

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΕΝΑΝΤΙ
ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ

ΣΟΥΛΗΣ Ι. ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους με βοήθησαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας. Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Φραγκιαδάκη Μιχάλη για την αμέριστη συμπαράσταση, τη συνεχή καθοδήγηση του, καθώς και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην αδερφή μου και συνάδελφο Πολιτικό Μηχανικό, Χαρίκλεια, για το έμπρακτο ενδιαφέρον της, το κίνητρο που μου δίνει να συνεχίσω και για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις της και στους γονείς μου Ιωάννη και Ελένη για την ενθάρρυνση κατά τη διάρκεια όλων των φοιτητικών μου χρόνων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, πολλοί εκ των οποίων συμφοιτητές, για τη βοήθεια και την ανιδιοτελή αγάπη τους κατά τη διάρκεια των φοιτητικών και όχι μόνο χρόνων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται το θέμα της αξιοπιστίας και της προσαρμοστικότητας των αστικών δικτύων ύδρευσης υπό ομοιόμορφη σεισμική φόρτιση σε όλη την έκταση του δικτύου και συγκεκριμένα με τη χρήση της παραμέτρου PGV, που δηλώνει τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα λόγω σεισμού και αμελώντας τις υπόλοιπες σεισμικές παραμέτρους. Προκειμένου να εκτιμηθεί η αξιοπιστία ή αντίστοιχα η πιθανότητα αστοχίας των κόμβων του δικτύου, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις των American Lifelines Alliance Guidelines (ALA, 2001), που υπολογίζουν το ρυθμό επισκευής και κατ' επέκταση τις πιθανότητες αστοχίας των αγωγών και πραγματοποιείται ανάλυση με γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς (MATLAB) και συγκεκριμένα με αλγόριθμο, βασισμένο στη προσομοίωση Monte Carlo από Christodoulou S.E. & Fragiadakis (2014). Επίσης, αναλύονται γραφικές μέθοδοι εκτίμησης αξιοπιστίας και συγκεκριμένα η Μέθοδος Απαρίθμησης Διαδρομών και η Μέθοδος Ελαχίστων Τομών και εφαρμόζονται σε ένα απλό μοντέλο δικτύου. Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, χρησιμοποιούνται οι δείκτες ικανότητα εξυπηρέτησης (SR: Serviceability Ratio), προσαρμοστικότητα (Resilience) και η στιβαρότητα (Robustness) του δικτύου, που φανερώνουν τη λειτουργικότητα και απόδοση του δικτύου μετά από σεισμό και εκτελούνται αναλύσεις με διαφορετικούς ρυθμούς επισκευής αγωγών μέχρι να αποκατασταθεί όλο το δίκτυο και να γίνει επαναφορά της αρχικής του, πριν το σεισμό, λειτουργικότητας. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε χάρτες κατανομής πιθανοτήτων αστοχίας (heat maps), σε γραφήματα SR-Χρόνος, Προσαρμοστικότητα-PGV και Στιβαρότητα-PGV, που προέκυψαν από την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας στα δίκτυα ύδρευσης της Νέας Αρτάκης και της Λευκάδας.

ABSTRACT

This thesis investigates the reliability and resilience of urban water networks under uniform seismic loading throughout the network, in particular by using the PGV parameter, indicating the Peak Ground Velocity due to earthquake and neglecting the other seismic parameters. In order to evaluate the reliability or the probability of failure of the network nodes, the relationships of the American Lifeline Alliance Guidelines (ALA, 2001) are used, that calculate the probabilities of pipeline failure and analysis is executed with fourth generation programming language MATLAB and specifically with an algorithm based on the Monte Carlo simulation by Christodoulou & Fragiadakis (2014). Furthermore, Graph theory methods, assessing the network reliability, are also analyzed, namely the Path Enumeration Method and the Minimum Cut-set Method, which are applied to a simple network model. In this thesis, the indices Serviceability Ratio (SR), Resilience and Robustness of the network are used to demonstrate the network's functionality after an earthquake, and analyzes with different pipe repair rates are performed until the entire network is recovered to its original, before the earthquake, functionality level. The results are shown in heat maps, in SR-Time, Resilience-PGV and Robustness-PGV graphs, arising from the application of the above methodology to the water supply networks of Nea Artaki and Lefkada.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	8
1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	8
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ.....	10
1.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ	12
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΟΥ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ	12
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	13
2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ	24
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΟΥ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ.....	24
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ	24
3.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΑΡΙΘΜΗΣΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ	24
3.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΟΜΩΝ	30
3.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΟΝΤΕ CARLO	32

3.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ		42
4.1	ΑΠΛΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΟ MATLAB.....	42
4.2	Η ΜΕΘΟΔΟΣ GIS ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ARCMAP	44
4.3	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕΣΩ ΑΡΧΕΙΩΝ DXF	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ.....		51
5.1	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	51
5.2	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	54
5.3	ΕΝΝΟΙΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ.....	56
5.4	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ	57
5.5	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ		62
6.1	ΒΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΟΝΤΕ CARLO	62
6.2	ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΝΕΑΣ ΑΡΤΑΚΗΣ	66
6.2.1	ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ	66
6.2.2	ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	69
6.2.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΡΥΘΜΟΥΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΑΓΩΓΩΝ.....	74

6.2.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ PGV ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ SR-ΧΡΟΝΟΥ.....	79
6.3	ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ.....	82
6.3.1	ΕΠΙΛΟΓΗ DMA ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ	82
6.3.2	ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	84
6.3.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ, ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	91
7.1	ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΝΕΑΣ ΑΡΤΑΚΗΣ	91
7.2	ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ.....	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Τα δίκτυα υποδομής είναι ζωτικής σημασίας για μια κοινωνία, καθώς παρέχουν ενέργεια, πόσιμο νερό, διαχειρίζονται τα απόβλητα και προσφέρουν υπηρεσίες μετακίνησης και επικοινωνίας μεταξύ των κατοίκων της. Ο ρόλος τους είναι ακόμα περισσότερο σημαντικός στις σύγχρονες ανεπτυγμένες κοινωνίες, όπου οι συνθήκες ζωής και οι οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες απαιτούν ένα αξιόπιστο και πολυδιάστατο σύστημα υποδομών. Μάλιστα, σε αστικές περιοχές με μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα και οικιστική ανάπτυξη, όπου λαμβάνουν χώρα διοικητικές, εμπορικές και βιομηχανικές δραστηριότητες, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη σεισμικής θωράκισης των δικτύων υποδομής και γενικότερα προστασίας τους από καταστροφικά γεγονότα για την απρόσκοπτη λειτουργία τους. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει να γίνει εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των δικτύων, μεμονωμένα αλλά και ως σύνολο και οι αρμόδιοι φορείς να έχουν καταστρώσει ένα ολοκληρωμένο στρατηγικό σχέδιο μείωσης των επιπτώσεων από ένα σεισμό, καθώς και ανάληψης δραστηριοτήτων για την επισκευή τυχόν βλαβών, που θα προκληθούν.

