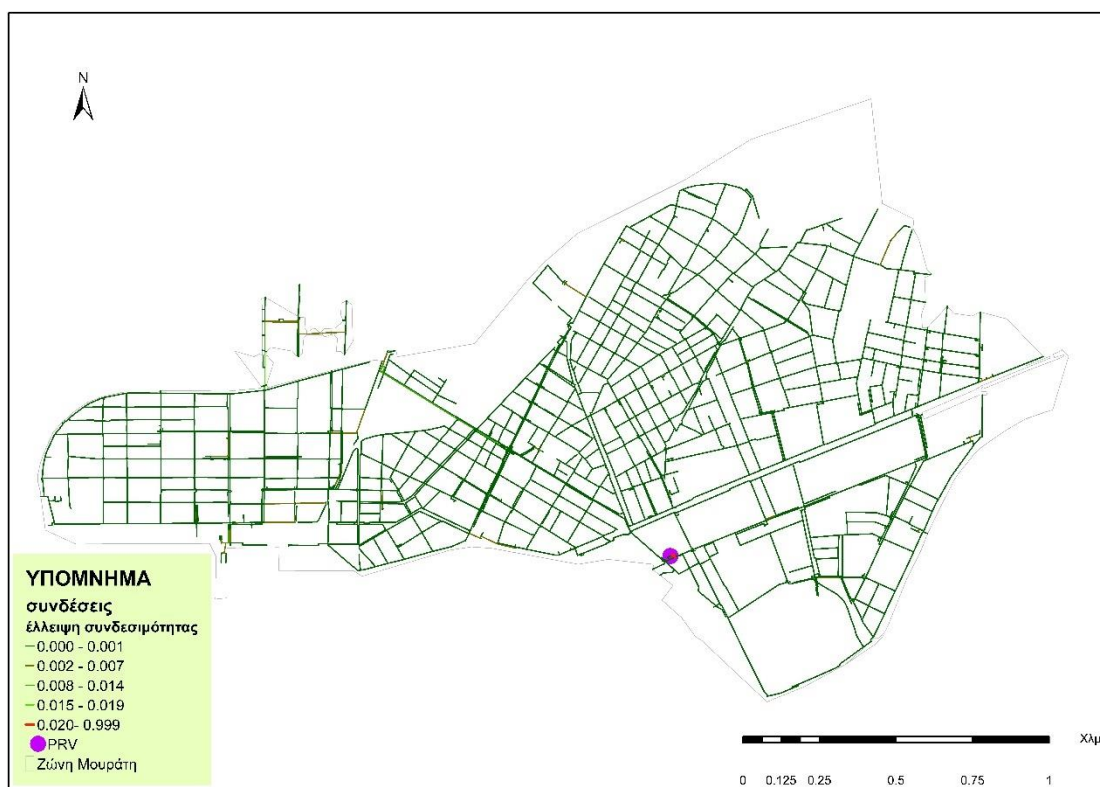
Πίνακας 24: Συχνότητα εμφάνισης και αθροιστική συχνότητα εμφάνισης για κάθε τιμή κρισιμότητας στο σύνολο των συνδέσεων

τιμές κρισιμότητας	συχνότητα εμφάνισης	αθροιστική συχνότητα
0.031	1921	1921
0.063	287	2208
0.094	121	2329
0.125	43	2372
0.156	32	2404
0.188	14	2418
0.219	11	2429
0.250	4	2433
0.281	3	2436
0.313	7	2443
0.344	3	2446
0.375	4	2450
0.406	3	2453
0.438	1	2454
0.469	1	2455
0.500	1	2456
0.531	1	2457
0.563	1	2458
0.594	1	2459
0.625	1	2460
0.656	1	2461
0.688	1	2462
0.719	1	2463
0.750	2	2465
0.781	1	2466
0.813	1	2467
0.844	1	2468

0.875	1	2469
0.906	1	2470
0.938	1	2471
0.969	1	2472
1.000	1	2473

Παρατηρείται ότι στο ιστόγραμμα η κλάση 0.031-0.061 λαμβάνει την πλειοψηφία των τιμών, κάτι που επαληθεύεται και στον Πίνακα με την τιμή 0.031 που αντιστοιχεί σε μηδενική έλλειψη συνδεσιμότητας να αντιστοιχεί σε 1921 συνδέσεις, την τιμή 0.063 να ακολουθεί με 287 συνδέσεις (κλάση 0.061-0.091) κτλ. Αντίθετα, οι περισσότερο κρίσιμοι κόμβοι είναι σαφώς λιγότεροι και η συχνότητα εμφάνισής τους δεν είναι εμφανής στο ιστόγραμμα λόγω των πολύ μικρών τιμών εμφάνισης.

Συνδέονται οι τιμές της έλλειψης συνδεσιμότητας (connectivity loss) και του δείκτη κρισιμότητας (criticality score) με τις συνδέσεις και προκύπτουν οι αντίστοιχοι θεματικοί χάρτες (Εικ. 42) και (Εικ. 43) & Παράρτημα Χαρτών (Χάρτης 3).



Εικόνα 42: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης των συνδέσεων βάσει έλλειψης συνδεσιμότητας



Εικόνα 43: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης των συνδέσεων βάσει τιμής κρισιμότητας

Παρατηρείται ότι η απεικόνιση των τιμών έλλειψης συνδεσιμότητας δεν εξάγει ιδιαίτερα αποτελέσματα για τις συνδέσεις αφού οι τιμές για τις περισσότερες συνδέσεις ανήκουν στο εύρος των τιμών [0 - 0.019], με τις δύο πιο κρίσιμες συνδέσεις δίπλα στην πηγή να ξεχωρίζουν αισθητά με τιμές 0.999 και για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία για την εξαγωγή του δείκτη κρισιμότητας με περισσότερο ομαλοποιημένες τιμές.

Μελετώντας πιο προσεκτικά το χάρτη του δείκτη κρισιμότητας, φαίνεται να ξεχωρίζουν κάποιες επιμέρους ζώνες στο δίκτυο (Εικ. 44).

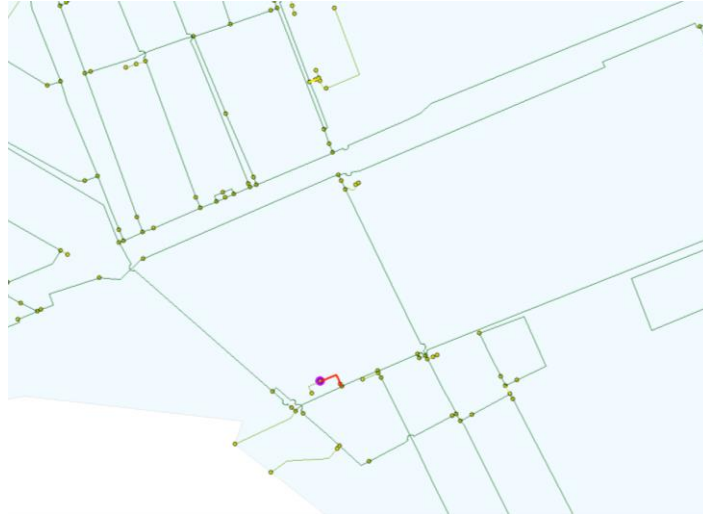


Εικόνα 44: Επιμέρους ζώνες αγωγών υψηλής κρισιμότητας

Για παράδειγμα, η επιμέρους ζώνη 1 που ξεχωρίζει από το υπόλοιπο δίκτυο διανομής, φαίνεται να είναι αρκετά απομακρυσμένη από την πηγή υδροδότησης και φτωχά συνδεδεμένη με το υπόλοιπο σύστημα, αφού εξαρτάται αποκλειστικά από την σύνδεση κόκκινου χρώματος ως μοναδική τροφοδότηρα της υποζώνης. Εφόσον πραγματοποιηθεί θραύση στην σύνδεση αυτή, διακόπτεται τελείως η παροχή στους κόμβους της υποζώνης, πράγμα που καθιστά την σύνδεση αυτή ιδιαίτερα κρίσιμη [criticality = 0.938]. Επιπλέον, μία επίσης κρίσιμη σύνδεση κόκκινου χρώματος [0.75], τροφοδοτεί υποζώνη με 30 κόμβους, γεγονός που δημιουργεί μια ανεξάρτητη μικρή υποζώνη με τον αριθμό 2.

Διακρίνονται επιπλέον υποζώνες φτωχής συνδεσιμότητας, που συνδέονται με κρίσιμες συνδέσεις· με τις δύο νοτιοδυτικές υποζώνες 3 και 4, να συνδέονται με κρίσιμες συνδέσεις [0.594] και [0.438] από τα αριστερά προς τα δεξιά καθώς και την νότια με τον αριθμό 5 με σύνδεση κρισιμότητας [0.375] και τις δύο μικρότερες βόρειες, συγκεκριμένα τη βορειοδυτική 6 με σύνδεση κρισιμότητας [0.344] και τη βορειοανατολική 7 με σύνδεση κρισιμότητας [0.219]. Τέλος, οι συνδέσεις με την μέγιστη τιμή κρισιμότητας [1] και [0.969] είναι οι δύο πρώτες συνδέσεις της πηγής με το υπόλοιπο δίκτυο, καθώς εάν διακοπεί σε αυτές η παροχή, καθίσταται χωρίς τροφοδοσία, πλην τριών κόμβων, σχεδόν ολόκληρη η Ζώνη (Εικ. 45). Οι συνδέσεις προς αυτές τις υποζώνες καλούνται γέφυρες (bridges), διότι λειτουργούν ως μοναδικοί

δίαυλοι παροχής νερού μεταξύ της πηγής υδροδότησης και της υποζώνης. Είναι εμφανές ότι με εξαίρεση τις δύο άμεσα συνδεδεμένες με την πηγή κρίσιμες συνδέσεις, το μεγαλύτερο ποσοστό κρίσιμων συνδέσεων βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές του δικτύου σε σχέση με την πηγή, ενώ οι ενδιάμεσες κατέχουν την πλειοψηφία και τις μικρότερες τιμές κρισιμότητας.



Εικόνα 45: Οι δύο πιο κρίσιμες συνδέσεις της Ζώνης

6 Μεθοδολογία ιεράρχησης/προτεραιότητας αντικατάστασης αγωγών (optimization strategy)

6.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Ολοκληρώνοντας την εκτίμηση της τρωτότητας και της κρισιμότητας, καλούμαστε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις περιοχές χαμηλής αξιοπιστίας και να τεθεί σε ισχύ η διαδικασία ιεράρχησης αντικατάστασης αγωγών στις περιοχές αυτές.

Η διαδικασία λήψης απόφασης περιλαμβάνει μια σειρά σταδίων, όπου ξεκινάει με τον προσδιορισμό του στόχου και ολοκληρώνεται με μια συγκεκριμένη κατεύθυνση δράσης. Στο πρόβλημα που μελετάται, στόχος είναι η ιεράρχηση αντικατάστασης αγωγών για τη Ζώνη Μουράτη. Οι αποφασίζοντες αποτελούν άτομα ή ομάδες που εμπλέκονται άμεσα ή έμμεσα στη διαδικασία λήψης απόφασης, εκφράζοντας κρίσεις για τον καθορισμό των εναλλακτικών, των κριτηρίων αξιολόγησης και των προτεραιοτήτων. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι αποφασίζοντες είναι οι διαχειριστές του συστήματος, δηλαδή εν προκειμένω ο πάροχος.

Τα κριτήρια αξιολόγησης είναι αυτά που δίνουν την πληροφορία για τη φύση του προβλήματος και “καθορίζουν” τις πιθανές εναλλακτικές λύσεις. Διαχωρίζονται σε ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης. Συνήθως αντιστοιχίζονται κάποια βάρη στα κριτήρια αξιολόγησης, με τα οποία ιεραρχείται η σημαντικότητα των κριτηρίων αξιολόγησης σε ένα πρόβλημα. Στο εν λόγω πρόβλημα, τα κριτήρια αξιολόγησης περιέχουν ποσοτική πληροφορία και είναι δύο, η τρωτότητα και η κρισιμότητα των αγωγών. Παρακάτω, σχολιάζεται η επιλογή των κριτηρίων αξιολόγησης καθώς και οι πιθανές επιλογές άλλων κριτηρίων για το πρόβλημα της ιεράρχησης των αγωγών (Στρατηγέα, 2015). Αναφορικά με τις εναλλακτικές λύσεις που προκύπτουν, μας ενδιαφέρει η επίδοση της κάθε εναλλακτικής ως προς ένα κριτήριο αξιολόγησης και εφόσον τα δυο κριτήρια αυτά έχουν τον ίδιο βαθμό σπουδαιότητας, δεν ενσωματώνονται βάρη σε αυτά, αλλά δημιουργείται η ανάγκη ενός κοινού δείκτη που να συνδυάζει τα δύο κριτήρια αυτά.

Όπως αναφέρουν οι Rinner και Malczewski το 2002 (όπ. αναφ. στο Makropoulos & Butler, 2006), η διαδικασία πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων (Multi-criteria decision making, MCDM) περιλαμβάνει ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων/αποφάσεων (alternatives), που αξιολογούνται βάσει κριτηρίων, ενδεχομένως πολλές φορές και αντικρουόμενων. Η διαδικασία της πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων MCDM χρησιμοποιείται ευρέως και συνδυαστικά με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), τα οποία λειτουργούν ως εργαλεία για να αντιμετωπιστούν σύνθετα χωρικά προβλήματα μέσω Χωρικών Συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (Spatial Decision Support Systems, SDSS), όπως αναφέρουν οι Dragan et al. το 2003 και οι Mysiak et al. το 2005 (όπ. αναφ. στο Makropoulos & Butler, 2006). Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ευρέως τα Γεωγραφικά Συστήματα

Πληροφοριών (GIS), διότι περιέχουν έναν εξελεγμένο διαχειριστή δεδομένων που επιτρέπει τα λεγόμενα ερωτήματα (queries) (Keenan, 2003), τα οποία συνδυάζουν τα διάφορα χαρακτηριστικά (attributes) των δεδομένων βάσει της θέσης τους και είναι το by default εργαλείο που έχουν για λήψη αποφάσεων, κάτι που τα ξεχωρίζει από έναν απλό χάρτη. Κάθε τοποθεσία ή κάθε κελί (cell) στον χάρτη μπορεί να αποτελέσει πιθανή λύση (alternative), που χρειάζεται να αξιολογηθεί ως προς την καταλληλότητα για επιλογή (suitability for application).

6.1.1 Χωρικά Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Spatial decision support systems - SDSS)

Τα χωρικά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Spatial Decision Support Systems – SDSS) αποτελούν μια ειδικότερη αρχιτεκτονική των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support Systems - DSS), με βασική επιπρόσθετη συνεισφορά των πρώτων την ικανότητα να αποθηκεύουν και να χειρίζονται δεδομένα, βάσει της γεωγραφικής τους θέσης.

Παρακάτω, αναπτύσσονται κάποιες εφαρμογές Χωρικών Συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων. Συγκεκριμένα, οι Burn et al. ανέπτυξαν ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) το PARMS-PLANNING, το οποίο υποστηρίζει τον μακροπρόθεσμο προγραμματισμό και τις ρυθμίσεις του κόστους και των επιπτώσεων διαφορετικών τρόπων διαχείρισης και μορφών επιχειρησιακής διαχείρισης των πόρων (assets). Συμπληρωματικά του PARMS-PLANNING αναπτύσσεται το PARMS PRIORITY, το οποίο επιτρέπει στην εταιρεία ύδρευσης να εκμεταλλευτεί τον προγραμματισμένο προϋπολογισμό που υπάρχει για ανανέωση των αγωγών του δικτύου με αποτελεσματικό τρόπο, υποστηρίζοντας τη διαδικασία προτεραιότητας αντικατάστασης (Moglia et al., 2005). Το PARMS-PRIORITY έχει αναπτυχθεί για να υποστηρίζει την προτεραιότητα αντικατάστασης αγωγών (pipeline renewal prioritization), η οποία περιλαμβάνει την αναλυτική εκτίμηση διαφορετικών δραστηριοτήτων, όπως η αντικατάσταση αγωγών και η μείωση της πίεσης, από την άποψη των σχετιζόμενων κινδύνων. Τέτοιο μοντέλο προτεραιότητας περιλαμβάνει την ανάπτυξη μεθοδολογίας, υπολογισμούς, εισαγωγή δεδομένων και εξαγόμενα αποτελέσματα. Οι υπολογισμοί επικεντρώνονται σε βασικές εργασίες, όπως εκτίμηση επικινδυνότητας (risk assessment), πρόβλεψη αστοχίας, εκτίμηση κόστους, εξερεύνηση δεδομένων (data exploration) και αξιολόγηση σεναρίων. Το μοντέλο χρησιμοποιεί εγγραφές δεδομένων πόρων (assets) και αστοχιών (failures) εφαρμόζοντας τυποποιημένη προσέγγιση (standard risk approach). Αναλυτικά, οι κίνδυνοι που σχετίζονται με διαφορετικά σενάρια και οι επιλογές αξιολογούνται χρησιμοποιώντας τυποποιημένη προσέγγιση διαχείρισης κινδύνου σύμφωνα με τα πρότυπα Αυστραλίας / Νέας Ζηλανδίας (Standards Australia and Standards New Zealand, 1999). Ο κίνδυνος εκτιμάται συνδυάζοντας τα εξαγόμενα αποτελέσματα των μοντέλων πρόβλεψης της αστοχίας με τα εξαγόμενα αποτελέσματα των μοντέλων εκτίμησης του κόστους. Έως το 2005 το PARMS PRIORITY χρησιμοποιούταν από

δύο εταιρείες ύδρευσης, με καλές αρχικές παρατηρήσεις. Για αυτό το λόγο στην Αυστραλία για παράδειγμα, πολλές εταιρείες ύδρευσης έχουν εστιάσει το ενδιαφέρον τους στη συλλογή και διαχείριση δεδομένων και στην κατηγοριοποίηση αυτών με στόχο την ολοκληρωμένη διαχείριση του συστήματός τους (Moglia et al., 2005).

6.2 Διαδικασία λήψης απόφασης (decision making) - Επιλογή κριτηρίων αξιολόγησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε σημείο στο χάρτη μπορεί να αποτελέσει πιθανή βέλτιστη λύση για το πρόβλημα που αναπτύσσεται, συνεπώς καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολο για τον μηχανισμό λήψης απόφασης (decision maker) η κατασκευή μίας και μοναδικής σχέσης/εξίσωσης, θέτοντας κάθε τοποθεσία υπό αξιολόγηση ως προς την καταλληλότητά της και παράλληλα λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία συσχετίζουν την τοποθεσία με τα χαρακτηριστικά της (spatial decision making).

Πρωταρχικής σημασίας κατά τη μοντελοποίηση του περιβάλλοντος λήψης απόφασης, αποτελεί η επιλογή κατάλληλων κριτηρίων αξιολόγησης. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος μηχανισμός για τον προσδιορισμό των κριτηρίων αξιολόγησης (evaluation criterion) κατά την MCDM. Έχοντας ως στόχο την ικανότητα προσδιορισμού όλων των πτυχών του προβλήματος με ακρίβεια, είναι αναγκαία η χρήση πολλών κριτηρίων, τα οποία δύναται να έχουν τη μορφή χαρτών ή υποβάθρων (data layer) στα χωρικά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Από την άλλη, επιλέγοντας λιγότερα κριτήρια υπάρχει ο κίνδυνος να οδηγηθούμε σε υπεραπλοποίηση, όπως επισημαίνουν οι Young et al. το 1996.

Πιο συγκεκριμένα, οι Keeney and Raiffa το 1976 προτείνουν ότι κάθε κριτήριο αξιολόγησης πρέπει να είναι κατανοητό και μετρήσιμο και στο σύνολό τους να είναι ολοκληρωμένα, ώστε να καλύπτουν όλες τις πτυχές του προβλήματος. Ακόμα, κάθε κριτήριο αξιολόγησης πρέπει να συμβάλλει στη λειτουργία του συστήματος (operational) για να έχει νόημα κατά την ανάλυση και να είναι αποδομήσιμο σε επιμέρους υποκριτήρια, ώστε να απλοποιείται η διαδικασία (Makropoulos & Butler, 2006).

Η διαδικασία επιλογής κριτηρίων αξιολόγησης είναι συγκεκριμένη για το εκάστοτε πρόβλημα και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος που αναλύεται. Μια λεπτομερής εξέταση του συστήματος προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως ότι αυξάνεται ο βαθμός κατανόησης των εμπλεκόμενων λειτουργιών του, των επιδράσεών του και υιοθετείται το καταλληλότερο σύνολο κριτηρίων, δοκιμάζοντας διαφορετικούς συνδυασμούς συνόλων και εξετάζοντας παράλληλα την απόδοση και την ακρίβεια του μοντέλου.

Στην περίπτωσή μας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα κριτήρια που επιλέγονται για την ιεράρχηση αντικατάστασης αγωγών ύδρευσης είναι η τρωτότητα/επικινδυνότητα θραύσης (vulnerability) και η κρισιμότητα (criticality). Η τρωτότητα των αγωγών είναι ένα κριτήριο που αποδομείται σε επιμέρους υποκριτήρια, το υλικό κατασκευής, το μήκος και την εξωτερική διάμετρο των αγωγών. Λόγω έλλειψης πληροφορίας δεν είναι δυνατή η προσθήκη περισσότερων υποκριτηρίων για την εκτίμηση της τρωτότητας. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την τρωτότητα και θα μπορούσαν να εισαχθούν ως υποκριτήρια της ή και ως ξεχωριστά κριτήρια αξιολόγησης για την ιεράρχηση αντικατάστασης των αγωγών είναι: ο τύπος εδάφους, το pH εδάφους, η αλατότητα εδάφους, οι εσωτερικές πιέσεις αγωγών. Επιπλέον, πρόσθετες σχετικές παράμετροι που σχετίζονται με την τρωτότητα των αγωγών, άρα και με την πιθανότητα θραύσης τους, είναι οι (εσωτερικές) καθιζήσεις εδάφους, το είδος της όχλησης/κίνηση οχημάτων και κυρίως τα φορτία που δέχεται ο αγωγός από τα διερχόμενα οχήματα, η όχληση που δημιουργείται κατά τις εργασίες αντικατάστασης. Ακόμα, παράμετροι που μπορούν να λειτουργήσουν ως κριτήρια αξιολόγησης για την ιεράρχηση αγωγών σε δίκτυο ύδρευσης είναι ο τύπος των ιδιωτικών συνδέσεων ή οι χρήσεις γης της περιοχής, από τα οποία προκύπτουν οι ευαίσθητοι καταναλωτές (νοσοκομεία, σχολεία) αλλά και οι μεγάλοι καταναλωτές του συστήματος. Τέλος, σχετιζόμενοι παράμετροι με την αντικατάσταση των εκάστοτε αγωγών και άρα με την ιεράρχηση αντικατάστασής τους, είναι η απόσταση από πυροσβεστικούς κρουούς και δικλίδες γενικότερα, η πυκνότητα του δικτύου (αυξημένη πιθανότητα ατυχήματος/θραύσης αγωγών λόγω αντικατάστασης κοντινών σε αυτούς αγωγών ύδρευσης ή εργασιών σε κάποιο όμορο δίκτυο) και η πυκνότητα του πληθυσμού (Makropoulos & Butler, 2006).

6.2.1 Πυκνότητα πληθυσμού και Διατεταγμένος Σταθμισμένος Μέσος Όρος (Order weighted averaging) – Αποτελέσματα

Επομένως, έχοντας επιλέξει τα κριτήρια αξιολόγησης, δημιουργείται η ανάγκη εξαγωγής ενός συνδυαστικού δείκτη, που να περιλαμβάνει τα δύο αυτά κριτήρια και βάσει αυτού να προταθούν ιεραρχικά οι εργολαβίες αντικατάστασης των αγωγών. Όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, τα δύο κριτήρια αξιολόγησης αντιμετωπίζονται ως ισάξια σπουδαιότητας και δεν ενσωματώνονται καθένα από αυτά βάρη. Ωστόσο, βάσει και των δεδομένων που δόθηκαν, επιλέγεται να ληφθεί η πυκνότητα πληθυσμού ως έμμεσο βάρος, λόγω του ότι σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα πληθυσμού, οι αστοχίες του δικτύου και εν προκειμένω οι θραύσεις σε αγωγούς, έχουν μεγαλύτερες επιπτώσεις, όταν εξυπηρετούν περισσότερους καταναλωτές· με άλλα λόγια υπάρχει ισχυρή εξάρτηση μεταξύ εξυπηρετούμενου πληθυσμού και αξιοπιστίας ως προς την παροχή υπηρεσιών.

Αρχικά, είναι αναγκαίο να διατηρηθεί μία κοινή ανάλυση δεδομένων για την εξαγωγή του συνδυαστικού δείκτη, δεδομένου ότι υπάρχει διαφορετική ανάλυση δεδομένων κατά τα στάδια εκτίμησης των κριτηρίων αξιολόγησης (τρωτότητα και κρισιμότητα).

Επιλέγεται, συνεπώς, η μικρότερη ανάλυση, στην οποία αρχικά δόθηκαν τα δεδομένα από την ΕΥΔΑΠ και ενσωματώνοντας τις αντίστοιχες μεταβολές στο πλήθος των αγωγών που έγιναν κατά τα στάδια εκτίμησης των κριτηρίων, προκύπτει το τελικό σύνολο αγωγών [1568 αγωγοί]. Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα, καταγράφονται οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε στάδιο της μεθοδολογίας που ακολουθείται (Πίν. 25).

Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός Πίνακας συνόλων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στα στάδια της μεθοδολογίας

Χρονική περίοδος μελέτης θραύσεων		06/2015-06/2018			
Σύνολο αγωγών που χρησιμοποιούνται		1637			
Αγωγοί με θραύση		122			
Αγωγοί χωρίς θραύση		1415			
Εκτίμηση τρωτότητας/επικινδυνότητας		Εκτίμηση κρισιμότητας		Συνδυαστικός δείκτης	
Υποσύνολο δεδομένων εκμάθησης (training data)	1310	Πλήθος συνδέσεων (edges/links)	2473	Πλήθος αγωγών	1568
Πλήθος αγωγών με θραύση στο υποσύνολο δεδομένων εκμάθησης	90	Πλήθος κόμβων (nodes)	2158		
Υποσύνολο δεδομένων ελέγχου (testing data)	327				
Πλήθος αγωγών με θραύση στο υποσύνολο δεδομένων ελέγχου	32				

Αναφορικά με το στάδιο εκτίμησης της κρισιμότητας, όπου προέκυψαν επιμέρους αγωγοί και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές, δεδομένου ότι η ανάλυση «επέστρεψε» στο αρχικό σύνολο αγωγών, είναι αναγκαίο να αποφασιστεί πως θα ενοποιηθούν οι πολλαπλές τιμές κρισιμότητας των συνδέσεων σε μία τιμή για κάθε αγωγό. Αυτό το φαινόμενο απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα, όπου ο επιλεγμένος αγωγός γαλάζιου χρώματος περιέχει δύο τιμές κρισιμότητας [0.031 και 0.094] για τις δύο επιμέρους συνδέσεις (Εικ. 46). Αποφασίζεται λοιπόν ότι ο κανόνας με τον οποίο γίνεται η επιλογή της καταλληλότερης τιμής, είναι η επιλογή της μέγιστης τιμής μεταξύ των τιμών κρισιμότητας, ακολουθείται δηλαδή το χειρότερο σενάριο (worst case scenario) δηλαδή υπέρ της ασφάλειας.



Εικόνα 46: Απόσπασμα του δικτύου διανομής

Σε αυτό το σημείο, εξασφαλίζεται ότι και τα δύο κριτήρια αξιολόγησης αναφέρονται σε κοινό σύνολο αγωγών (1568 αγωγοί), έχουν την ίδια κλίμακα [0-1] με τον ίδιο χαρακτηρισμό και σημασία (1: υψηλή τρωτότητα/υψηλή κρισιμότητα, 0: χαμηλή τρωτότητα/ χαμηλή κρισιμότητα) και επομένως βρίσκονται σε θέση να επεξεργαστούν για την εξαγωγή του συνδυαστικού δείκτη.

Προχωρώντας, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μία τεχνική συνάθροισης για την εξαγωγή του συνδυαστικού δείκτη, που συνδυάζει τελεστές διασταύρωσης, ένωσης και μέσου όρου και καλείται μέθοδος του Διατεταγμένου Σταθμισμένου Μέσου Όρου (Ordered Weighted Averaging, OWA), η οποία εισήχθη από τον Yager το 1988. Η μέθοδος του Διατεταγμένου Σταθμισμένου Μέσου Όρου (Ordered Weighted Averaging, OWA) αποτελείται από μία ομάδα τελεστών συνάθροισης, που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της πολυκριτηριακής ανάλυσης και κυρίως κατά την προσομοίωση των επιπέδων της αποφυγής του κινδύνου (risk aversion levels). Η OWA αποτελεί ένα σταθμισμένο άθροισμα των διατεταγμένων κριτηρίων αξιολόγησης (Makropoulos & Butler, 2006).

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης, τα κριτήρια αξιολόγησης είναι δύο, η τιμή της τρωτότητας και η τιμή της κρισιμότητας και ως διατεταγμένο βάρος επιλέγεται ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός. Συνεπώς, ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά οι αγωγοί ανάλογα με το βάρος και πολλαπλασιάζεται η πρώτη και μεγαλύτερη τιμή του βάρους με εκείνο το κριτήριο αξιολόγησης που έχει τη μεγαλύτερη τιμή από τα δύο και επειδή δεν υπάρχουν άλλα βάρη και ισχύει η συνθήκη $w_1+w_2+\dots=1$, πολλαπλασιάζεται η συμπληρωματική τιμή του βάρους (1-weight) με το δεύτερο κριτήριο με την μικρότερη τιμή. Ο συνδυαστικός δείκτης που προκύπτει, ισούται με το άθροισμα των δύο αυτών γινομένων. Παρακάτω, παρουσιάζεται αναλυτικός Πίνακας με τα αποτελέσματα του συνδυαστικού δείκτη OWA για κάθε αγωγό.

Όπως αναφέρει ο Malczewski το 1999, τα διατεταγμένα βάρη επιτρέπουν έλεγχο του βαθμού επιρροής μεταξύ των κριτηρίων κι έτσι ελέγχεται ο επιτρεπόμενος βαθμός αισιοδοξίας (degree of optimism) ή η επιτρεπόμενη αποφυγή κινδύνου (risk aversion) κατά τη διαδικασία σχεδιασμού (Makropoulos & Butler, 2006).

Η επιλογή του κριτηρίου με τη μέγιστη τιμή ώστε να ενσωματωθεί σε αυτό το μέγιστο βάρος με την τιμή 1 δηλαδή, αποτελεί μία ακραία περίπτωση και συνθέτει την αισιόδοξη προσέγγιση (optimistic approach), ενσωματώνοντας τη μέγιστη λήψη κινδύνου (maximum risk taking), ενώ στα υπόλοιπα κριτήρια δίνεται βάρος ίσο μη μηδέν. Μία αντίθετη ακραία περίπτωση είναι η απαισιόδοξη προσέγγιση (pessimistic approach), όπου επιλέγεται να εκχωρηθεί το μεγαλύτερο βάρος στο κριτήριο με τη μικρότερη τιμή και άρα λαμβάνεται ο μικρότερος δυνατός κίνδυνος (low risk taking). Η τιμή του κριτηρίου που επιλέγεται για να εκχωρηθεί το μεγαλύτερο βάρος, καλείται σύνθετη τιμή (composite value).