Στην Ευρώπη, ελάχιστες προσπάθειες έχουν γίνει μέχρι στιγμής για την ανάπτυξη μιας αξιόπιστης μεθοδολογίας, που θα εκτιμά τη σεισμική τρωτότητα δικτύων υποδομής, όπως ένα δίκτυο ύδρευσης, μέσα σε αστικές περιοχές με σεισμική διακινδύνευση. Επίσης, η έντονη σεισμική δραστηριότητα, κυρίως στη νότια Ευρώπη δε συμβαδίζει με τις λίγες ερευνητικές εργασίες, που έχουν γίνει στο κομμάτι της αξιοπιστίας και κατ' επέκταση προσαρμοστικότητας των δικτύων υποδομής μετά από σεισμό. Η μεγάλη πολυπλοκότητα και αλληλεξάρτηση, το μέγεθος, η χωρική μεταβλητότητα, οι διαφορές στη λειτουργία των δικτύων υποδομής, καθώς και η έλλειψη αρχείου καταγραφής περασμένων συμβάντων και οι δυσκολίες για ανταλλαγή των απαιτούμενων δεδομένων και πληροφοριών αποτελούν εμπόδια για την εδραίωση των ερευνητικών προσπαθειών, στο πλαίσιο της Ευρώπης.

Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα RISK-UE "An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European towns" ("Μια προχωρημένη προσέγγιση σε σενάρια σεισμικού κινδύνου, με εφαρμογές σε διάφορες ευρωπαϊκές πόλεις"), χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και αποτελεί ένα μεγάλο βήμα στην κατεύθυνση της διαμόρφωσης μια κοινώς αποδεκτής μεθοδολογίας εκτίμησης και μετριάσμου του σεισμικού κινδύνου, αντικατοπτρίζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και την τεχνογνωσία πάνω στα δίκτυα υποδομής της Ευρώπης και προτείνοντας οδηγίες για το πώς μπορούν να επιλυθούν καταστάσεις, που συνεπάγονται άμεσες και έμμεσες απώλειες μετά από ένα σεισμό, καθώς και για τις ενέργειες μείωσης των βλαβών και άμεσης επισκευής τους. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν οι επικαιροποιημένες και καθολικά αποδεκτές οδηγίες των ALA (American Lifeline Alliance), που αναφέρουν μεθόδους εκτίμησης τρωτότητας στοιχείων δικτύων ύδρευσης (αγωγούς κ.α.), που βασίζονται σε στατιστικά δεδομένα από περασμένους σεισμούς και τις επιπτώσεις αυτών.

Τα δίκτυα ύδρευσης είναι γεωγραφικά εκτεταμένα συστήματα, διασχίζοντας πολλούς γεωλογικούς σχηματισμούς και μπορεί να υποστούν στη διάρκεια της ζωής τους ζημιές και μείωση στο επίπεδο εξυπηρέτησης, υποβαλλόμενα σε ένα ισχυρό σεισμό. Η προσαρμοστικότητα ενός δικτύου ύδρευσης εξαρτάται από το μέγεθος των απωλειών και το χρόνο, που απαιτείται για να αποκατασταθούν οι υπηρεσίες. Η εκτίμηση και η επίδραση της στην προσαρμοστικότητα της κοινωνίας (Community Resilience) απαιτεί την κατανόηση: (1) της γεωγραφικής κατανομής του δικτύου ύδρευσης, των λειτουργικών του δυνατοτήτων και των πόρων που διαθέτει, (2) της γεωγραφικής κατανομής του σεισμικού κινδύνου και των χωρικά μεταβαλλόμενων επιδράσεων του σεισμού στο δίκτυο, (3) των πιθανών κυρίων και δευτερευουσών ζημιών, (4) της απόκρισης σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και των εργασιών αποκατάστασης, (5) της ικανότητας εξυπηρέτησης του υπό μελέτη συστήματος μετά από σεισμό.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ

Στην παρούσα εργασία γίνεται, μια προσπάθεια να διερευνηθεί η απόκριση και η αξιοπιστία των αστικών δικτύων ύδρευσης (UWDNs: Urban Water Distribution Networks), καθώς και να δοθεί μια ερμηνεία και περαιτέρω να εκτιμηθεί η προσαρμοστικότητα των δικτύων ύδρευσης μετά από σεισμική φόρτιση. Προκειμένου να υπολογιστεί η αξιοπιστία, χρησιμοποιήθηκαν τόσο γραφικές μέθοδοι (μέθοδος απαρίθμησης διαδρομών, μέθοδος ελαχίστων τομών) όσο και η αναλυτική μέθοδος Monte Carlo, που αναπτύσσεται σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι πιθανότητες αστοχίας των κόμβων (ή αντίστοιχα η αξιοπιστία των κόμβων), που μεταφράζεται στο αν φτάνει νερό ή όχι στους κόμβους του δικτύου από τους κόμβους εισροής του νερού. Μάλιστα για λόγους καλύτερης εποπτείας και κατανόησης, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcGIS για την απεικόνιση των πιθανοτήτων αστοχίας.

Αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο των αριθμητικών εφαρμογών, οι οδηγίες των ALA, που αναφέρονται στην τρωτότητα και στο ρυθμό επισκευής (Repair Rate) αγωγών δικτύων ύδρευσης, έχοντας λάβει αδρομερώς τη χρονολογία των αγωγών, αλλά αμελώντας άλλους μη σεισμικούς παράγοντες, όπως συνθήκες τοποθέτησης σωλήνων και αριθμός προηγούμενων θραύσεων και επιχειρήθηκε να διερευνηθεί η συμπεριφορά των βασικών στοιχείων, που απαρτίζουν τα δίκτυα ύδρευσης (αγωγοί, κόμβοι) με μεταβαλλόμενη παράμετρο την PGV (Peak Ground Velocity) και σταθερά μηδενικές τις υπόλοιπες σεισμικές παραμέτρους.

Τέλος, με τη βοήθεια δεικτών αξιοπιστίας, εκτιμάται η συνολική κατάσταση των δικτύων ύδρευσης μετά από σεισμό και στο πλαίσιο της εργασίας αυτής καταβάλλεται προσπάθεια να αναλυθεί ποιοτικώς και ποσοτικώς ο δείκτης ικανότητας εξυπηρέτησης (SR: Serviceability Ratio) και πως αυτός μεταβάλλεται σταδιακά με διαφορετικούς ρυθμούς επισκευής αγωγών μέχρι να φτάσει σε επίπεδο πριν το σεισμό.