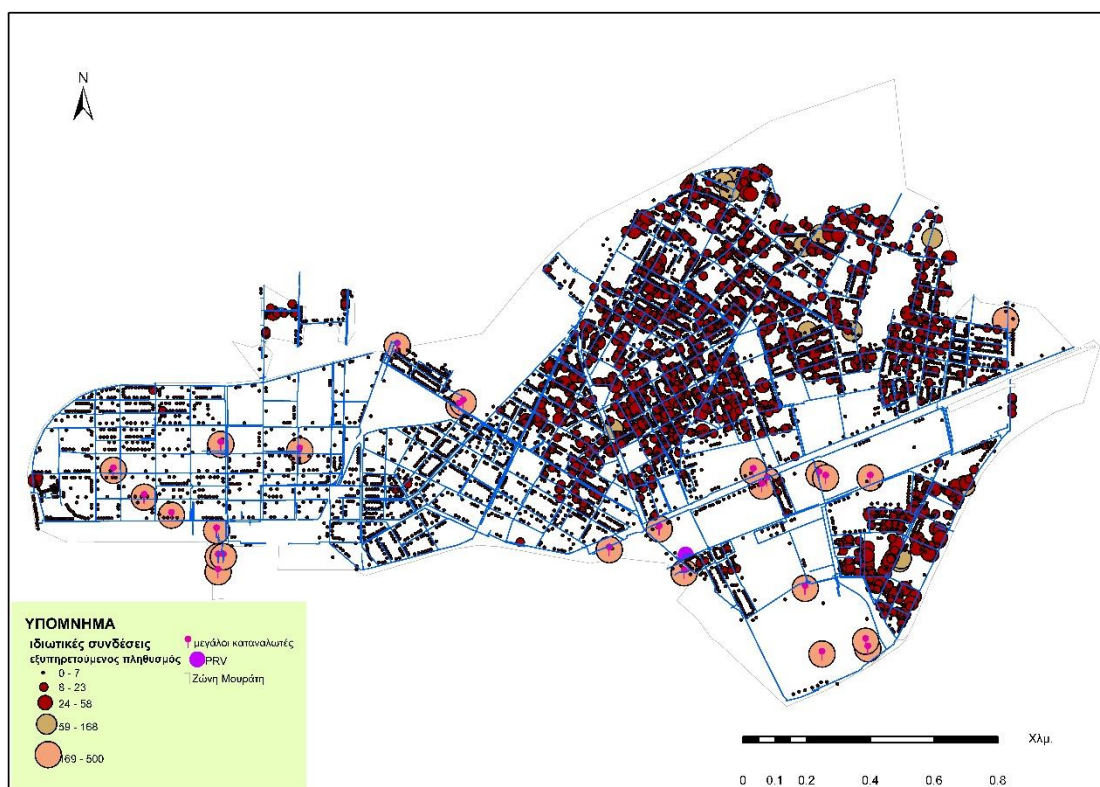
Και στις δύο περιπτώσεις δεν υπάρχει ανταλλαγή μεταξύ των τιμών των κριτηρίων. Ενδιάμεσα αυτών των δύο ακραίων περιπτώσεων υπάρχουν διαφορετικές εναλλακτικές κατατάξεις με ποικίλους βαθμούς ανταλλαγής καθώς και η περίπτωση της μέγιστης ανταλλαγής μεταξύ των τιμών των κριτηρίων ή αλλιώς κανονιστικής (normative), όπου η τιμή των βαρών ορίζεται ως $1/n$, όπου n : το πλήθος των κριτηρίων (Makropoulos & Butler, 2006). Παράδειγμα αυτού αποτελεί ο παρακάτω Πίνακας, όπου προτείνονται τιμές βαρών ανάλογα με τον βαθμό επιρροής, σύμφωνα με τους Tesfamariam et al. το 2010 (Bradshaw et al., 2011) (Πίν. 26).

Πίνακας 26: Αντιστοιχία της γλωσσικής περιγραφής του βαθμού επιρροής με τιμές βαρών, θεωρώντας ότι πρόκειται για δύο κριτήρια αξιολόγησης (Bradshaw et al., 2011)

Βαθμός επιρροής (Degree of optimism)	Τιμές βαρών
αισιόδοξο (optimistic)	0.9
μέτρια αισιόδοξο (moderately optimistic)	0.7
κανονιστικό (normative)	0.5
μέτρια συντηρητικό (moderately conservative)	0.3
συντηρητικό (conservative)	0.1

Αναλύοντας την διαδικασία υπολογισμού του συνδυαστικού δείκτη OWA, αρχικά πρέπει να αντιστοιχηθεί ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός στους αγωγούς, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει ως διατεταγμένο βάρος. Το πλήθος του εξυπηρετούμενου πληθυσμού καταγράφεται στη σημειακή τάξη χωρικών στοιχείων (feature class), που καλείται ιδιωτικές συνδέσεις/υδρόμετρα και επιλέγεται να προστεθούν σε αυτή οι μεγάλοι καταναλωτές, στους οποίους όμως δεν είναι καταγεγραμμένος ο πληθυσμός. Για αυτό το λόγο, γίνεται συμπλήρωση τιμών πληθυσμού στους μεγάλους καταναλωτές, όπου εκτιμάται ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός σε 500 άτομα. Ο αριθμός αυτός επιλέχθηκε με τη συλλογιστική ότι είναι αρκετά πιο μεγάλος από τις υπόλοιπες

τιμές, οι οποίες έχουν εύρος τιμών [0, 168] με εξαίρεση μία σύνδεση με τιμή 418, που έχει μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες και θεωρείται ότι αφορά μεγάλο καταναλωτή επίσης. Παρακάτω παρουσιάζεται ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός ανά ιδιωτική σύνδεση, κατηγοριοποιημένος σε πέντε κλάσεις καθώς και οι μεγάλοι καταναλωτές (Εικ. 47) & Παράρτημα Χαρτών (Χάρτης 4).

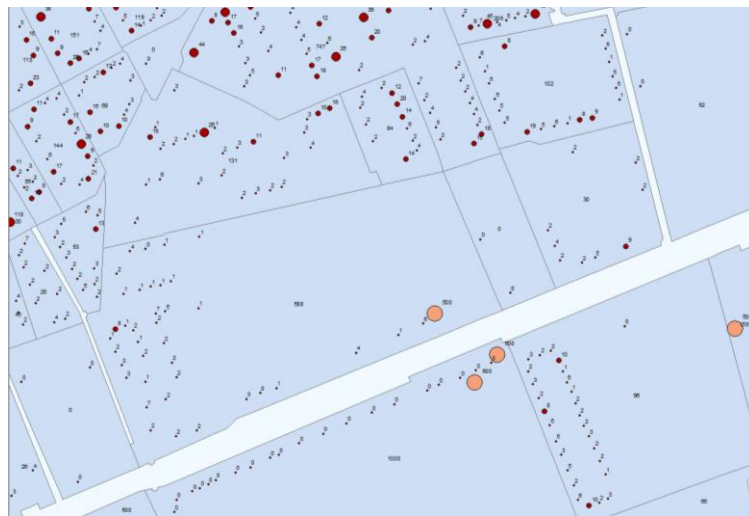


Εικόνα 47: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης εξυπηρετούμενου πληθυσμού ανά ιδιωτική σύνδεση και μεγάλων καταναλωτών

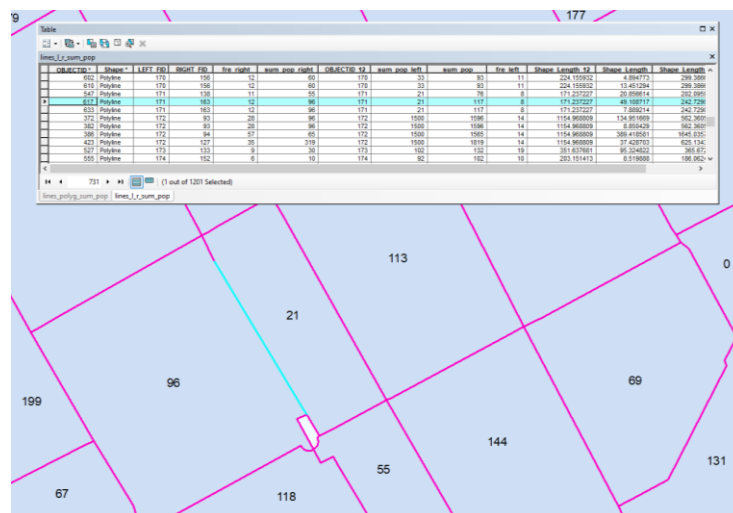
Σχετικά με το σημειακό feature class των συνδέσεων, έγινε ταξινόμηση των τιμών του εξυπηρετούμενου πληθυσμού σε πέντε κλάσεις και συμβολίζεται με κύκλους ανάλογου μεγέθους. Ακόμα, για την κλάση με τις μεγαλύτερες τιμές [169-500], επιλέγεται κύκλος χρώματος ροζ, για την αμέσως μικρότερη κλάση [59-168] καστανού χρώματος και σκούρου καστανού για τις τρεις μικρότερες κλάσεις. Επιπλέον, απεικονίζεται το feature class των μεγάλων καταναλωτών με μωβ σύμβολο, τα σημεία του οποίου συμπίπτουν με τις συνδέσεις με περισσότερο πληθυσμό (μεγάλοι ροζ κύκλοι), όπως αναμένονταν.

Συνεπώς, επιθυμείται να μεταφερθούν οι τιμές του εξυπηρετούμενου πληθυσμού από το σημειακό feature class των συνδέσεων γραμμικό των αγωγών [1568 αγωγοί]. Ακολουθείται μια σειρά εντολών στο περιβάλλον ArcGIS, όπου μετατρέπονται οι αγωγοί από γραμμές σε πολύγωνα, ώστε να δημιουργηθούν τα κατάλληλα εμβαδά που περικλείουν τα σημεία των συνδέσεων και να συσχετιστούν χωρικά με αυτά. Στην συνέχεια, προστίθενται οι τιμές του πληθυσμού σε κάθε ένα από τα πολύγωνα (Εικ. 48) και μετατρέπονται τα πολύγωνα σε γραμμές [1201 στοιχεία], οι οποίες

συσχετίζονται με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό του κάθε πολυγώνου που τις περικλείει και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας ιδιοτήτων (attribute table) των γραμμών αυτών (Εικ. 49).



Εικόνα 48: Τμήμα του δικτύου, όπου απεικονίζονται τα πολύγωνα με την αθροιστική τιμή του εξυπηρετούμενου πληθυσμού



Εικόνα 49: Πίνακας ιδιοτήτων γραμμών που προέκυψαν από τα πολύγωνα

Με μωβ χρώμα συμβολίζονται οι γραμμές που προέκυψαν από τα πολύγωνα και με σκούρο μπλε τα πολύγωνα με την αθροιστική τιμή του πληθυσμού. Για περαιτέρω επεξήγηση, επιλέγεται το παράδειγμα της γραμμής γαλάζιου χρώματος, για την οποία υπάρχουν δύο τιμές εξυπηρετούμενου πληθυσμού από το δεξιό ($sum_pop_right = 96$) και από το αριστερό πολύγωνο ($sum_pop_left = 21$) κατά τη φορά της γραμμής, όπου αποφασίζεται η συνάθροιση των δύο τιμών για κάθε γραμμή ($sum_pop = 117$). Στην περίπτωση που η τιμή αυτή έχει υπερτιμηθεί και δεν εξυπηρετείται το σύνολο του συναθροισμένου πληθυσμού που εκτιμήθηκε, θεωρείται ότι είναι ορθό ως προσέγγιση, διότι καλύπτεται η περίπτωση του χειρότερου δυνατού σεναρίου (worst case scenario). Τέλος, εφαρμόζοντας χωρική συσχέτιση των γραμμών με τους αγωγούς, προκύπτει ένα

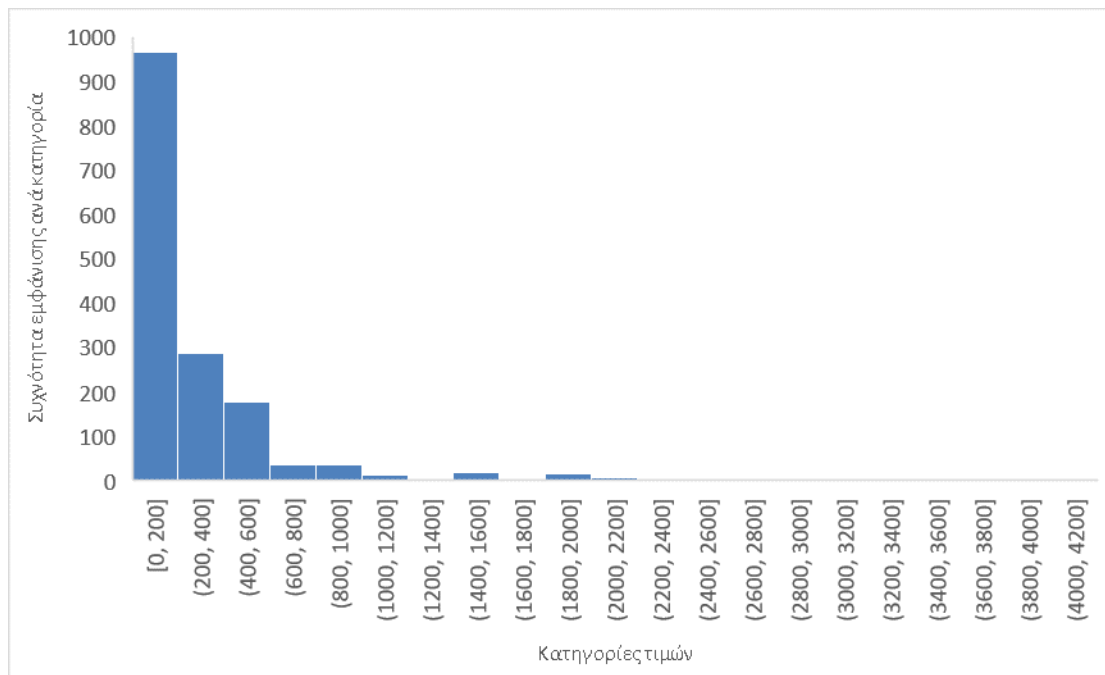
τελικό γραμμικό feature class των αγωγών με ενσωματωμένη την πληροφορία του εξυπηρετούμενου πληθυσμού.

Στο σημείο αυτό, εκτιμάται ότι δεν είναι δυνατός ο απλός υπολογισμός του ποσοστού του εξυπηρετούμενου πληθυσμού ώστε να λάβει τιμές από 0 έως και 1, διότι η κατανομή των τιμών του πληθυσμού είναι τέτοια, ώστε εφαρμόζοντας τα απλά ποσοστά καταλήγουμε σε υποτίμηση κάποιων περιοχών, καθώς δεν λαμβάνεται το βάρος που τους αντιστοιχεί. Συγκεκριμένα, αυτό συμβαίνει, διότι οι τιμές κυμαίνονται από [0, 4144], με τη μέγιστη τιμή να αντιστοιχίζεται σε έναν μοναδικό αγωγό και ακολουθούν δύο αγωγοί με τιμή 2500 κτλ., όπως φαίνεται στον Πίνακα, όπου παρουσιάζεται ένα υποσύνολο των αγωγών με τις μέγιστες τιμές πληθυσμού ταξινομημένες κατά φθίνουσα σειρά (Πίν. 27). Για παράδειγμα, για τον αγωγό με κωδικό 1042 και 1419 καταναλωτές (τελευταία τιμή στον Πίνακα), το ποσοστό προκύπτει ίσο με 0.34, ενώ τα 1419 άτομα αποτελούν μεγάλο πληθυσμό συγκριτικά με το δείγμα μας και επιθυμείται να δοθεί στον αγωγό αυτό η αντίστοιχη βαρύτητα.

Πίνακας 27: Υποσύνολο των αγωγών με τις τιμές του εξυπηρετούμενου πληθυσμού για κάθε έναν

OBJECTID	sum_pop	OBJECTID	sum_pop	OBJECTID	sum_pop
1035	4144	354	2000	533	1565
338	2500	576	2000	1202	1565
1322	2500	803	2000	310	1500
1462	2160	833	2000	441	1500
1155	2151	881	2000	476	1500
210	2105	1276	2000	498	1500
577	2105	1303	2000	522	1500
721	2105	1437	2000	763	1500
239	2062	1484	2000	841	1500
1515	2062	510	1819	948	1500
10	2000	1527	1819	1215	1500
28	2000	115	1754	1229	1500
135	2000	353	1596	1235	1500
220	2000	1137	1596	1446	1500
347	2000	1174	1596	1507	1500
352	2000	477	1565	1042	1419

Συγκεντρωτικά, οι τιμές των καταναλωτών παρουσιάζονται σε σχετικό ιστόγραμμα συχνοτήτων (Εικ. 50), όπου οι περισσότεροι αγωγοί και συγκεκριμένα οι 966 από τους 1568 συνολικά, εξυπηρετούν πληθυσμό από 0 έως και 200 άτομα, με τους 276 από αυτούς να έχουν μηδενική τιμή και να υπερτερούν. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αγωγοί με πληθυσμό μεγαλύτερο από 1000 άτομα, οι οποίοι είναι μειοψηφία και μετρούν μόλις 75 αγωγούς, συνολικά.



Εικόνα 50: Ιστόγραμμα συχνοτήτων τιμών εξυπηρετούμενου πληθυσμού

Βάσει των τιμών και της θεωρίας, εκχωρείται το μέγιστο βάρος 1 στους αγωγούς με τις δύο μεγαλύτερες τιμές, 4144 και 2500 ακολουθώντας την αισιόδοξη προσέγγιση, με τα ακόλουθα νούμερα να εκτιμώνται ως ποσοστό θεωρώντας μέγιστη τιμή τα 2500 άτομα. Ακόμα, αποφασίζεται να εκχωρηθεί ξανά το μέγιστο βάρος 1 στον αγωγό με πληθυσμό 1419 και υπολογίζεται το βάρος ως ποσοστό με μέγιστη τιμή το 1419 αυτή την φορά. Στον Πίνακα παρουσιάζονται οι αγωγοί αυτοί με πράσινο χρώμα (Πίν. 28). Μετά τον αγωγό με πληθυσμό 1419 και βάρος ίσο με τη μονάδα, εκτιμάται το βάρος για τους αγωγούς που ακολουθούν ως απλό ποσοστό, μέχρι αυτό να φτάσει την τιμή 0.50, στην οποία θεωρείται ότι γίνεται η μέγιστη ανταλλαγή μεταξύ των κριτηρίων (κανονιστική προσέγγιση), αφού λαμβάνεται βάρος ίσο με $\frac{1}{2}=0.50$ για τα δύο κριτήρια, όπου ξεχωρίζει η τιμή με κίτρινο χρώμα στον Πίνακα. Συνεπώς για τους υπολειπόμενους αγωγούς με φθίνουσα τιμή πληθυσμού, λαμβάνεται ως βάρος η τιμή 0.50.

Πίνακας 28: Υποσύνολο των αγωγών με τις τιμές του εξυπηρετούμενου πληθυσμού και το αντίστοιχο βάρος για κάθε έναν

OBJECTID	sum_pop	sum_pop_0-1	OBJECTID	sum_pop	sum_pop_0-1
1035	4144	1.00	533	1565	0.63
338	2500	1.00	1202	1565	0.63
1322	2500	1.00	310	1500	0.60
1462	2160	0.86	441	1500	0.60
1155	2151	0.86	476	1500	0.60
210	2105	0.84	498	1500	0.60
577	2105	0.84	522	1500	0.60

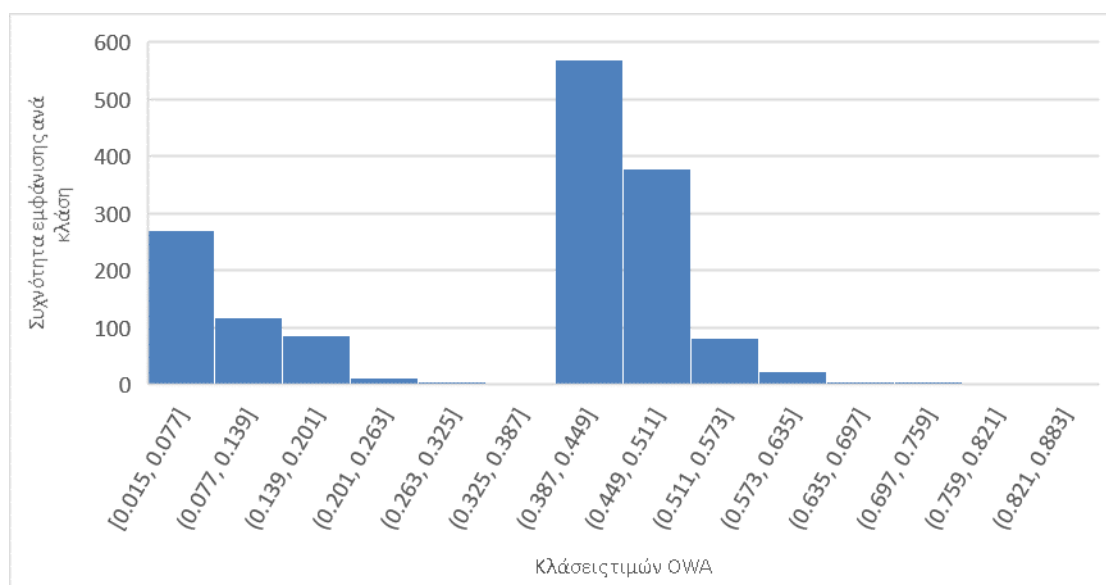
721	2105	0.84	763	1500	0.60
239	2062	0.82	841	1500	0.60
1515	2062	0.82	948	1500	0.60
10	2000	0.80	1215	1500	0.60
28	2000	0.80	1229	1500	0.60
135	2000	0.80	1235	1500	0.60
220	2000	0.80	1446	1500	0.60
347	2000	0.80	1507	1500	0.60
352	2000	0.80	1042	1419	1.00
354	2000	0.80	692	1231	0.87
576	2000	0.80	176	1227	0.86
803	2000	0.80	878	1096	0.77
833	2000	0.80
881	2000	0.80	986	719	0.51
1276	2000	0.80	1368	706	0.50
1303	2000	0.80	1570	703	0.50
1437	2000	0.80	424	698	0.50
1484	2000	0.80	1099	689	0.50
510	1819	0.73	1336	686	0.50
1527	1819	0.73	986	719	0.51
115	1754	0.70	1368	706	0.50
353	1596	0.64	1570	703	0.50
1137	1596	0.64	424	698	0.50
1174	1596	0.64	1099	689	0.50
477	1565	0.63	1336	686	0.50

Άρα, για κάθε ένα αγωγό υπάρχει τιμή τρωτότητας, κρισιμότητας (κριτήρια αξιολόγησης) και το διατεταγμένο βάρος του εξυπηρετούμενου πληθυσμού, οπότε μπορεί να υπολογιστεί ο συνδυαστικός δείκτης OWA για κάθε έναν.

Συνεπώς, όντας ήδη ταξινομημένοι οι αγωγοί κατά φθίνουσα σειρά ανάλογα με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό (sum_pop) και έχοντας αντιστοιχίσει το αντίστοιχο βάρος (weight_pop) στον καθένα, πολλαπλασιάζεται η πρώτη και μεγαλύτερη τιμή του βάρους με εκείνο το κριτήριο αξιολόγησης που έχει τη μεγαλύτερη τιμή από τα δύο και με την συμπληρωματική τιμή του βάρους (1- weight_pop) το δεύτερο κριτήριο. Το άθροισμα των δύο γινομένων ισούται με τον συνδυαστικό δείκτη OWA, ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0 έως και 1. Ο παρακάτω Πίνακας αποτελεί τμήμα του συνολικού Πίνακα αγωγών στο Ηλεκτρονικό Παράρτημα (Πίνακας Παραρτήματος 2), με τα κριτήρια αξιολόγησης, το διατεταγμένο βάρος και την τιμή του δείκτη OWA για κάθε αγωγό (Πίν. 29) και ακολουθεί το ιστόγραμμα συχνοτήτων των τιμών του δείκτη OWA για το σύνολο των αγωγών (Εικ. 51).

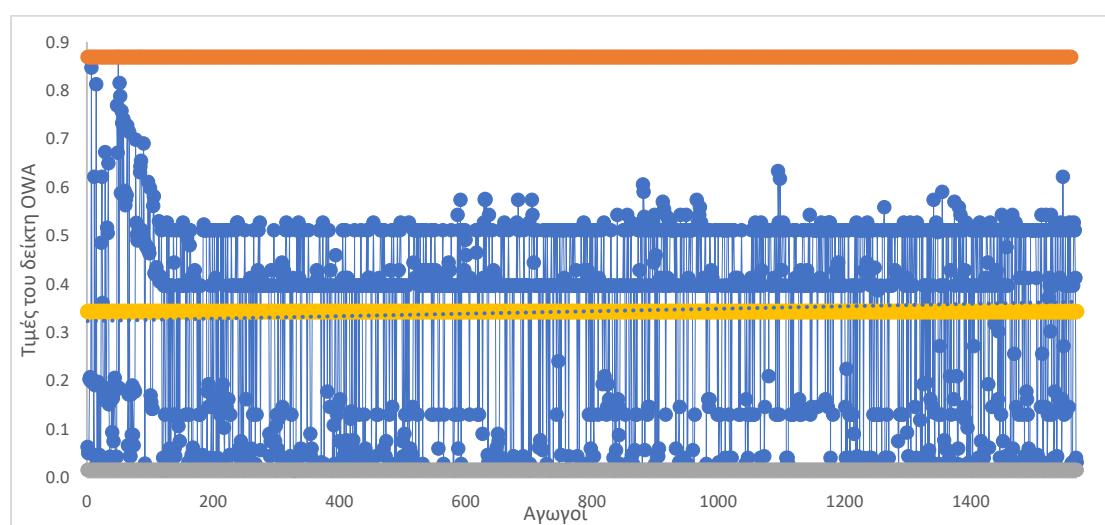
Πίνακας 29: Αρχικός κωδικός αγωγού (XTRID), κλάση (class), τιμή τρωτότητας (vuln), κρισιμότητας (criticality), εξυπηρετούμενος πληθυσμός (sum_pop), διατεταγμένο βάρος (weight_pop) και τιμή του δείκτη OWA για υποσύνολο αγωγών

OBJECTID	XTRID	class	vulnerability	criticality	sum_pop	weight_pop	OWA
1035	2244554	24	0.051	0.063	4144	1.00	0.063
338	16072443	6	0.051	0.031	2500	1.00	0.051
1322	15642432	6	0.051	0.031	2500	1.00	0.051
1462	15638822	5	0.231	0.031	2160	0.86	0.204
1155	2423655	5	0.231	0.063	2151	0.86	0.208
210	1248460	5	0.231	0.031	2105	0.84	0.199
577	15632978	3	1	0.031	2105	0.84	0.847
721	15632890	5	0.231	0.031	2105	0.84	0.199
239	15909890	5	0.231	0.031	2062	0.82	0.196
1515	1248619	5	0.231	0.063	2062	0.82	0.202
10	15642483	6	0.051	0.031	2000	0.80	0.047
28	15919847	4	0.769	0.031	2000	0.80	0.621
135	15919840	5	0.231	0.031	2000	0.80	0.191
220	2423547	5	0.231	0.063	2000	0.80	0.197
347	1248670	3	1	0.063	2000	0.80	0.813
352	14336615	2	0.026	0.031	2000	0.80	0.030
354	15909912	2	0.026	0.031	2000	0.80	0.030
576	15632914	5	0.231	0.063	2000	0.80	0.197
803	12064288	14	0.026	0.031	2000	0.80	0.030
833	1299070	24	0.051	0.031	2000	0.80	0.047
881	8737696	5	0.231	0.031	2000	0.80	0.191
1276	11946828	2	0.026	0.031	2000	0.80	0.030
1303	15642614	24	0.051	0.594	2000	0.80	0.485



Εικόνα 51: Ιστόγραμμα συχνότητας τιμών δείκτη OWA

Από το ιστόγραμμα της Εικόνας, είναι φανερό ότι οι περισσότερες τιμές έχουν συγκεντρωθεί στην κλάση $[0.38, 0.449]$ με την τιμή 0.397 να υπερτερεί σε 445 αγωγούς και με τη δεύτερη πιο συχνή τιμή το 0.511 στην κλάση $[0.449, 0.511]$ σε 356 αγωγούς. Αυτό επαληθεύεται και από το διάγραμμα διασποράς των τιμών του δείκτη OWA για το σύνολο των αγωγών ταξινομημένοι κατά φθίνουσα σειρά, βάσει του εξυπηρετούμενου πληθυσμού που παρουσιάζεται στην συνέχεια (Εικ. 52). Η μέγιστη τιμή του δείκτη είναι 0.869 και συμβολίζεται στο διάγραμμα με πορτοκαλί χρώματος ευθεία, η ελάχιστη 0.015 με ευθεία γκρι χρώματος και η μέση 0.343 με ευθεία κίτρινου χρώματος, πολύ κοντά στην τιμή 0.397 που είναι η πιο κοινή. Το ιστόγραμμα συχνοτήτων σε συνδυασμό με το διάγραμμα διασποράς εξάγουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα ως προς την κατανομή των τιμών του δείκτη, όπως ότι η μέγιστη τιμή του δείκτη είναι η 0.869 και εμφανίζεται σε έναν μοναδικό αγωγό.



Εικόνα 52: Διάγραμμα διασποράς των τιμών του δείκτη OWA για το σύνολο των αγωγών κατανομημένων σε φθίνουσα σειρά βάσει του εξυπηρετούμενου πληθυσμού

Από το διάγραμμα συμπεραίνεται ότι οι αγωγοί με τους περισσότερους καταναλωτές, δηλαδή οι πρώτοι στην κατάταξη παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές του δείκτη, κάτι που δείχνει την επιρροή του βάρους στον συνδυαστικό δείκτη.

Τέλος, είναι αναγκαία η απεικόνιση των τιμών του δείκτη για κάθε αγωγό στο περιβάλλον του ArcGIS. Ο χάρτης στην Εικόνα 53 παρουσιάζει τους κατηγοριοποιημένους αγωγούς βάσει του συνδυαστικού δείκτη OWA, ο οποίος παρουσιάζεται και στο Παράρτημα Χαρτών (Χάρτης 5).

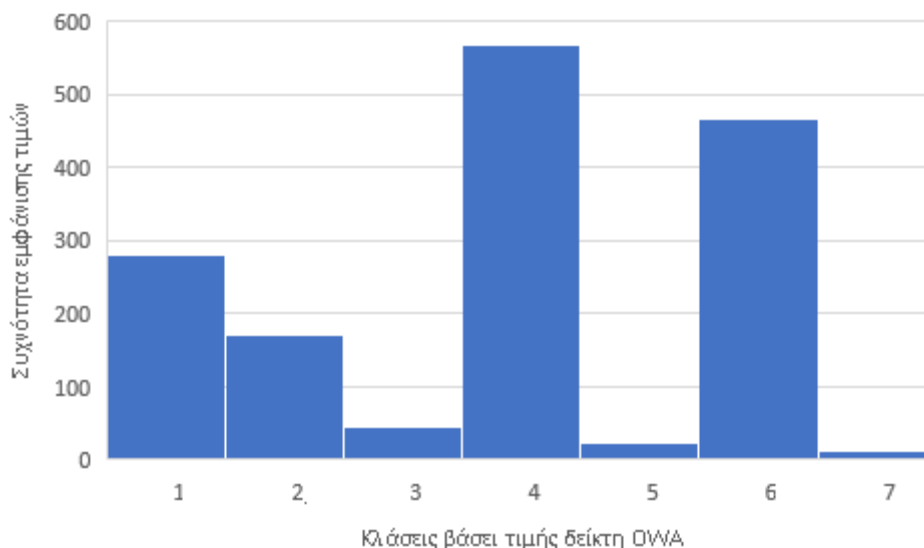


Εικόνα 53: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων τιμών του δείκτη OWA

Οι κλάσεις που δημιουργούνται είναι επτά με την χρωματική παλέτα να ξεκινάει με πράσινο χρώμα για τις μικρότερες τιμές, με κίτρινο χρώμα για τις μέσες τιμές και με πορτοκαλί και κόκκινο χρώμα για τις μεγαλύτερες τιμές.

Βάσει της κωδικοποίησης των κλάσεων, το παραπάνω ιστόγραμμα τροποποιείται όπως παρουσιάζεται στην Εικ. 54. Είναι πιο σαφής και διακριτός ο διαχωρισμός των αγωγών με τους περισσότερους να ανήκουν στην 4^η και στην 6^η κλάση.

0.015 - 0.077	→	1
0.078 - 0.164	→	2
0.165 - 0.272	→	3
0.273 - 0.444	→	4
0.445 - 0.510	→	5
0.511 - 0.672	→	6
0.673 - 0.869	→	7



Εικόνα 54: Ιστόγραμμα συχνοτήτων τιμών δείκτη OWA

Επιστρέφοντας στον σχολιασμό του θεματικού χάρτη, όπου απεικονίζονται οι αγωγοί που σε περίπτωση θραύσης, δημιουργούν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις, άρα πρόκειται για χάρτη επιπτώσεων αστικής πλημμύρας από θραύση αγωγού (flood consequence map) ή χάρτη με τις περισσότερο ευαίσθητες περιοχές του δικτύου (high risk). Επιπλέον, ο χάρτης αυτός λειτουργεί και προς την πλευρά της ασφάλειας και της πρόληψης, εξυπηρετώντας την αποφυγή του κινδύνου (risk averse) από μια τέτοια αστοχία (Makropoulos & Butler, 2006). Διακρίνονται συνεπώς οι περισσότερο ‘επικίνδυνοι’ αγωγοί, οι οποίοι είτε είναι διάσπαρτοι είτε συνεχείς, με κάποιες ομάδες αγωγών να διακρίνονται. Στην συνέχεια την εργασίας μας, θα καλούνται οι ‘επικίνδυνοι’ αγωγοί κρίσιμοι, χωρίς όμως να συγγέεται ο όρος αυτός με τον τρόπο που χρησιμοποιείται κατά το στάδιο εκτίμησης της κρισιμότητας (criticality).