Για λόγους τεκμηρίωσης και ακρίβειας των αποτελεσμάτων, παρατίθενται δύο αριθμητικές εφαρμογές, η μια αναφέρεται στο δίκτυο ύδρευσης της Λευκάδας, πάνω στο οποίο έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν Διπλωματική εργασία με τίτλο *"Εκτίμηση σεισμικού κινδύνου*

για αστικά δίκτυα διανομής νερού με συνυπολογισμό της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης" και η άλλη αφορά το δίκτυο ύδρευσης της Νέας Αρτάκης, που ανήκει στο νομό Εύβοιας.

1.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, στην Ευρώπη ελάχιστες ερευνητικές προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί στο κομμάτι της σεισμικής τρωτότητας δικτύων ύδρευσης και γενικότερα δικτύων υποδομής, μετά από σεισμό. Μολονότι η συγκεκριμένη εργασία δεν περιλαμβάνει στοιχεία για την υδραυλική επίλυση των δύο δικτύων, που αναπτύσσονται στο κεφάλαιο των αριθμητικών εφαρμογών, εμπεριέχει χρήσιμες πληροφορίες για την απόκριση τους μετά από σεισμό και επιχειρείται να δοθεί φως σ' αυτό το ελλιπές ερευνητικό πεδίο. Μάλιστα στις σημερινές κοινωνίες, όπου αναπτύσσεται πλήθος ποικίλων δραστηριοτήτων, κρίνεται απαραίτητη η εύρυθμη λειτουργία των δικτύων αυτών και η μελέτη της συμπεριφοράς και αξιοπιστίας τους. Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί μια παράτρυνση προς τις αρμόδιες Αρχές να επικεντρωθούν στη σεισμική θωράκιση των δικτύων ύδρευσης και παράλληλα να δώσουν έμφαση στη μοντελοποίηση και γραφική τους απεικόνιση.

Όταν ξεσπά ένας σεισμός, η κοινωνία που επηρεάζεται, απαιτεί άμεση βοήθεια, πόρους και εξειδικευμένες εργασίες για να ανακάμψει και να επανέλθει στην αρχική της κατάσταση σε σύντομο χρονικό διάστημα. Με άλλα λόγια, οφείλει να είναι προετοιμασμένη και να πετύχει υψηλή προσαρμοστικότητα, όρος ο οποίος αποκτά σταδιακά αποδοχή και δημοτικότητα και σ' αυτή την εργασία επιδιώκεται να περιγραφεί και να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά-ιδιότητες της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΟΥ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

Με τον όρο τρωτότητα εννοούμε την αδυναμία ενός στοιχείου ή δικτύου να αντέξει τις βλαβερές επιδράσεις, μετά από ένα καταστρεπτικό γεγονός, και να συνεχίσει ομαλά την λειτουργία του. Η ανεμπόδιστη και αρμονική λειτουργία μιας κοινωνίας και του αστικού περιβάλλοντος της συναρτάται άμεσα με την ομαλή λειτουργία των δικτύων κοινής ωφέλειας. Δεδομένου ότι η εκτίμηση κινδύνου για αυτά τα δίκτυα, αποτελεί επίμαχο ζήτημα για την κοινότητα των μηχανικών, το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο δύσκολο να προσεγγιστεί όταν αναφερόμαστε σε κατασκευές κάτω από το έδαφος, όπως ένα αστικό δίκτυο ύδρευσης (UWDN). Σ' αυτή τη περίπτωση, προκειμένου να εκτιμηθεί η τρωτότητα και κατ' επέκταση η αξιοπιστία ενός UWDN, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι σεισμικές και γεωλογικές παράμετροι της περιοχής, η τοπολογία του δικτύου καθώς και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές των στοιχείων που συνθέτουν το δίκτυο.

Μάλιστα παλαιότερα, υπήρχε έλλειψη ιστορικών δεδομένων για τη συμπεριφορά όλου ή και στοιχείων του δικτύου στη διάρκεια του χρόνου και κάτω από κανονικές ή μη συνθήκες λειτουργίας, γεγονός που προσέθετε ανακρίβειες στην εκτίμηση της αξιοπιστίας. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια, που έχει διαφανεί η σημασία των UWDN, ως αναπόσπαστο τμήμα των δικτύων υποδομής, γίνεται συστηματική προσπάθεια για καταγραφή των συνθηκών και της κατάστασης του δικτύου κατά τη διάρκεια και μετά το καταστρεπτικό γεγονός.

Έχει παρατηρηθεί ότι σε μεγάλα αστικά κέντρα με έντονους ρυθμούς ανάπτυξης, ο ρόλος των UWDNs και η εξάρτηση της κοινωνίας σ' αυτά γίνονται ολοένα μεγαλύτερα και συνεπώς τόσο κρισιμότερη η τρωτότητα τους. Η τεχνολογική εξέλιξη έχει επιφέρει το φαινόμενο της διασυνδεσιμότητας και αλληλεξάρτησης μεταξύ των δικτύων κοινής ωφέλειας, που σημαίνει ότι οποιεσδήποτε επιδράσεις και αλλαγές στην κατάσταση ενός δικτύου επηρεάζουν και τα

υπόλοιπα εμπλεκόμενα δίκτυα και οι διαχειριστές των δικτύων θα πρέπει να μελετήσουν και να κατανοήσουν τις σχέσεις αυτές, ώστε να προβούν στις κατάλληλες αποφάσεις και δράσεις.

Όταν αναφερόμαστε στην εκτίμηση και ανάλυση τρωτότητας ενός δικτύου ύδρευσης, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το θέμα είναι πολυδιάστατο και περιλαμβάνει τουλάχιστον 3 μέρη: α) ανάλυση στοιχείων (αγωγούς, δικλείδες ασφαλείας, δεξαμενές κ.α.), β) παράμετροι λειτουργίας δικτύου (πίεση και ύψος νερού, παροχή κ.α.), γ) τοπολογία και συνδεσμολογία δικτύου (αριθμός αγωγών και κόμβων, μήκη αγωγών, τρόπος σύνδεσης κόμβων). Για κάθε μέρος υπάρχει ένα σύνολο μεθόδων ανάλυσης, που μπορούν να εφαρμοστούν, οι οποίες θα περιγραφούν στη συνέχεια. Μάλιστα όταν το υπό μελέτη UWDN βρίσκεται σε περιοχή επιρρεπή σε έντονα σεισμικά γεγονότα, τότε κρίνεται αναγκαία και η ανάλυση σεισμικής τρωτότητας του.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα τελευταία χρόνια δίνεται έμφαση στην εκτίμηση κινδύνου για τα δίκτυα κοινής ωφέλειας και μελετάται διεξοδικά η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια και μετά από καταστρεπτικά γεγονότα, όπως ο σεισμός, οπότε αναφερόμαστε στην εκτίμηση σεισμικού κινδύνου. Μάλιστα στο κομμάτι των δικτύων ύδρευσης παρατηρείται έντονο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον και ερευνητική προσπάθεια, τα οποία με το πέρασμα του χρόνου ενισχύονται, βελτιώνονται και ανατροφοδοτούνται.