6.2.2 Εναλλακτικά σενάρια και εκτίμηση κόστους αντικατάστασης αγωγών ανά σενάριο

Η κατάστροφη εναλλακτικών σεναρίων αποτελεί εφαρμογή των Χωρικών Συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, SDSS με στόχο την εύρεση του βέλτιστου σεναρίου ανάλογα με τις προϋποθέσεις και τους όρους που τίθενται. Στόχος είναι να προταθούν εκείνες οι εργολαβίες ώστε να εξασφαλίζεται από πλευράς ασφάλειας και αξιοπιστίας η λειτουργία του συστήματος. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι το λογισμικό ArcGIS σε συνδυασμό με το MS Excel. Η μεθοδολογία που ακολουθείται αναπτύσσεται στην πορεία του κεφαλαίου.

Απαραίτητη διαδικασία για την ιεράρχηση των εργολαβιών αντικατάστασης είναι η εκτίμηση του κόστους για κάθε μία. Η εκτίμηση του κόστους των εργολαβιών είναι μία

σύνθετη εργασία και αφορά πληθώρα προμετρήσεων, που ποικίλλουν ανάλογα με το εκάστοτε έργο.

Αρχικά, εκτιμήθηκε το κόστος αντικατάστασης ανά μέτρο αγωγού για την Ζώνη Μουράτη βάσει του Αναλυτικού Τιμολογίου Οικοδομικών Εργασιών (ΑΤΟΕ) και συγκεκριμένα των Περιγραφικών Τιμολογίων Εργασιών για την κατηγορία Υδραυλικών έργων (κατηγορία 2). Από εκεί επιλέχθηκε η κατηγορία τιμών «Για έργα έως και 1.5 εκατ. Ευρώ», που είναι η μικρότερη κατηγορία.

Πίνακας 30: Εκτίμηση κόστους εγκατάστασης αγωγού ανά μέτρο

ΕΡΓΑΣΙΑ	Κωδικός Αναθ/σης	€/μονάδα μέτρησης	Μονάδα μέτρησης
3. ΕΚΣΚΑΦΕΣ			
Εκσκαφή ορυγμάτων υπογείων δικτύων σε έδαφος γαιώδες ή ημιβραχώδες Με πλάτος πυθμένα έως 3,00 m, με την φόρτωση των προϊόντων εκσκαφής επί αυτοκινήτου, την σταλία του αυτοκινήτου και την μεταφορά σε οποιαδήποτε απόσταση. Για βάθος ορύγματος έως 4,00 m	NAYΔP 3.10.02.01	7.5	m ³
Προσαύξηση τιμών εκσκαφών ορυγμάτων υπογείων δικτύων για την αντιμετώπιση προσθέτων δυσχερειών από διερχόμενα κατά μήκος δίκτυα ΟΚΩ	NAYΔP 3.12	15.5	m
4. ΚΑΘΑΙΡΕΣΕΙΣ - ΑΠΟΞΗΛΩΣΕΙΣ - ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΙ - ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ			
Αποκατάσταση οδοστρωμάτων στις θέσεις ορυγμάτων υπογείων δικτύων.	NAYΔP 4.09N	18.5	m ²
5. ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ – ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΙ – ΕΞΥΓΙΑΝΣΕΙΣ			
Επιχώσεις ορυγμάτων υπογείων δικτύων με διαβαθμισμένο θραυστό αμμοχάλικο λατομείου Για συνολικό πάχος επίχωσης έως 50 cm	NAYΔP 5.05.01	12.4	m ³
Στρώσεις έδρασης και εγκιβωτισμός σωλήνων με άμμο προελεύσεως λατομείου	NAYΔP 5.07	11.3	m ³
12. ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ - ΔΙΚΤΥΑ			
Σωληνώσεις πίεσεως από σωλήνες πολυαιθυλενίου (PE) με συμπαγές τείχος κατά ΕΛΟΤ EN 12201-2	NAYΔP 12.14.01.07	10.1	m
Ονομ. διαμέτρου DN 110 mm / PN 10 atm Καμπύλες, ταυ, συστολές, πώματα κλπ, όλων των τύπων, μεγεθών, κλάσεων πίεσης λειτουργίας, κατά ΕΛΟΤ EN 545 και ΕΛΟΤ EN 598	NAYΔP 12.17.01	2.6	kg
Αντικατάσταση αγωγού παροχής ύδρευσης	NAYΔP 12.12.11N	100	τεμάχια
13. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ			
Δικλείδες χυτοσιδηρές ελαστικής έμφραξης με ωτίδες, ονομαστικής πίεσης 10 atm και ονομαστικής διαμέτρου DN100 mm.	NAYΔP MN13.03N1	260	τεμάχια
16. ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΠΙΣΚΕΥΩΝ, ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ, ΛΟΙΠΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ			
Διαμόρφωση σύνδεσης νέου αγωγού ύδρευσης από πολυαιθυλένιο (PE) σε υφιστάμενο, επίσης από PE, ο οποίος έχει απομονωθεί από το δίκτυο, με τοποθέτηση ειδικού τεμαχίου. Για διάμετρο υφισταμένου αγωγού Φ 110 mm	NAYΔP 16.19.01	103	τεμάχια
κόστος εγκατάστασης αγωγού/μ		134.75	

Από τον Πίνακα συνοψίζοντας τις επιμέρους εργασίες το κόστος αντικατάστασης ή πιο σωστά εγκατάστασης, ανά μέτρο αγωγού εκτιμάται στα 134 €/m, επιλέγοντας αγωγούς με εξωτερική διάμετρο 110 mm, Φ110, διότι έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στη Ζώνη. Μετά από σχετική επικοινωνία με την Διευθύντρια του Δικτύου Ύδρευσης της ΕΥΔΑΠ κ. Σταυρούλια, όπου ενημερώθηκα για μια μέση τιμή της τάξης των 110 €/m, η εκτιμώμενη τιμή του κόστους αντικατάστασης διαμορφώνεται στα 120 €/m ως μέση τιμή των δύο αυτών τιμών.

Αρχικά, υπολογίζεται το συνολικό μήκος και η εκτιμώμενη δαπάνη αντικατάστασης για τις τρεις κλάσεις με τις μεγαλύτερες τιμές του δείκτη OWA, ώστε να υπάρχει μια αίσθηση της τάξης των μεγεθών (Πίν. 31).

Πίνακας 31: Συνολικό μήκος και εκτιμώμενη δαπάνη αντικατάστασης για καθεμία από τις τρεις μεγαλύτερες κλάσεις

Κλάσεις δείκτη OWA	Συνολικό μήκος (m)	Εκτιμώμενη δαπάνη αντικατ. (€)
0.673 - 0.869 (κόκκινοι αγωγοί)	984	118057 ≈ 120,000 €
0.511 – 0.672 (πορτοκαλί αγωγοί)	26678	3201356 ≈ 3.2 εκατ. €
0.445 - 0.510(κίτρινοι αγωγοί)	1238	148562 ≈ 150,000 €
Σύνολο	28900	≈ 3.5 εκατ. €

Πριν προχωρήσουμε στην κατάστρωση των σεναρίων, δίνονται κάποιες πληροφορίες σχετικά με τις εργολαβίες, διότι επιθυμείται οι προτεινόμενες λύσεις να βασίζονται σε ρεαλιστικά μοτίβα που χρησιμοποιούνται κατά την ανάθεση έργων. Αρχικά, μια εργολαβία αντικατάστασης αγωγών μπορεί να περιέχει είτε διάσπαρτους αγωγούς, είτε συνεχείς, αρκεί να βρίσκονται μεταξύ κόμβων. Επιπλέον, σύμφωνα με το Ν. 4412/2016, τα Δημόσια Έργα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε εκείνα που αναθέτονται με πρόχειρο συνοπτικό διαγωνισμό και αφορούν έργα με κόστος έως και 60,000 € + ΦΠΑ και στα υπόλοιπα με κόστος άνω των 60,000 € + ΦΠΑ, για τα οποία πραγματοποιείται ανώνυμος ηλεκτρονικός διαγωνισμός.

Ακόμα, θεωρείται μη εφικτό να προκύψουν πολλές εργολαβίες με πρόχειρο διαγωνισμό, δηλαδή έως 60,000 €, που μεταφράζεται σε 500 m αντικατάστασης δικτύου, σε περιοχές που έχουν κοινή χρήση, διότι θεωρείται κατάτμηση του έργου και το έργο πρέπει να έχει ενιαίο φυσικό αντικείμενο. Εκτιμάται ότι μία Υδραυλικά απομονωμένη περιοχή, DMA αποτελεί περιοχή με κοινή χρήση.

Άρα, οι εναλλακτικές λύσεις που προτείνονται, εφαρμόζοντας τεχνικές των SDSS είναι οι παρακάτω, οι οποίες έχουν κοινό παρονομαστή το ίδιο κόστος αντικατάστασης.

6.2.2.1 Σενάριο 1^ο

Στη λύση αυτή προτείνεται να γίνει μια μεγάλη εργολαβία της τάξης των 600,000 €, που να περιλαμβάνει αντικατάσταση των περισσότερο κρίσιμων αγωγών, που βρίσκονται διάσπαρτοι σε όλη την έκταση της Ζώνης, με σειρά κατάταξης βάσει της μεγαλύτερης τιμής του δείκτη OWA. Στον Πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται οι

προς αντικατάσταση αγωγού με το αντίστοιχο μήκος τους και την εκτιμώμενη δαπάνη αντικατάστασης βάσει αυτού.

Πίνακας 32: Οι προς αντικατάσταση αγωγοί του 1^{ου} σεναρίου

Συνολικό μήκος (m)	Εκτιμώμενη δαπάνη αντικατ. (€)
5005	600,589 ≈ 600,000 €

Σύμφωνα με το θεματικό χάρτη, οι αγωγοί που υπογραμμίζονται με μαύρο χρώμα είναι αυτοί που προτείνονται για την συγκεκριμένη εργολαβία (Εικ. 55). Αναλυτικά, προτείνεται να αντικατασταθούν όλοι οι αγωγοί της μεγαλύτερης κλάσης [0.673 - 0.869] ή όπως φαίνεται στο χάρτη όλοι οι κόκκινοι αγωγοί, οι οποίοι χρήζουν άμεσης αντικατάστασης και ένα υποσύνολο της αμέσως επόμενης κλάσης [0.511 - 0.672] πορτοκαλί αγωγοί (Εικ. 55) & Παράρτημα Χαρτών (Χάρτης 6).



Εικόνα 55: Θεματικός χάρτης 1^{ου} προτεινόμενου σεναρίου αντικατάστασης

Από τον χάρτη είναι εμφανές ότι όλοι οι κόκκινοι αγωγοί έχουν αντικατασταθεί, όπως και ένα υποσύνολο από τους πορτοκαλί αγωγούς. Συνολικά, το πλήθος των προς αντικατάσταση αγωγών είναι 82 και επιλέχθηκαν αγωγοί με εύρος τιμών δείκτη [0.527, 0.869]. Αναλυτικά, ο Πίνακας με τους αγωγούς που προτείνονται για αντικατάσταση στο Σενάριο αυτό, παρουσιάζεται στο Ηλεκτρονικό Παράρτημα (Πίνακας Παραρτήματος 3).

6.2.2.2 Σενάριο 2^ο

Αναφορικά με το δεύτερο σενάριο προτείνονται δέκα εργολαβίες της τάξης των 60,000 €, στις οποίες οι αγωγοί να έχουν χωρική συνοχή, να είναι συνεχείς δηλαδή και όχι διάσπαρτοι (Πίν.).

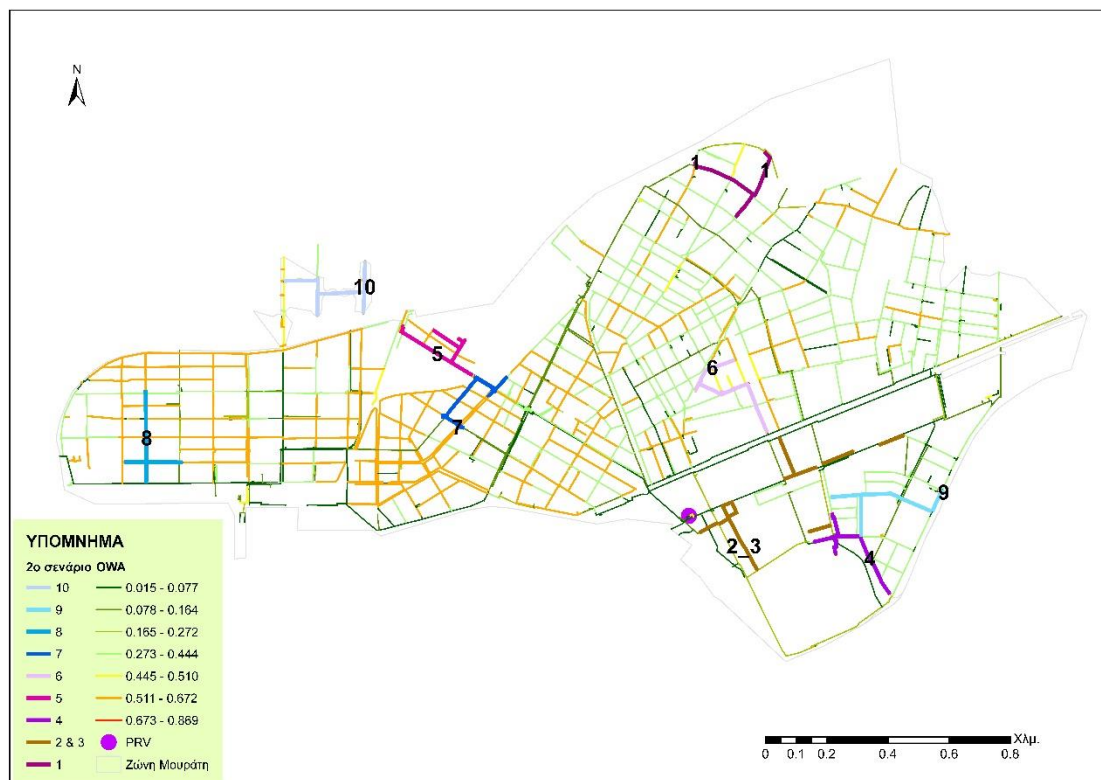
Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την δημιουργία των εργολαβιών είναι ότι εξ' αρχής ταξινομούνται οι αγωγοί βάσει της τιμής του δείκτη OWA και ορίζοντας τον πιο κρίσιμο αγωγό ως εκκίνηση, προστίθενται κατά μήκος οι συνδεδεμένοι αγωγοί με αυτόν. Ο τρόπος ορισμού της διεύθυνσης κατά την οποία θα κινηθεί η εργολαβία, ορίζεται κάνοντας σύγκριση των τιμών του δείκτη OWA των συνδεδεμένων αγωγών και επιλέγοντας εκείνο με την μεγαλύτερη τιμή του δείκτη. Αυτός ο κανόνας, αν και έχει μειονεκτήματα, όπως στην περίπτωση που μετά από έναν αγωγό με χαμηλή τιμή δείκτη μπορεί να ακολουθεί ένας αγωγός με πολύ υψηλή τιμή, ακολουθείται για την εξαγωγή των εργολαβιών. Στην περίπτωση που η τιμή του δείκτη για συνεχόμενους συνδεδεμένους αγωγούς είναι αρκετά χαμηλή, τότε υπάρχει αλλαγή κατεύθυνσης και επιλέγεται ο συνδεδεμένος με τον αρχικό αγωγός με την μικρότερη τιμή, έτσι ώστε να εξετάζονται και οι εκατέρωθεν με τον αρχικό συνδεδεμένοι αγωγοί. Για κάθε αγωγό που συμμετέχει στην εργολαβία, προστίθενται το αντίστοιχο μήκος του στον αρχικό, μέχρις ότου συμπληρωθεί η τιμή των 500 μέτρων, όπου και ολοκληρώνεται η εργολαβία. Συνεπώς, ακολουθώντας αυτή τη μεθοδολογία, συμπεριλαμβάνονται στις εργολαβίες και λιγότερο κρίσιμοι αγωγοί μαζί με τους κρίσιμους. Η εκτέλεση της γίνεται χρησιμοποιώντας συνδυαστικά εργαλεία του λογισμικού ArcGIS και του MS Excel.