Αναφορικά με τα δίκτυα ύδρευσης, η έρευνα της σεισμικής τους συμπεριφοράς ξεκίνησε με τους Ariman and Muleski (1981), οι οποίοι παρουσίασαν μια επικαιροποιημένη και λεπτομερή ανασκόπηση της σεισμικής απόκρισης και του σχεδιασμού σεισμικά θωρακισμένων υπόγειων συστημάτων σωληνώσεων, αναφέροντας τη σοβαρή έλλειψη δεδομένων πεδίου ως κύρια δυσκολία. Οι Moghtaderizadeh et al. (1982) παρουσίασαν μια μέθοδο για την αξιοπιστία των δικτύων υποδομής, όπου αναλύονται οι αστοχίες στοιχείων αυτών, που προκλήθηκαν από εδαφική ταλάντωση και διαφορικές κινήσεις ρηγμάτων. Οι Isoyama et al. (1998) πρότειναν μια σχέση τρωτότητας για αγωγούς νερού βασιζόμενη σε στοιχεία, που προέκυψαν κατά τη

διάρκεια του σεισμού Kobe (1995), η οποία δείχνει ότι η ζημιά του αγωγού είναι εκθετικά αυξανόμενη με την ταχύτητα της εδαφικής ταλάντωσης. Οι Datta et al. (1999) παρουσίασαν μια ανασκόπηση της συμπεριφοράς θαμμένων αγωγών κάτω από διάφορες μεταβολές παραμέτρων και μελέτησαν ένα μοντέλο του συστήματος εδάφους-σωλήνων και σεισμικής διέγερσης.

Το 1998, η Federal Emergency Management Agency (FEMA) σχημάτισε την American Lifelines Alliance (ALA), η οποία το 2001 εξέδωσε οδηγίες για τον οικονομικά αποδοτικό σεισμικό σχεδιασμό σωλήνων νερού, εφαρμόσιμες σε όλη την επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτό σημαίνει ότι οι απαιτήσεις σχεδιασμού διαφέρουν για διαφορετικά είδη αγωγών, ανάλογα με την σπουδαιότητα αξιοπιστίας του δικτύου νερού και τις τοπικές συνθήκες σεισμικής επικινδυνότητας. Επιπλέον η FEMA ανέπτυξε μια τυποποιημένη μεθοδολογία και το λογισμικό HAZUS-MHMR3, που υπολογίζει πιθανές απώλειες από καταστρεπτικά γεγονότα, όπως σεισμούς, τυφώνες και πλημμύρες.

Οι Raolucci-Pitilakis (2007) ασχολήθηκαν με την εκτίμηση σεισμικού κινδύνου υπόγειων κατασκευών υπό την επιρροή εδαφικών παραμορφώσεων, δίνοντας έμφαση στις εισαγόμενες από το σεισμό εδαφικές τάσεις, στην επανεξέταση των χρησιμοποιούμενων μοντέλων και στην ανάλυση της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης συναρτήσει της εδαφικής ανομοιογένειας. Οι Wang et al. (2010) περιγράφουν μια διαδικασία για την εκτίμηση σεισμικού κινδύνου και την αναγνώριση κρίσιμων συνδέσεων σε συστήματα ύδρευσης υποβαλλόμενα σε σεισμό. Η πιθανοτική απόδοση των συστημάτων αυτών αντιπροσωπεύεται από το δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης συστήματος (SSI: System Serviceability Index), το δείκτη συνεπειών βλαβών (DCI: Damage Consequence Index) και το δείκτη οφελούς αναβάθμισης (UBI: Upgrade Benefit Index), οι οποίοι υπολογίζονται με την ανάλυση Monte Carlo.

Τέλος, οι Fragiadakis and Christodoulou (2013) παρουσίασαν ένα πλαίσιο για τη σεισμική εκτίμηση κινδύνου δικτύων ύδρευσης κάτω από κανονικές ή μη συνθήκες λειτουργίας και πρότειναν μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της αξιοπιστίας των δικτύων αυτών, συνδυάζοντας δεδομένα από προηγούμενες μη σεισμικές βλάβες και τη σεισμική τρωτότητα

των στοιχείων του δικτύου και κατασκεύασαν καμπύλες επιβίωσης (Survival Curves), βασιζόμενες σε ιστορικά δεδομένα και βλάβες. Η αξιοπιστία του δικτύου εκτιμάται σύμφωνα με τις αναλυτικές μεθόδους της θεωρίας γράφων (Graph Theory) και της μεθόδου απαρίθμησης διαδρομών (Path Enumeration Method), ενώ σύμφωνα με αριθμητική μέθοδο υπολογίζεται με την προσομοίωση Monte Carlo, μέσω της οποίας υπολογίζεται, εκτός των άλλων, η πιθανότητα το δίκτυο να εξυπηρετεί τις ανάγκες των καταναλωτών, δηλαδή να ικανοποιεί ένα επιθυμητό επίπεδο εξυπηρέτησης, μετά από ένα καταστρεπτικό γεγονός και δίνει τη δυνατότητα στις αρμόδιες Αρχές να προγραμματίσουν τις εργασίες αποκατάστασης των ζημιών.

2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Με βάση τα προηγούμενα, είναι σημαντικό να εκτιμήσουμε την αξιοπιστία ενός δικτύου και γι' αυτό το σκοπό θα πρέπει σε πρώτη φάση να γίνει εκτίμηση της τρωτότητας των στοιχείων που το αποτελούν. Στην περίπτωση των δικτύων ύδρευσης, τα στοιχεία, τα οποία είναι πιο ευαίσθητα σε σεισμικές καταπονήσεις είναι οι αγωγοί και η τρωτότητα τους προκύπτει από απλές ή και πιο σύνθετες συναρτήσεις, που λαμβάνουν υπόψη διάφορες παραμέτρους. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV: Peak Ground Velocity) και η μόνιμη εδαφική παραμόρφωση (PGD: Permanent Ground Deformation), οι οποίες προσδιορίζουν τη σεισμική διέγερση και παρουσιάζουν χωρική μεταβλητότητα, καθώς η έκταση ενός υπό μελέτη δικτύου ύδρευσης είναι μεγάλη. Σ' αυτό εξυπηρετεί ο χωρισμός του δικτύου σε ζώνες (DMA: District Metered Area), που εμφανίζουν μια σχετική ομοιογένεια χαρακτηριστικών και απλοποιούν την ανάλυση. Άλλες δευτερεύουσες παράμετροι που μπορούν να ληφθούν υπόψη είναι το υλικό και η διάμετρος σωλήνα, ο τύπος εδάφους, η διάβρωση που αυτό προκαλεί και το είδος σύνδεσης των αγωγών. Στις συναρτήσεις εκτίμησης της τρωτότητας, η εξαρτημένη μεταβλητή συνήθως είναι ο ρυθμός επισκευής του σωλήνα, ο οποίος συσχετίζεται ξεχωριστά με τις παραμέτρους PGV και PGD. Οι συναρτήσεις αυτές προκύπτουν κατόπιν στατιστικής ανάλυσης, βασιζόμενες σε παλαιότερα δεδομένα αστοχιών

και των τύπων αυτών, κάτι που υποδεικνύει τη σπουδαιότητα δημιουργίας βάσεων δεδομένων για την εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο σωστών και ακριβών αποτελεσμάτων.

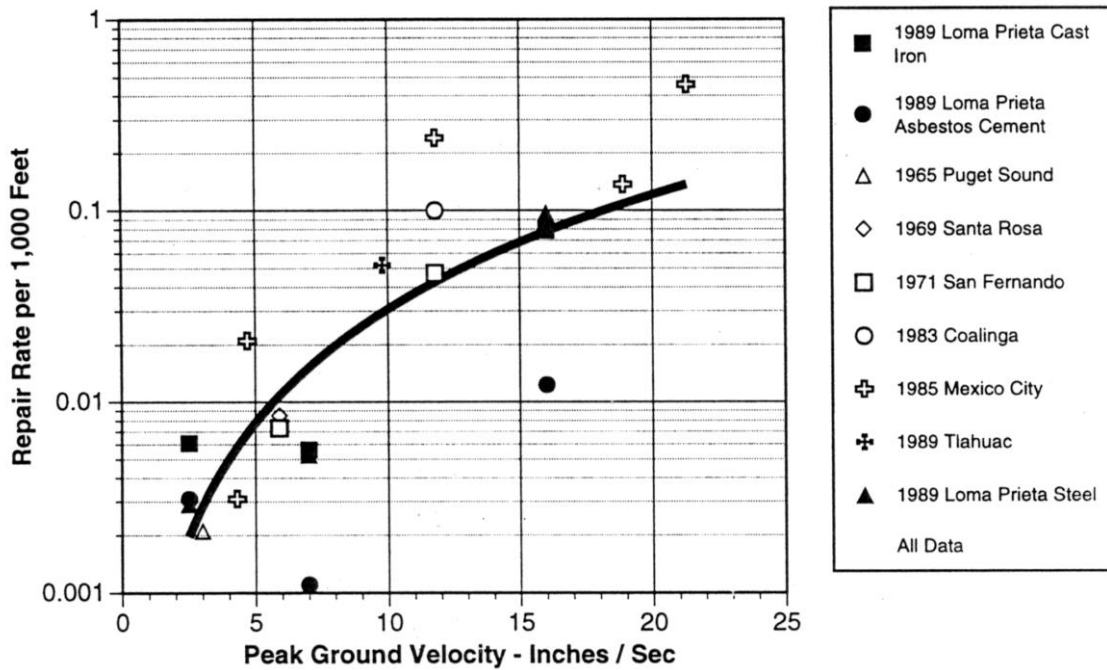
Στο παρελθόν, πολλοί ερευνητές πρότειναν εμπειρικές σχέσεις τρωτότητας με ανεξάρτητη μεταβλητή είτε την ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων PGV (O'Rourke & Ayala 1993, Eidinger et al. 1998, Eidinger & Avila 1999, Isoyama et al. 1998, ALA 2001), είτε τις παραμένουσες εδαφικές μετακινήσεις PGD (Honegger and Eguchi 1992, Eidinger and Avila 1999, ALA 2001) για αγωγούς νερού και φυσικού αερίου, όπως δείχνει ο Πίνακας 1.

Πιο συγκεκριμένα οι O'Rourke & Ayala 1993 ανέπτυξαν μια εμπειρική σχέση μεταξύ της βλάβης (μετράται σε σύνολο επισκευών ανά χιλιόμετρο αγωγού) και της PGV, χρησιμοποιώντας δεδομένα από 4 σειμούς των Ηνωμένων Πολιτειών και 2 του Μεξικό. Οι υπάρχουσες σχέσεις τρωτότητας με παράμετρο τη PGD τυπικά χαρακτηρίζουν το σεισμικό κίνδυνο από το μέγεθος της μόνιμης εδαφικής κίνησης και οι O'Rourke and Ayala απέδειξαν ότι για στατιστικά αξιόπιστα δεδομένα, οι διαφορές στα εκτιμώμενα ποσοστά ζημιών, λόγω διάδοσης σεισμικών κυμάτων, γίνονται πολύ μικρότερες όταν η σεισμική κίνηση χαρακτηρίζεται από τις εδαφικές τάσεις, σε αντίθεση με τη PGV.

Οι Eidinger et al. 1998 παρουσίασαν μια σχέση τρωτότητας για τη PGV βασισμένη σε δεδομένα από 7 σειμούς. Η βάση δεδομένων είναι παρόμοια μ' αυτή των O' Rourke and Ayala, αλλά περιλαμβάνει επιπλέον δεδομένα από το σεισμό Loma Prieta το 1989. Οι ρυθμοί επισκευής των σωλήνων από τον παραπάνω σεισμό ευρέθησαν από ανάλυση βασισμένη σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Τα δεδομένα, που αφορούν τους αγωγούς, περιλαμβάνουν μια ομάδα παραμέτρων υπό τη σκοπιά της τρωτότητας των αγωγών όπως διάμετρο, υλικό και επένδυση αγωγού, τύπος σύνδεσης και ημερομηνία εγκατάστασης. Η ομάδα δεδομένων και η βέλτιστη γραμμή προσαρμογής στα δεδομένα από τους 7 σειμούς, φαίνεται στην Εικόνα 1. Όπως φαίνεται από τη σχέση των Eidinger et al. του Πίνακας 1, χρησιμοποιείται μια παράμετρος προσαρμογής K_1 , που συνεκτιμά διαφορετικούς συνδυασμούς υλικού, διαμέτρου, τύπου σύνδεσης αγωγών και είδους εδάφους.