Συνεπώς, για την πρώτη εργολαβία επιλέγεται ο αγωγός με τη μέγιστη τιμή του δείκτη στο σύνολο των αγωγών και θεωρείται ως εναρκτήριο για την κατά μήκος εξάπλωση της εργολαβίας. Οι δύο επόμενες εργολαβίες αποτελούν εξαίρεση, διότι δεν είναι συνεχείς, όπως είναι διακριτό και στον χάρτη (Εικ. 56), καθώς βάσει μεθοδολογίας προκύπτουν μεγάλες εργολαβίες που ξεπερνούν κατά πολύ το όριο των 500 m, αφού μεσολαβούν πολλοί μη κρίσιμοι αγωγοί μεταξύ των κρίσιμων.

Πίνακας 33: Οι προς αντικατάσταση αγωγοί για καθεμία από τις 10 εργολαβίες που προτείνονται στο 2^ο σενάριο

	Συνολικό μήκος (m)	Εκτιμώμενη δαπάνη αντικατ. (€)
Εργολαβία 1	495	59,410
Εργολαβία 2& Εργολαβία 3	980 (2 x 490)	117,597 (2 x 58,798)
Εργολαβία 4	528	63,347
Εργολαβία 5	518	62,116
Εργολαβία 6	554	66,445
Εργολαβία 7	515	61,826
Εργολαβία 8	503	60,417
Εργολαβία 9	579	69,451
Εργολαβία 10	570	68,355

Η κατάταξη των εργασιών αντικατάστασης έγινε ξεκινώντας με τους αγωγούς με τη μεγαλύτερη τιμή του συνδυαστικού δείκτη, αυτούς δηλαδή που χρήζουν άμεσης αντικατάστασης, ώστε να συμμετέχουν όλοι σε εργασίες. Οπότε στην περίπτωση που εφαρμοστεί ένα δεκαετές πλάνο, η σειρά των προτεινόμενων εργασιών που προτείνεται είναι η ανωτέρω. Αναλυτικά, οι αγωγοί που συμμετέχουν στο 2^ο σενάριο καταγράφονται σε σχετικό Πίνακα στο Ηλεκτρονικό Παράρτημα (Πίνακας Παραρτήματος 4).



Εικόνα 56: Θεματικός χάρτης 2^{ου} προτεινόμενου σεναρίου αντικατάστασης

Στην Εικόνα 56 και στο Παράρτημα Χαρτών (Χάρτης 7) παρατηρείται ότι οι 1η, 8η και η 10η εργασίες αφορούν απομακρυσμένες περιοχές από την πηγή υδροδότησης, ενώ οι 2η, 3η, 4η, 6η και 9η είναι περισσότερο κοντά σε αυτήν. Οι εργασίες 5 και 7 είναι διπλανές και αφορούν ένα πιο ανεξάρτητο τμήμα του δικτύου, όπως και η εργασία με τον αριθμό 10. Ακόμα, από τον χάρτη επαληθεύεται ότι όλοι οι κόκκινου χρώματος αγωγοί συμμετέχουν στις προτεινόμενες εργασίες.

6.2.3 Ιεράρχηση αντικατάστασης αγωγών

Έχοντας ολοκληρώσει τη διαδικασία υπολογισμού του συνδυαστικού δείκτη για κάθε αγωγό και την κατάστρωση των σχετικών σεναρίων, είμαστε σε θέση να επιλέξουμε το βέλτιστο σενάριο συγκρίνοντας τα διαφορετικά σενάρια μεταξύ τους.

Σε πρώτο επίπεδο, προκύπτει συνδυαστικός χάρτης με την απεικόνιση των εργασιών για τα δύο σενάρια (Εικ. 57) & Παράρτημα Χαρτών (Χάρτης 8). Με μαύρο χρώμα υπογραμμίζονται οι προς αντικατάσταση αγωγοί του 1^{ου} σεναρίου και με τα αντίστοιχα χρώματα που συμβολίζονται στο υπόμνημα οι δέκα προτεινόμενες εργασίες του 2^{ου} σεναρίου.



Εικόνα 57: Θεματικός χάρτης 1^{ου} σεναρίου και του 2^{ου} σεναρίου αντικατάστασης

Το πλήθος των αγωγών, το συνολικό μήκος όπως και η εκτιμώμενη δαπάνη αντικατάστασης έχουν παρόμοιες τιμές και για τα δύο σενάρια. Για την επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου, δύναται να υπολογιστεί επιπλέον το ποσοστό των κρίσιμων αγωγών που αντικαθίστανται σε κάθε ένα από τα σενάρια. Τα αναλυτικά στοιχεία για κάθε σενάριο παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίν. 34).

Πίνακας 34: Οι προς αντικατάσταση αγωγοί για το 1^ο και για το 2^ο σενάριο

	1 ^ο σενάριο	2 ^ο σενάριο
Πλήθος αγωγών	82	85
Συνολικό μήκος (m)	5005 m	5241 m
Εκτιμώμενη δαπάνη αντικατ. (€)	600,589 €	628,964 €
Ποσοστό κρίσιμων αγωγών (%)	12.3%	8.5%

Επιλέγεται το πρώτο σενάριο ως καταλληλότερο, επειδή αντικαθίστανται μεγαλύτερο ποσοστό κρίσιμων αγωγών σε σχέση με το δεύτερο.

7 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Στο σημείο αυτό, συνοψίζονται τα συμπεράσματα κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην υπό μελέτη Ζώνη.

- Αναφορικά με τα δεδομένα, η πληροφορία των θραύσεων δεν αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, καθώς δεν είναι αναγκαίο να υπάρχουν καταγεγραμμένα όλα τα συμβάντα σε όλο το μήκος του δικτύου για το οποίο επιθυμούμε να την εφαρμόσουμε. Αυτό αποτελεί σημαντική πληροφορία για τον πάροχο, καθώς περιοχές στις οποίες δεν έχουν καταγραφεί οι θραύσεις, οι αστοχίες γενικότερα, δεν αποκλείονται από τη διαδικασία εκτίμησης της τρωτότητας των αγωγών και συνεπώς ανάθεσης των κατάλληλων εργολαβιών αντικατάστασης, εφόσον προκύπτει η κατάλληλη πολυωνυμική σχέση μέσω της μεθόδου EPR.
- Από την άλλη, είναι αναγκαίο να δίνεται περισσότερη έμφαση στην συλλογή και στην οργάνωση δεδομένων σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αγωγών (μήκος, διάμετρος, ηλικία, πιέσεις, υλικό κατασκευής) (asset management) και στην ενημέρωση και σύνδεση των σχετικών βάσεων δεδομένων
- Αξιοσημείωτο είναι, όπως προαναφέρθηκε, το γεγονός ότι η λύση που επιλέγεται στο μοντέλο EPR είναι μία πολυωνυμική σχέση που δεν περιλαμβάνει την μεταβλητή του υλικού κατασκευής, μεταβλητής, που σχετίζεται με την ηλικία του αγωγού. Ωστόσο αυτή η συσχέτιση εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς δεν υπάρχει πλήρης αντιστοίχιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Εκτιμάται ότι εφόσον ήταν διαθέσιμη η πληροφορία της ηλικίας τοποθέτησης των αγωγών, θα ήταν απαραίτητο να συμμετείχε ως μεταβλητή στο βέλτιστο μοντέλο που θα επιλεγόταν.
- Δεδομένου ότι η Ζώνη Μουράτη αφορά βρογχωτό δίκτυο, αναμένεται ότι οι περισσότερες συνδέσεις θα έχουν μηδενική έλλειψη συνδεσιμότητας, λόγω των εναλλακτικών διαδρομών τροφοδοσίας από την πηγή
- Μετά από βιβλιογραφική έρευνα, συμπεραίνεται ότι το μέτρο της έλλειψης συνδεσιμότητας είναι ικανό για να προσδιορίσει το βαθμό κρισιμότητας μιας σύνδεσης, με απλό, αποτελεσματικό και αξιόπιστο τρόπο, για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης έρευνας
- Οι παράμετροι της τρωτότητας και της κρισιμότητας και κατά συνέπεια ο συνδυαστικός δείκτης OWA που προέκυψε, βοηθούν τον πάροχο να εντοπίσει τις χαμηλής αξιοπιστίας περιοχές και να ιεραρχήσει τις λειτουργίες και τα οργανωτικά σχέδια (έργα συντήρησης και αντικατάστασης), τα οποία οδηγούν στη βελτίωση της αξιοπιστίας στην παροχή υπηρεσιών.
- Έχοντας τα κατάλληλα δεδομένα, η ορθότερη προσέγγιση σχετικά με το διατεταγμένο βάρος που αφορά τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό θα ήταν ως εξής: ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός να ήταν κατανομημένος σε κάθε κόμβο του δικτύου και από εκεί να μοιραζόταν στον εκάστοτε αγωγό βάσει του μήκους του,

όπως συμβαίνει και με την εκάστοτε ζήτηση κι έτσι προκύπτει μια αναθεωρημένη συσχέτιση των εξυπηρετούμενων ατόμων ανά μέτρο αγωγού ύδρευσης.

- Η κατάσταση και σύγκριση των σεναρίων βάσει της εκτιμώμενης δαπάνης και άλλων παραμέτρων, εκτιμάται ότι μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση χρημάτων μεγαλύτερη από μια καθαρά αντιδραστική στρατηγική, κάνοντας αντικατάσταση σε έναν σημαντικά μικρότερο αριθμό αγωγών
- Γενικά, επιλέγεται μία λύση ως καταλληλότερη με γνώμονα την εξοικονόμηση χρημάτων και παράλληλα την ασφάλεια, τη λιγότερο δυνατή ταλαιπωρία των καταναλωτών με απουσία διακοπών νερού ή σύντομης διάρκειας διακοπές νερού κατά τις εργασίες (ανάλογα τις δικλείδες) και συνεπώς την καλύτερη εξυπηρέτηση των καταναλωτών

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η εργασία αυτή προτείνει μια απλή στην συλλογιστική και αρκετά αποτελεσματική μεθοδολογία ιεράρχησης αγωγών στα δίκτυα διανομής. Κατά τα στάδια εκπόνησής της, έγιναν οι απαραίτητες εκτιμήσεις τιμών μαζί με αρκετές παραδοχές και προέκυψαν προτάσεις για μία πιο βελτιωμένη προσέγγιση του προβλήματος.

Αναφορικά με το αρχικό στάδιο εκτίμησης της τρωτότητας των αγωγών, προτείνεται να εισαχθούν περισσότερες μεταβλητές εισόδου στο μοντέλο EPR ή γενικότερα κριτήρια αξιολόγησης (όπως η ηλικία, οι πιέσεις, ο τύπος του εδάφους, κ.ά χαρακτηριστικά των αγωγών που αναφέρονται αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο), μιας και το πρόβλημα ιεράρχησης αντικατάστασης αγωγών είναι πολυκριτηριακό και χρήζει πολυδιάστατης αντιμετώπισης.

Προχωρώντας στην εκτίμηση της τιμής της κρισιμότητας των αγωγών, αν και το μέτρο που χρησιμοποιείται έχει πολλά πλεονεκτήματα, ο τρόπος θραύσης των συνδέσεων είναι ντετερμινιστικός και συγκεκριμένα σειριακός. Εκτιμάται ότι θα μπορούσε να επιλεγεί μια μεθοδολογία θραύσης των αγωγών, ώστε να είναι περισσότερο ακριβής η αξιολόγηση των αγωγών βάσει κρισιμότητας, ενδεχομένως δημιουργώντας θραύσεις ανά ομάδες αγωγών. Παράλληλα, για τη βελτίωση εκτίμησης του συγκεκριμένου μέτρου, θα μπορούσε να γίνει εκχώρηση πιθανοτήτων σε κάθε αγωγό, ώστε να ενσωματωθούν επιπλέον κριτήρια αξιολόγησης, όπως οι μεγάλοι ή ευαίσθητοι καταναλωτές (π.χ. σχολεία, νοσοκομεία, κτλ.). Επιπλέον, πιθανότητες μπορούν να εκχωρηθούν στις μεταβλητές εισόδου για κάθε κλάση ταξινομημένων αγωγών, όπως η ηλικία αγωγών για παράδειγμα στο μοντέλο EPR κατά το στάδιο εκτίμησης της τρωτότητας.

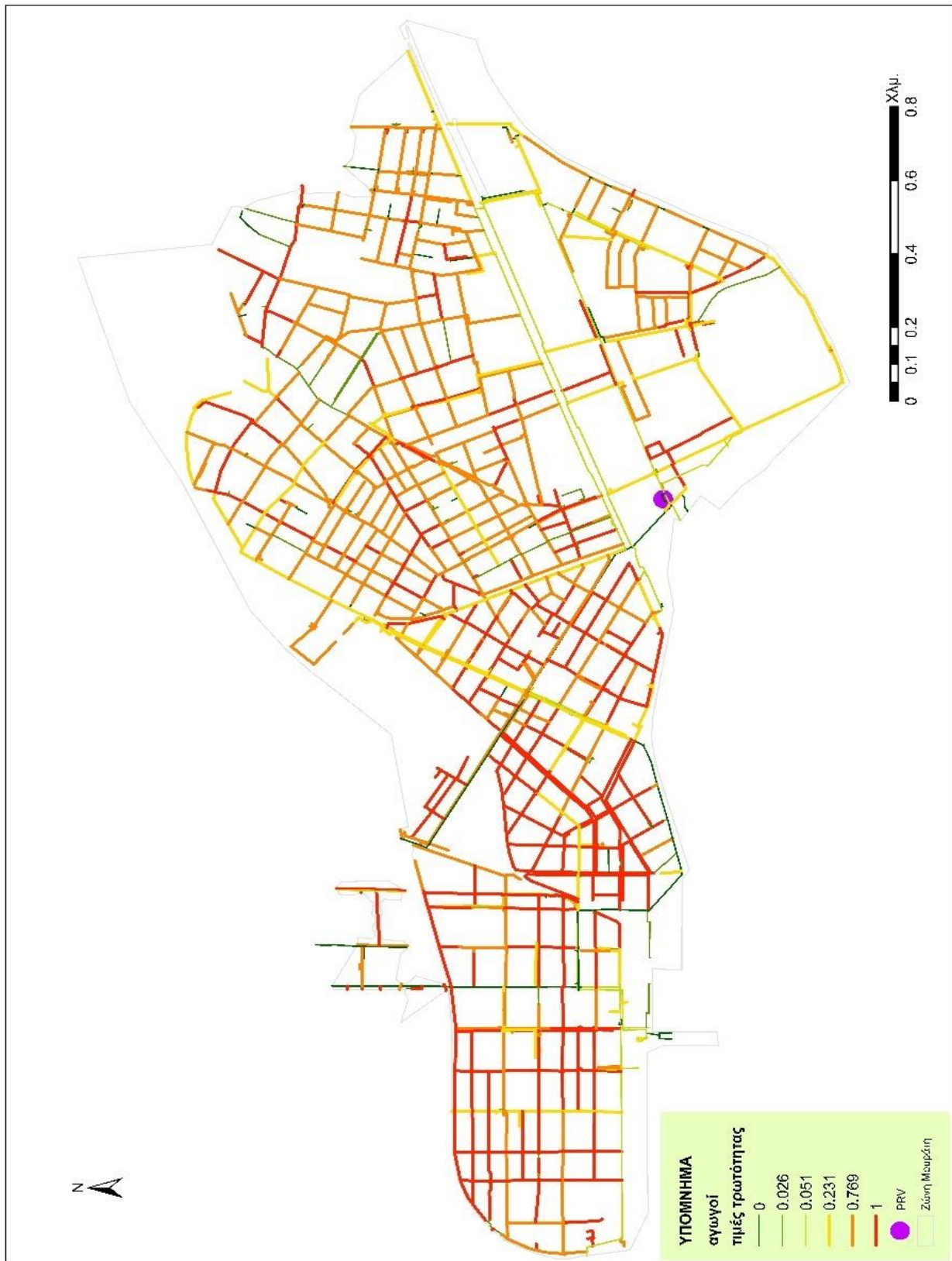
Ακόμα, επισημαίνεται ότι πολλές φορές χαμηλού επιπέδου τοπολογικές προσεγγίσεις ισχυρίζονται ότι η κατάλληλη λειτουργία του δικτύου διανομής εξαρτάται αποκλειστικά από την συνδεσιμότητα του γράφου, ενώ στην πραγματικότητα, η επαρκή λειτουργία εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες, όπως η υδραυλική πίεση και οι ενεργειακές απώλειες (Ulusoy et al., 2018). Βιβλιογραφικά, οι περισσότερες προσεγγίσεις σχετικά με την συνδεσιμότητα με τις πηγές υδροδότησης σε ένα δίκτυο διανομής, συνδυάζουν την μελέτη της τοπολογικής δομής με τις ενεργειακές απώλειες.