Οι Isoyama et al. 1998 πρότειναν μια πρακτική διαδικασία για την εκτίμηση των βλαβών σε σωλήνες νερού, όταν ξεσπά ένας σεισμός. Η διαδικασία λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως, το υλικό και τη διάμετρο σωλήνα, τις εδαφικές συνθήκες και το φαινόμενο της ρευστοποίησης, καθώς επίσης και την ένταση της εδαφικής κίνησης. Η τυπική καμπύλη τρωτότητας παρουσιάζεται ως συνάρτηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), βασισμένη στα δεδομένα της ισχυρής εδαφικής κίνησης του σεισμού Kobe 1995 και στα δεδομένα των βλαβών για τα παρατηρούμενα σημεία. Η τυπική καμπύλη τρωτότητας τροποποιείται από τις παραμέτρους, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, χρησιμοποιώντας αντίστοιχους συντελεστές για καθεμιά. Αυτοί οι παράγοντες προσαρμογής προσδιορίστηκαν κυρίως από μια λεπτομερή ανάλυση των βλαβών, που προκλήθηκαν στις ιαπωνικές πόλεις Ashiya και Nishinomiya από το σεισμό Kobe. Ένας κάρναβος με τετραγωνικό πλέγμα 50 m χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση με σκοπό να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου, όπως στενές κοιλάδες.

Οι American Lifeline Alliance (ALA 2001) δημοσίευσαν ένα σύνολο λεπτομερών διαδικασιών για να εκτιμήσουν την πιθανότητα βλαβών υπό την επίδραση του σεισμού σε διάφορα στοιχεία, που συνθέτουν ένα δίκτυο ύδρευσης. Για κάθε στοιχείο, τα πιθανά επίπεδα ζημιών και οι αντίστοιχες σχέσεις τρωτότητας παρουσιάστηκαν. Για υπόγειους αγωγούς, σχέσεις τρωτότητας δημιουργήθηκαν ξεχωριστά για επιδράσεις από μόνιμη παραμόρφωση του εδάφους και για επιδράσεις από την σεισμική του κίνηση. Η βάση δεδομένων, που αναπτύχθηκε για την δεύτερη κατηγορία επιδράσεων περιλαμβάνει επίπεδα ζημιών των αγωγών από 18 σεισμούς στην περίοδο 1923-1995. Στόχος των οδηγιών των ALA είναι να προτείνουν μια αποτελεσματική και συγχρόνως οικονομική προσέγγιση του σεισμικού σχεδιασμού αγωγών νερού, εφαρμόσιμη σε όλη την επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών και όχι μόνο. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις σχεδιασμού για διαφορετικά είδη αγωγών, ανάλογα με την χρησιμότητά τους στην απόδοση του δικτύου και τις τοπικές σεισμικές παραμέτρους.



Εικόνα 1: Ομάδα δεδομένων και γραμμή προσαρμογής σχέσης τρωτότητας των Eidinger et al.

Πίνακας 1: Σχέσεις τρωτότητας για αγωγούς

Ground Shaking (PGV)	Ground Failure (PGD)
<p>O' Rourke & Ayala (1993):</p> $K \times (10^{-4} \times PGV^{2.25})$ <p><i>K: type (fragile, ductile)</i></p>	<p>Honegger & Eguchi (1992):</p> $K \times (7.821 \times PGD^{0.56})$ <p><i>K: type (fragile, ductile)</i></p>
<p>Eidinger (1998): $1.2 \times 10^{-3} \times PGV^{0.7677}$</p> <p>asbestos-cement, $6 \times 10^{-4} \times PGV^{1.5542}$ cast-iron, $6 \times 10^{-5} \times PGV^{2.2949}$ ductile iron</p>	<p>Eidinger and Avila (1999):</p> $K_2 \times 23.674 \times PGD^{0.53}$ <p><i>K2 material, connection type</i></p>
<p>Eidinger and Avila (1999):</p> $K_1 \times 1.512 \times (PGV^{1.98})$ <p><i>K1: material,</i></p>	<p>ALA (2001 a, b): $K_2 \times 11.223 \times PGD^{0.319}$,</p> <p><i>K2 material, connection type</i></p>

<i>connection type, soil, diameter</i>	
<i>Isoyama et al. (1998):</i> $C_p \times C_d \times 3.11 \times 10^{-3} \times (PGV - 5)^{1.3}$, C_p, C_d : <i>material, diameter</i>	
<i>ALA (2001a, b):</i> $K_1 \times 0.241 \times PGV$, <i>K1: material, connection type, soil, diameter</i>	

Οι σχέσεις αυτές συσχετίζουν τις εδαφικές σεισμικές παραμέτρους με το ρυθμό επιδιόρθωσης αγωγών. Σημαντικές διαφορές παρατηρούνται, εξαιτίας των υποθέσεων και παραδοχών, που γίνονται από διαφορετικούς ερευνητές, των μεθόδων στατιστικών αναλύσεων που χρησιμοποιήθηκαν, των μεθόδων για την εκτίμηση των παραμέτρων PGV και PGD σε κάθε περίπτωση, της ακρίβειας των δεδομένων καταγραφής ζημιών, του τεκτονικού καθεστώτος της περιοχής, του τύπου των σωλήνων και των τεχνικών κατασκευής τους και σύνδεσης με τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου.

Οι παραπάνω σχέσεις τρωτότητας επαληθεύτηκαν με την εφαρμογή σε πραγματικά δίκτυα ύδρευσης μετά από μεγάλα σεισμικά γεγονότα, που επέφεραν σημαντικές βλάβες στα δομικά στοιχεία του δικτύου. Από την έρευνα προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι οδηγίες των American Lifelines Alliance (ALA), αναφορικά με τους αγωγούς νερού, ανταποκρίνονται καλύτερα στα ευρωπαϊκά χαρακτηριστικά, και έτσι αποφασίστηκε στην παρούσα εργασία να χρησιμοποιηθούν αυτές στο πλαίσιο εκτίμησης της τρωτότητας των αγωγών. Όπως προαναφέρθηκε, οι σχέσεις αυτές προκύπτουν βάσει της στατιστικής επεξεργασίας παρατηρήσεων και δεδομένων αστοχιών από καταστροφικούς σεισμούς του παρελθόντος και συνδέονται με τις σεισμικές παραμέτρους PGV και PGD.

Η PGV υποδηλώνει την ισχυρή εδαφική ταλάντωση, που προκαλείται από τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, ενώ η PGD σχετίζεται με φαινόμενα όπως κατολισθήσεις, ρευστοποίηση εδάφους, καθιζήσεις και διασταυρώσεις δικτύου-ρηγμάτων. Οι σχέσεις (2.1), (2.2) μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν δεν υπάρχουν δεδομένα για τα υλικά των σωλήνων, τη διάμετρο τους, την αντίσταση τους στη διάβρωση του εδάφους και ένας αναλυτικός κατάλογος απογραφής των στοιχείων του δικτύου, όπου RR είναι ο ρυθμός επισκευής των αγωγών (RR: Repair Rate) για 1000 ft μήκους σωλήνα και έχουν τη μορφή:

$$RR_{PGV} = 0.00187 \cdot PGV \quad (2.1)$$

$$RR_{PGD} = 1.06 \cdot PGD^{0.319} \quad (2.2)$$

όπου η PGV μετράται σε ίντσες ανά δευτερόλεπτο (in/s) και η PGD σε ίντσες (in). Οι παραπάνω συναρτήσεις στο σύστημα μονάδων SI παίρνουν την εξής μορφή:

$$RR_{PGV} = 0.01425 \cdot PGV \quad (2.3)$$

$$RR_{PGD} = 4.281 \cdot PGD^{0.319} \quad (2.4)$$

όπου το RR αναφέρεται σε 100 m μήκους σωλήνα, το PGV σε cm/s και το PGD σε cm.

Στην περίπτωση που οι παράμετροι προσαρμογής σχετικές με το υλικό, K_1 , K_2 , οι οποίες δίνονται σε μορφή πίνακα στις οδηγίες των ALA για τα διάφορα υλικά σωλήνων, είναι γνωστές, τότε οι παραπάνω σχέσεις στο σύστημα SI τροποποιούνται σε:

$$RR_{PGV} = K_1 \cdot 0.01425 \cdot PGV \quad (2.5)$$

$$RR_{PGD} = K_2 \cdot 4.281 \cdot PGD^{0.319} \quad (2.6)$$

Οι ρυθμοί επισκευής των σωλήνων που προκύπτουν από τις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να οφείλονται σε πλήρη αστοχία, διαρροή, ζημιά στα εξαρτήματα των σωλήνων ή σε οποιαδήποτε άλλη αιτία, ικανή να παρακινήσει τις αρμόδιες Αρχές να παρέμβουν. Στις περισσότερες περιπτώσεις τυπικών δικτύων ύδρευσης, έχει παρατηρηθεί ότι 15-20% των αστοχιών που οφείλονται στη PGV είναι θραύσεις στους αγωγούς και οι υπόλοιπες είναι διαρροές, ενώ για αστοχίες λόγω PGD, περίπου το 80-85% είναι θραύσεις, με συνέπεια την απώλεια της υδραυλικής συνέχειας των αγωγών (Ballantyne 1990).

Έχει διαπιστωθεί ότι, παρότι η σεισμική ένταση σχετίζεται τόσο με τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV, όσο και με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA, η PGV αντιπροσωπεύει καλύτερα το μέγεθος των ζημιών του δικτύου ύδρευσης και είναι ένας ισχυρός δείκτης της πιθανότητας να προκληθούν δομικές βλάβες από την εδαφική κίνηση. Ο κυριότερος λόγος για τον οποίο επιλέγεται η PGV, ως δείκτης εκτίμησης των βλαβών είναι η σχέση που έχει με τις εδαφικές τάσεις από το σεισμό, που είναι η κύρια αιτία των ζημιών των αγωγών εξαιτίας της διάδοσης σεισμικών κυμάτων. Επιπλέον η PGV είναι ευαίσθητη σε μακρύτερες περιόδους ταλάντωσης από την PGA και έτσι πιο εύκολο να εκτιμηθεί με τη βοήθεια ντετερμινιστικών μοντέλων. Για όλους αυτούς τους λόγους η PGV είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη σεισμική παράμετρος για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των αγωγών.

Η τιμή της PGV μπορεί να βρεθεί από τοπικούς ή εθνικούς χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας που χωρικά αναπαριστούν το σεισμικό κίνδυνο σε ζώνες με παραπλήσια σεισμικά χαρακτηριστικά και παρέχουν την PGV για προϋποτιθέμενη περίοδο επαναφοράς. Μια ισοδύναμη προσέγγιση, προκειμένου να πάρουμε έγκυρες τιμές PGV, είναι με τη βοήθεια τοπικών εξισώσεων πρόβλεψης της σεισμικής κίνησης, παλαιότερα γνωστών ως σχέσεις εξασθένησης. Οι εξισώσεις αυτές απαιτούν για δεδομένα το μέγεθος και την απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού (Fragiadakis et al. 2013).

Από τη στιγμή που ο ρυθμός επισκευής (RR) είναι γνωστός, δηλαδή ο αριθμός θραύσεων ή διαρροών κατά μήκος του σωλήνα, η πιθανότητα αστοχίας του σωλήνα μπορεί να υπολογιστεί με αφαίρεση από τη μονάδα της πιθανότητας μηδενικών θραύσεων κατά μήκος του σωλήνα. Υιοθετώντας τα ευρήματα των Shamir & Howard (1979) σχετικά με την εκθετική κατανομή του

ποσοστού θραύσης και χρησιμοποιώντας το τύπο της εκθετικής κατανομής CDF (Cumulative Distribution Function), η πιθανότητα αστοχίας του σωλήνα P_f υπολογίζεται σύμφωνα με τις οδηγίες των ALA ως:

$$P_f = 1 - e^{-RR \cdot L} \quad (2.7)$$

όπου $RR = \max(RR_{PGV}, RR_{PGD})$, L το μήκος σωλήνα και RR_{PGV} , RR_{PGD} , υπολογίζονται με βάση τις προηγούμενες εξισώσεις. Το σύμβολο P_f αναφέρεται στην πιθανότητα αστοχίας ενός σωλήνα, ενώ το \hat{P}_f αναφέρεται στη πιθανότητα αστοχίας του δικτύου. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η (2.7) δε λαμβάνει υπόψη πιθανές αστοχίες που έχουν συμβεί στο παρελθόν και γι' αυτό χρειάζεται να τροποποιηθεί, θεωρώντας ένα συντελεστή που υποδεικνύει το μέγεθος των ζημιών στο παρελθόν, ανεξάρτητα αν προκλήθηκαν από σεισμό ή όχι, και κατ' επέκταση την παλαιότητα του δικτύου. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζεται να γίνει συνταίριασμα των ζημιών των αγωγών, που προκαλούνται από σεισμικές και μη δράσεις. Για να υπολογίσουμε την τρωτότητα εξαιτίας μη σεισμικών δράσεων, χρησιμοποιούμε την ανάλυση επιβίωσης (Survival Analysis), ενώ για να υπολογίσουμε την σεισμική τρωτότητα βασιζόμαστε στη διαδικασία που προτείνεται στις οδηγίες των ALA και χρησιμοποιώντας μια ορθολογιστική προσέγγιση τη συνδυάζουμε με τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβίωσης, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση των προηγούμενων θραύσεων που παρατηρήθηκαν στο δίκτυο.