Γενικά, ανεξάρτητα από τη φύση της διαταραχής/αστοχίας, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της λειτουργικότητας του δικτύου μέσω μέτρων απόδοσης, ικανά να διακρίνουν τις καταστάσεις αστοχίας του δικτύου. Δεδομένης της βασικής αρχιτεκτονικής και της διανομής του δικτύου, ο χαρακτηρισμός του είναι ουσιώδης για την κατανόηση των τρόπων αστοχίας, των μηχανισμών αστοχίας, των μοντέλων ανάπτυξης αστοχιών και την μετρίαση της εξάπλωσης τους (Dueñas-Osorio et al., 2007).

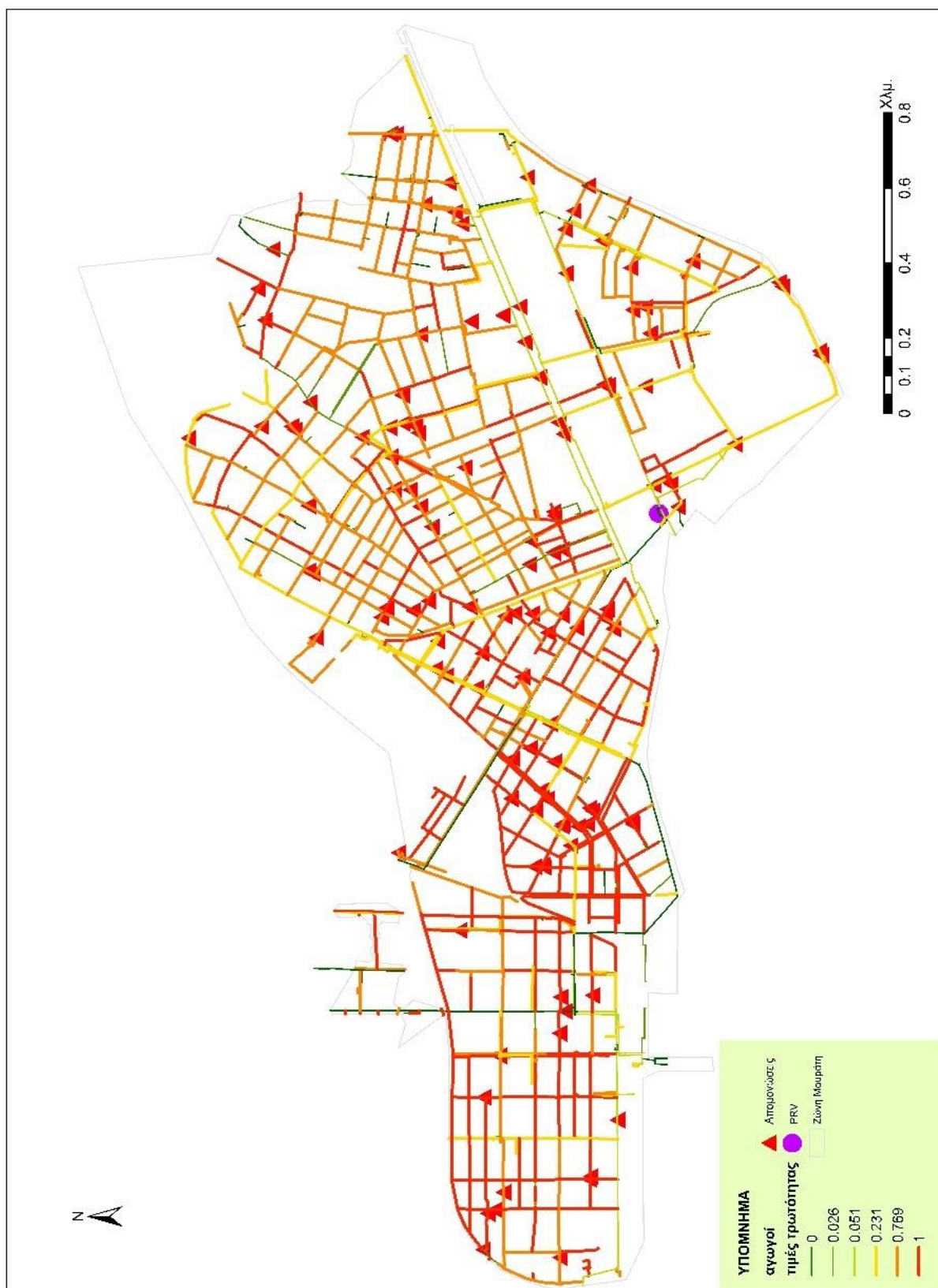
Κώδικας

```
clear all
close all
ConnectivityTableGIS='C:\Users\Stavr\Documents\Diploma_Thesis\matlab_
graph\version_2\connectivity_table_final2.csv';
M=readtable(ConnectivityTableGIS);
s=M.source;
t=M.to;
G=graph(s,t);
figure
plot(G);
nodetableGIS='C:\Users\Stavr\Documents\Diploma_Thesis\matlab_graph\ve
rsion_2\nodes_v2.csv';
N=readtable(nodetableGIS);
x=N.x;
y=N.y;
G1=graph(s,t)
figure
p=plot(G1,'XData',x,'YData',y);
nodeIDs = N.OBJECTID;
for i=1:numel(nodeIDs)
    newnodesID(i)=strcat('N',string(nodeIDs(i)));
end
newnodesID=newnodesID';
SourceNode='N2002';
for i=1:size(G1.Edges,1)
ConnectivityLoss(i,1)=i;
GRaptured = rmedge(G1,i);
ConnectivityLoss(i,2)=sum(~isfinite(distances(GRaptured,SourceNode)));
end
```

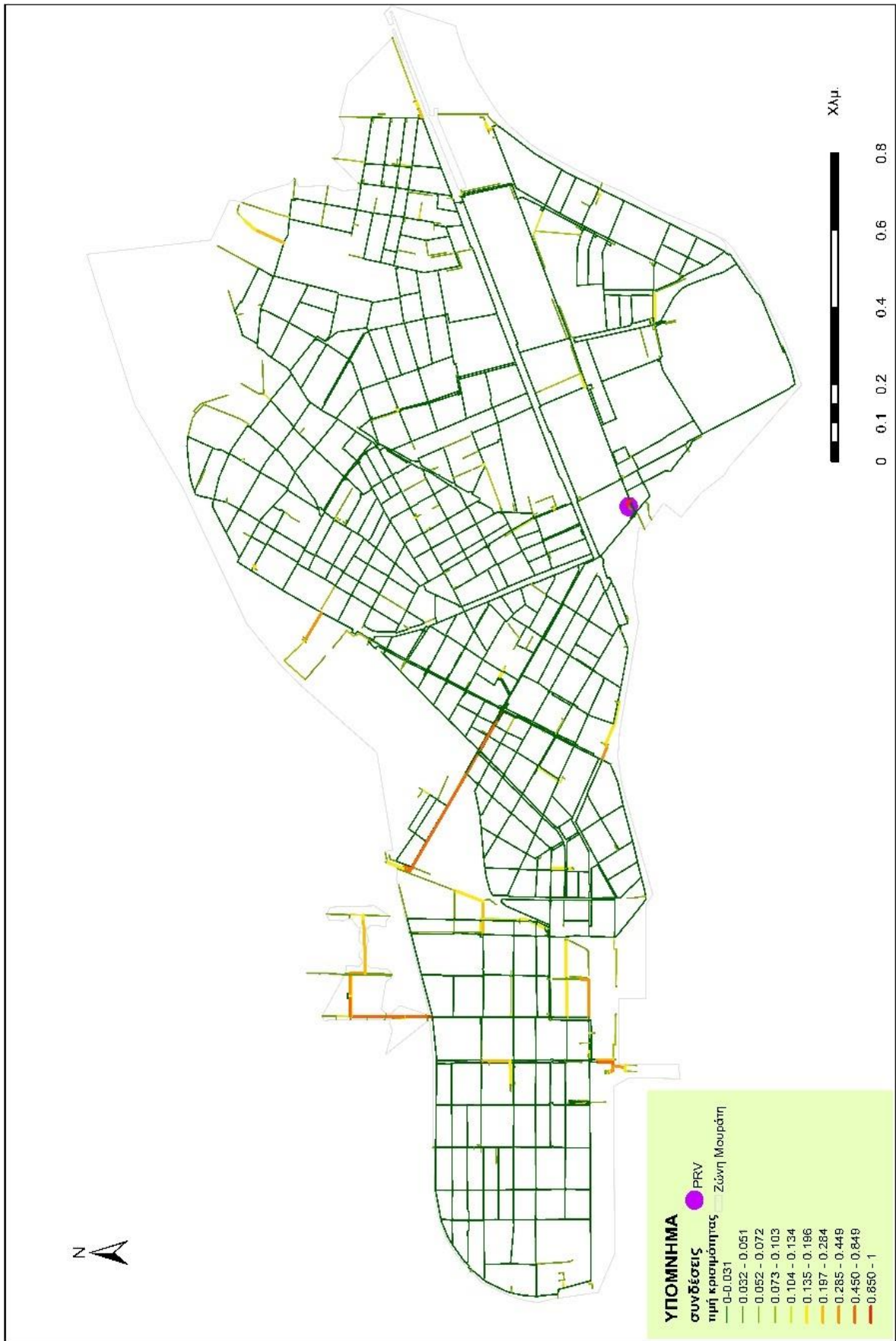

Παράρτημα Χαρτών



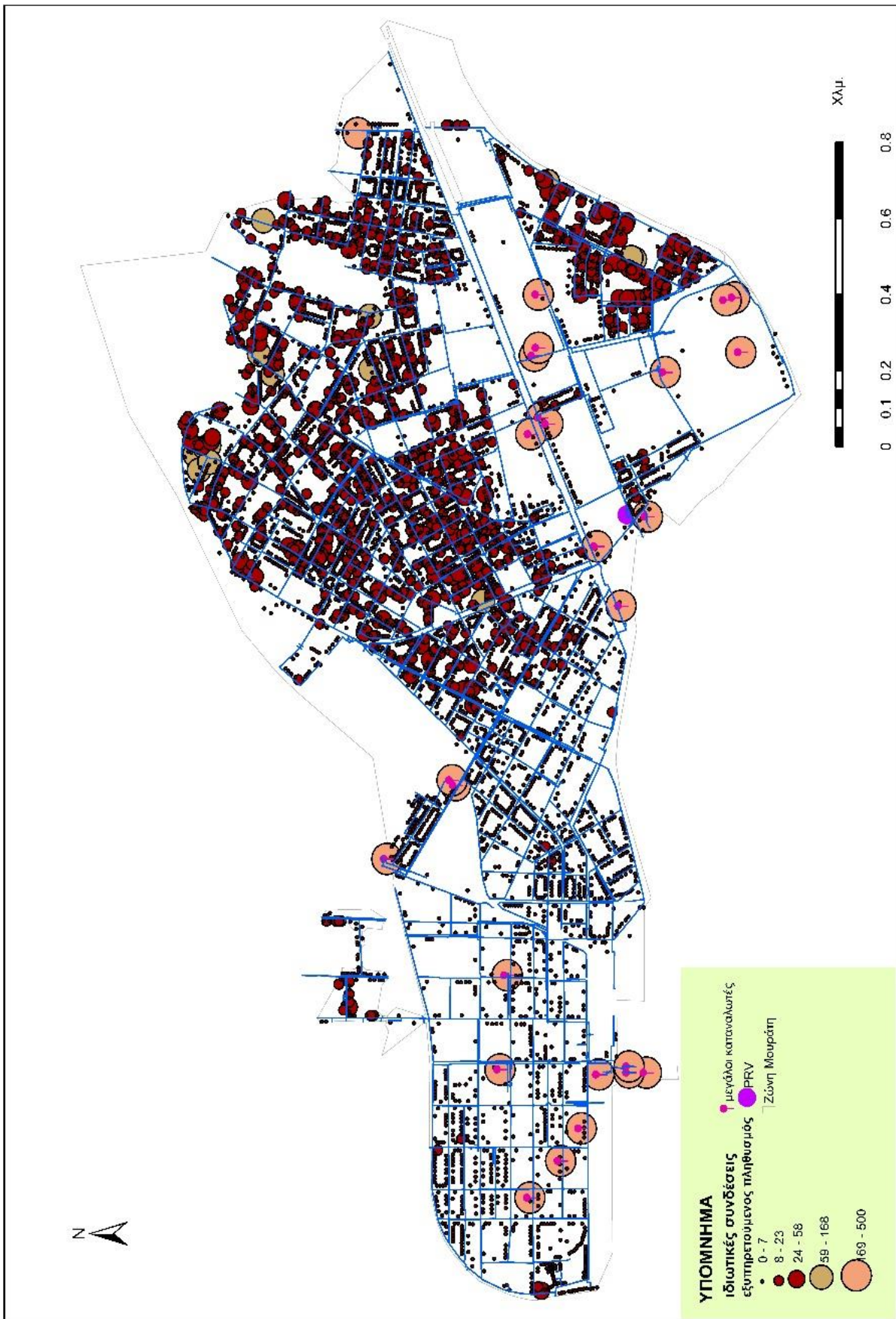
Χάρτης 1: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων αγωγών βάσει της τιμής τρωτότητας (leakage vulnerability map)



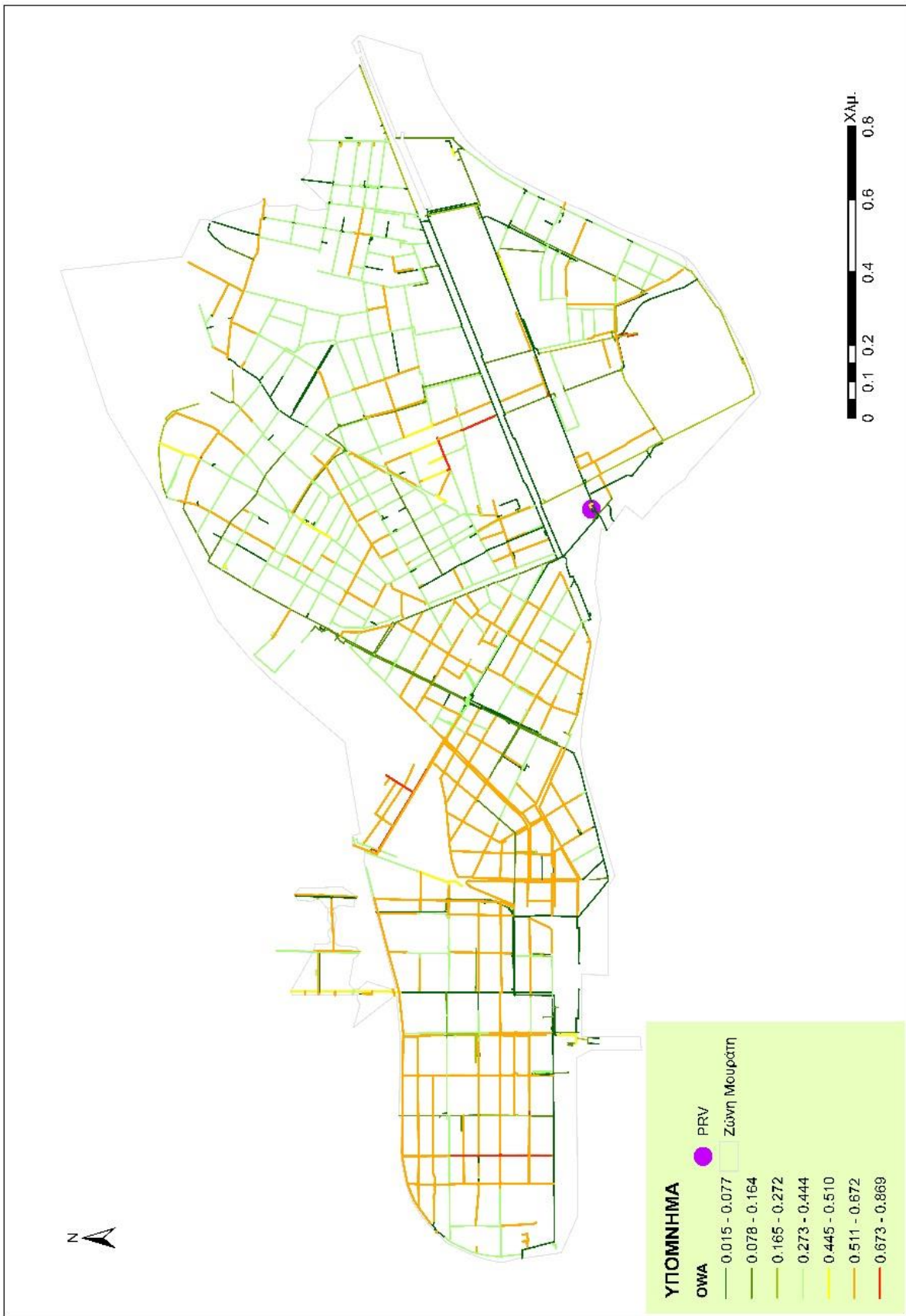
Χάρτης 2: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων αγωγών βάσει της τιμής τρωτότητας σε συνδυασμό με τις καταγεγραμμένες θραύσεις



Χάρτης 3: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης των συνδέσεων βάσει τιμής κρισιμότητας



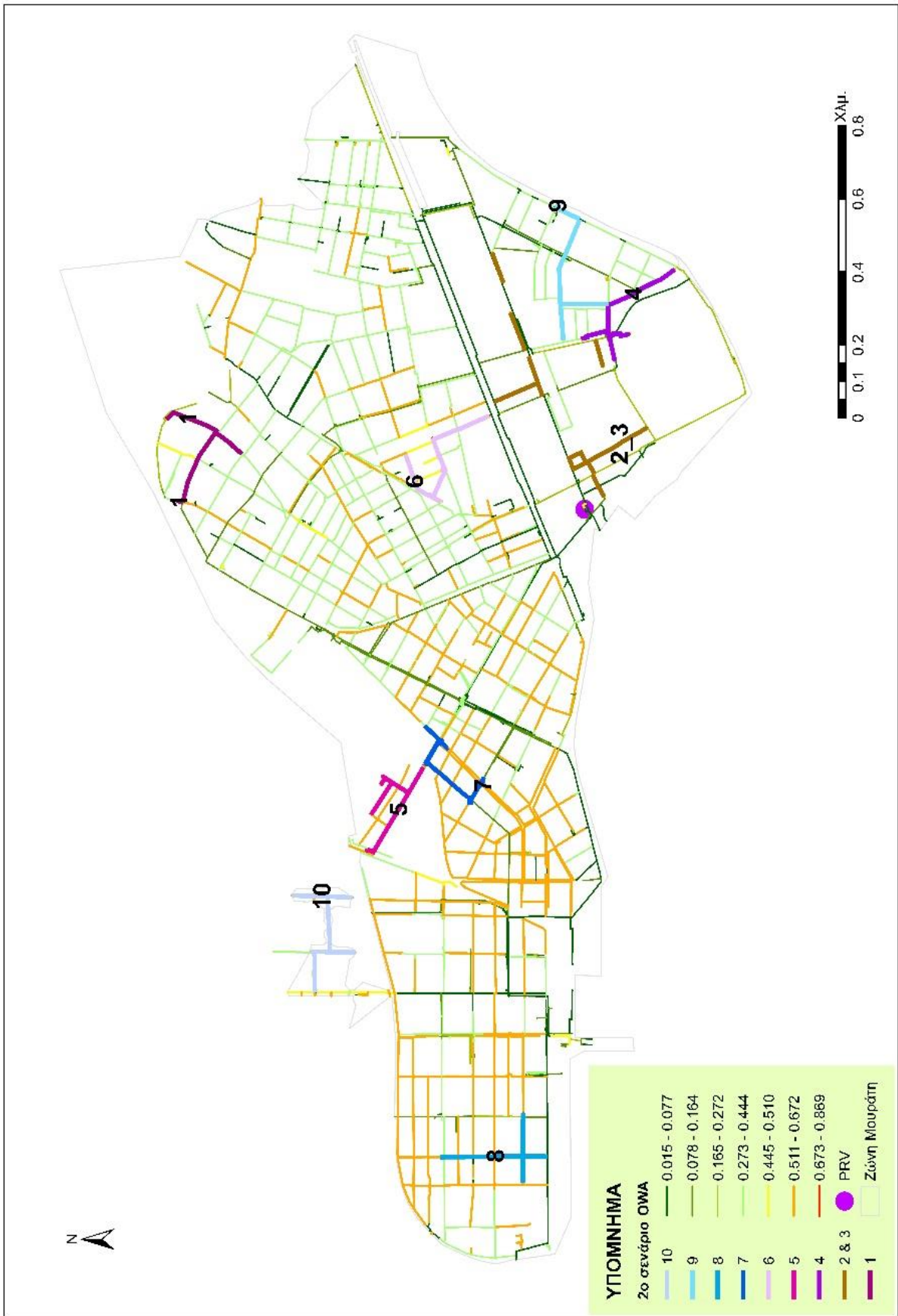
Χάρτης 4: Θεματικός χάρτης ταξινόμησης εξυπηρετούμενου πληθυσμού ανά ιδιωτική σύνδεση και μεγάλων καταναλωτών



Χάρτης 5: Θεματικός χάρτης κατηγοριοποιημένων τιμών του δείκτη OWA



Χάρτης 6: Θεματικός χάρτης 1^{οο} προτεινόμενου σεναρίου αντικατάστασης



Χάρτης 7: Θεματικός χάρτης 2^ο προτεινόμενου σεναρίου αντικατάστασης

Ξενογλώσση Βιβλιογραφία

Albert R., Albert I. and Nakarado G. (2004). *Structural vulnerability of the North American power grid*. Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 69(2 2), [025103]. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.025103>

Berardi L., Giustolisi O., Kapelan Z. and Savic D. A. (2008). *Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR*. Journal of Hydroinformatics 10(2):113-126. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: https://www.researchgate.net/publication/235694724_Development_of_pipe_deterioration_models_for_water_distribution_systems_using_EPR

Çelebi, O. C. (2014). *Neural Networks and Pattern Recognition Using MATLAB*. Tutorial. Chapter 1. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: http://www.byclb.com/TR/Tutorials/neural_networks/Index.aspx

Duda, R.O., Hart, P.E., Stork, D.G. (2001). *Pattern Classification*, Second edition John Wiley & Sons, New York. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.320.4607&rep=rep1&type=pdf>

EPR-MOGA-XL Userguide

EPA (2005)

Giustolisi, O., and Savic, D.A. (2006). *A Symbolic Data-driven Technique Based on Evolutionary Polynomial Regression*. Journal of Hydroinformatics, IWA-IAHR Publishing, UK, 8(3): 207-222.

Giustolisi, O., Doglioni, A., Savic, D.A., Webb, B. (2007). *A Multi-Model Approach to Analysis of Environmental Phenomena*. Environmental Modelling & Software, Elsevier Sc., Netherlands, 22(5), 674 – 682.

Giustolisi, O., Doglioni, A., Savic D.A, Di Pierro, F. (2008). *An evolutionary multi-objective strategy for the effective management of groundwater resources*. Water Resources Research, vol. 44, W01403 (14 pp).

Giustolisi, O., and Savic, D.A. (2009). *Advances in Data-Driven Analyses and Modelling Using EPR-MOGA*. Special Issue on Advances in Hydroinformatics, Journal of Hydroinformatics, IWA-IAHR Publishing, UK, 11(3): 225-236.

Giustolisi, O., Berardi, L., Walski, T.M. (2011). *Some explicit formulations of Colebrook-White friction factor considering accuracy vs. computational speed*. Journal of Hydroinformatics, IWA-IAHR, UK. (in press).

Herrera M., Abraham E. and Stoianov I. (2015). *Graph-theoretic surrogate measures for analysing the resilience of water distribution networks*. 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015, Procedia Engineering 119 (2015) 1241 – 1248.

Keenan P.B. (2003). *Decision Making Support Systems: Achievements trends and challenges for the New Decade*. Chapter III,., Publisher: Idea Group Publishing, Editors: Mora M., Forgionne G. A. and Gupta J. N. D. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://mis.ucd.ie/Members/pkeenan/Working%2520papers/sdmss.pdf>

Kingdom B., Liemberger R. & Marin P. (2006). *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries. How the Private Sector can Help: A Look at Performance Based Service Contracting*. Water Supply and Sanitation Board Discussion Paper Series, Paper No.8., Washington DC, USA: The World Bank. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://siteresources.worldbank.org/INTWSS/Resources/WSS8fin4.pdf>

Lippai I. and Wright L. (2005). *Criticality Analysis Case Study: Zone 7 Water Distribution System*. Conference paper, Pipeline Division Specialty Conference 2005, August 21-24, 2005, Houston, Texas, United States. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: [https://doi.org/10.1061/40800\(180\)53](https://doi.org/10.1061/40800(180)53)

Makropoulos C. K. & Butler D. (2005). *A neurofuzzy spatial decision support system for pipe replacement prioritization*. Urban Water Journal, 2:3, 141-150. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://doi.org/10.1080/15730620500236674>

Moglia M., Burn S. and Meddings S. (2005). *Decision support system for water pipeline renewal prioritization*. Journal of Information Technology in Construction, Vol. 11, pg. 237-256. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.itcon.org/paper/2006/18>

Puust R., Kapelanb Z., Savicb D.A. and Koppe T. (2010). *A review of methods for leakage management in pipe networks*. Research Article, Urban Water Journal, Vol. 7, No. 1, February 2010, pages: 25–45. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: https://www.researchgate.net/publication/235694708_A_review_of_methods_for_leakage_management_in_pipe_networks

Saleeb H. (2006). *Data Mining: Classification*. Lectures Notes, NYU -Computer Science Department. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.cs.nyu.edu/courses/spring06/G22.3033-010/7class.ppt>

Sadavare A. B. and Kulkarni Dr. R. V. (2012). *A Review of Application of Graph Theory for Network*. (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 3 (6).

Sigut M., Alayon S. and Hernandez E. (2014). *Applying pattern classification techniques to the early detection of fuel leaks in petrol stations*. Journal of Cleaner

Production, Volume 80, pages: 262-270. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005484>

Soldi D., Candeliera A. and Archettia F. (2015). *Resilience and vulnerability in urban water distribution networks through network theory and hydraulic simulation*. 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015, Procedia Engineering 119 (2015), pages: 1259 – 1268.

Tabesh M., Soltani J., Farmani R. and. Savic D. A. (2009). *Assessing Pipe Failure Rate and Mechanical Reliability of Water Distribution Networks Using Data Driven Modelling*, Journal of Hydroinformatics Vol. 11, Issue 1, pages: 1-17. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://iwaponline.com/jh/article/11/1/1/30994/Assessing-pipe-failure-rate-and-mechanical>

Tan P., Steinbach M., Karpatne A. and Kumar V. (2005). *Introduction to Data Mining*. Chapter 4, Lectures Notes, Pearson Edition, Second Edition.

International Water Association, 2000.

International Water Association (2016). *Water Utility Pathways in a Circular Economy. Technical Report*.

The Corporation of the City of London Environmental and Engineering Services, (2014). *City of London Development of City, Wide DMAs Comparison of Business Case with Draft DMA Design. Appendix B: District Metering Area Operation Report. & Appendix E: Comparison of Business Case with Draft DMA Design*.

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

Βλαχάβας Ι., Κεφαλάς Π., Βασιλειάδης Ν., Κόκκορας Φ. και Σακελλαρίου Η. (2011). *Τεχνητή νοημοσύνη - Κεφάλαιο 18: Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)*. Διδακτικές Παρουσιάσεις. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Μακεδονίας, Β' Έκδοση, Θεσσαλονίκη. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://aibook.csd.auth.gr/include/slides/Chap18.pdf>

Ευστρατιάδης Α. και Κουτσογιάννης Δ. (2006). *Τυπικά Υδραυλικά Έργα - Μέρος 2: Δίκτυα Διανομής. Εισαγωγή στα δίκτυα διανομής, Υπενθύμιση εννοιών από την υδραυλική δικτύων υπό πίεση*, Διδακτικές Σημειώσεις, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/717/>

Ευστρατιάδης Α., Καραβοκυρός Γ., και Μαμάσης Ν. (2009). *Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας - Έτος 2009. Έργο: Συντήρηση, αναβάθμιση και επέκταση του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για την διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ*. Τεύχος 1, σελίδες 116, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ζαφειράκου Α. (2013). *Υδρεύσεις. Παρουσίαση 1η. Διδακτικές Σημειώσεις Υδρεύσεις – Αποχετεύσεις – Αρδεύσεις*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Κανακούδης Β. (χ.χ.). *Διαχείριση και Προσομοίωση Υδροδοτικών Συστημάτων - Ενότητα 1: Διαχείριση Υδροδοτικών Συστημάτων – Εισαγωγή*. Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Κανακούδης Β., Τσιτσιφλή Σ. (2015). *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Αστικών Δικτύων Υδρευσης*. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κανακούδης Β. (2016). *Προτεινόμενη μεθοδολογία αύξησης της αποδοτικής και της ανταποδοτικής χρήσης του νερού στα δίκτυα ύδρευσης των ΔΕΥΑ*. Παρουσίαση σε Δημερίδα ΔΕΥΑΛ και ΕΔΕΥΑ «Ενιαία εφαρμογή Υδατικού Ισοζυγίου και αξιοποίηση νέων τεχνολογιών στα δίκτυα των ΔΕΥΑ», Λάρισα, 7-8 Απριλίου 2016.

Λύκας Α. (2016). *II. Μάθηση με παραδείγματα – Δέντρα Απόφασης*. Διδακτικές Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνητή νοημοσύνη», Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.cs.uoi.gr/~arly/courses/ai/slides/>

(1) Μακρόπουλος Χ. (χ.χ.). *Διαχείριση του Νερού στην Πόλη: κλείνοντας τον κύκλο*. Διδακτικές Σημειώσεις. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

(2) Μακρόπουλος Χ. (χ.χ.). *Διαχείριση Αστικού Νερού: Μια διαφορετική ματιά στις υποδομές και τις υπηρεσίες αστικού νερού*. Διδακτικές Σημειώσεις. Urban Water Management and Hydroinformatics Group.

Μακρόπουλος Χ., και Ευστρατιάδης Α. (2011). *Βαθμονόμηση μαθηματικών μοντέλων – Το «αντίστροφο» πρόβλημα της υδρολογίας. Τοπικές και ολικές τεχνικές βελτιστοποίησης*. Διδακτικές Σημειώσεις μαθήματος «Βελτιστοποίησης Συστημάτων Υδατικών Πόρων – Υδροπληροφορική», Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μακρόπουλος Χ. (2017). *Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Διδακτικές Σημειώσεις, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μακρόπουλος Χ. (2017). *Αστικά Υδραυλικά Έργα: Η αστική ζήτηση και η διαχείρισή της*. Διδακτικές Σημειώσεις. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4412/2016. «Δημόσιες Συμβάσεις Έργων, Προμηθειών και Υπηρεσιών (προσαρμογή στις Οδηγίες 2014/24/ΕΕ και 2014/25/ΕΕ).

Παιδούση Ε. (2016). *Δέντρα αποφάσεων*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία. Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Μαθηματικά των Υπολογιστών και των Αποφάσεων, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής και Τμήμα Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Πατρών. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10829/3/Nemertes_Paidousi%28math%29.pdf

Στρατηγέα Α. (2015). *ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ*. Διδακτικές Σημειώσεις μαθήματος «Αξιολόγηση στο σχεδιασμό του χώρου», Τομέας Γεωγραφίας και Περιφερειακού Σχεδιασμού, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τερζοπούλου Α. (2015). *Μέθοδοι Ταξινόμησης και Παλινδρόμησης για την Πρόβλεψη και την Ανίχνευση Μοτίβων σε Δεδομένα Ακαδημαϊκών Επιδόσεων*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Διατμηματικό-Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://search.lib.auth.gr/Record/ikee-281642>

Τοπολογία δικτύου, Μερικώς καταναεμημένη τοπολογία,. (χ.χ). Σχολιασμός.

Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο:

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%BF%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1_%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CF%84%CF%8D%CE%BF%CF%85