Η ανάλυση επιβίωσης απαιτεί για δεδομένα τον αριθμό των προηγούμενων θραύσεων και διαρροών, το υλικό σωλήνα, τη διάμετρο και την ηλικία του για την κατασκευή των καμπυλών επιβίωσης, οπότε κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει καταγραφή από τις αρμόδιες Αρχές όλων των παραπάνω τόσο κατά την εγκατάσταση, όσο και κατά την περίοδο λειτουργίας του δικτύου. Ωστόσο οι προσεγγίσεις για σεισμικές και μη σεισμικές επιδράσεις έχουν διακριτές διαφορές και δεν είναι πάντα εύκολο και καθολικά αποδεκτό να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα με τέτοιο τρόπο που να συνδυάζει τις καμπύλες επιβίωσης μ' αυτές της

σεισμικής τρωτότητας. Για να γίνει αυτό, τροποποιούμε την (2.7), ενσωματώνοντας τον όρο $k(t)$, ο οποίος είναι ο λόγος της καμπύλης επιβίωσης για την κατάσταση του αγωγού με τις ζημιές (NOPB \neq 0, Number of Previous Breaks) προς την κατάσταση του χωρίς καθόλου ζημιές (NOPB=0). Επομένως $k(t)=S_{UD}(t)/S_D(t)$, όπου οι δείκτες UD και D, αναφέρονται στην κατάσταση του δικτύου χωρίς και με βλάβες αντίστοιχα. Ο όρος $k(t)$ μεταβάλλεται με το χρόνο, ωστόσο στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θεωρείται σταθερός και ίσος με $k=3.5$, καθώς τα υπό μελέτη δίκτυα της Νέας Αρτάκης και της Λευκάδας χαρακτηρίζονται παλαιά και στη διάρκεια λειτουργίας τους έχουν υποστεί ελάχιστες παρεμβάσεις και αντικαταστάσεις σε δομικά στοιχεία τους. Έτσι η σχέση (2.4) τροποποιείται σε:

$$P_f(t) = 1 - e^{-k \cdot RR \cdot L} \quad (2.8)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΟΥ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ

Η αξιοπιστία του δικτύου (Network Reliability) είναι μια παράμετρος που εξαρτάται όχι μόνο από τη συμπεριφορά των στοιχείων ενός δικτύου (αγωγοί, κόμβοι συνδέσεων, δεξαμενές) μετά από ένα καταστρεπτικό γεγονός, όπως ο σεισμός, αλλά και από τη μορφή της σύνδεσης των κόμβων του, δηλαδή τη τοπολογία του, που μπορεί να είναι βρογχωτή, γραμμική, δενδροειδής, κατανεμημένη κ.α. και από τη λειτουργία και τις υδραυλικές παραμέτρους του (παροχή, πίεση κ.α.). Με βάση προγενέστερη έρευνα, έχουν γίνει προσπάθειες για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του δικτύου και έχουν πραγματοποιηθεί προσεγγίσεις βασισμένες σε δίκτυα (Network-based Approaches), όπως η θεωρία τρωτότητας (Vulnerability Theory), η θεωρία γράφων (Graph Theory), η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) και η προσομοίωση Monte Carlo (Monte Carlo Simulation). Όλες οι παραπάνω μέθοδοι υπολογίζουν την αξιοπιστία ενός δικτύου σωλήνων νερού με τη προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η τρωτότητα των στοιχείων του δικτύου. Ουσιαστικά, επικεντρωνόμαστε στους αγωγούς, καθώς είναι το σημαντικότερο στοιχείο σε ένα δίκτυο σωληνώσεων και επηρεάζει περισσότερο από τα υπόλοιπα την αξιοπιστία του, ωστόσο είναι επίπονη διαδικασία η επίβλεψη και η αντικατάσταση του και πολλές παράμετροι αστοχίας εμπλέκονται.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΛΟΓΙΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

3.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΑΡΙΘΜΗΣΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ

Ένας άμεσος υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας του δικτύου, $\hat{P}_{f,ij}$, μπορεί να γίνει, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο απαρίθμησης διαδρομών (Path Enumeration Method) ή τη μέθοδο ελαχίστων τομών (Minimal Cut-set Method), η οποία θα παρουσιαστεί παρακάτω. Σύμφωνα με την μέθοδο απαρίθμησης διαδρομών θα πρέπει να προσδιοριστούν όλες οι

ελάχιστες διαδρομές του δικτύου. Μια ελάχιστη διαδρομή (F_p) ορίζεται ως μια ομάδα συνδέσμων, στην περίπτωση ενός δικτύου ύδρευσης, ως μια ομάδα αγωγών, οι οποίοι όταν είναι όλοι αξιόπιστοι, το σύστημα λειτουργεί. Μια διαδρομή είναι ελάχιστη αν δεν έχει υποδιαδρομές και έτσι κάθε κόμβος εμφανίζεται στη διαδρομή μια φορά. Αν η m-οστή διαδρομή μεταξύ των i, j έχει ηr αγωγούς, τότε η πιθανότητα αστοχίας της υπολογίζεται ως εξής:

$$P(F_{p,m}) = 1 - \bar{P}_{f,1} \cap \bar{P}_{f,2} \cap \dots \cap \bar{P}_{f,np} = 1 - \prod_{n=1}^{np} (1 - \bar{P}_{f,n}) \quad (3.1)$$

όπου \bar{P}_f είναι η πιθανότητα αστοχίας ενός σωλήνα και το σύμβολο \cap δηλώνει τομή.

Αν οι πιθανότητες αστοχίας των κόμβων και των αγωγών είναι γνωστές, η αξιοπιστία μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Από τη στιγμή που οι ελάχιστες διαδρομές μεταξύ κάθε κόμβων i και j έχουν προσδιοριστεί, η αξιοπιστία του δικτύου μεταξύ των i και j, $\hat{R}_{s,ij}$, ισοδυναμεί με την πιθανότητα ότι τουλάχιστον μια διαδρομή μεταξύ των i και j είναι επιτυχής. Έτσι αν M είναι το σύνολο των ελαχίστων διαδρομών μεταξύ i και j και F_m είναι η m-οστή ελάχιστη διαδρομή, ο ακριβής υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας $\hat{P}_{f,ij}$ είναι:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{f,ij} &= P(F_{p,1} \cup F_{p,2} \cup \dots \cup F_{p,m}) = \\ &P(F_{p,1}) + P(F_{p,2}) - P(F_{p,1} \cap F_{p,2}) \\ &+ P(F_{p,3}) - P(F_{p,1} \cap F_{p,3}) - P(F_{p,2} \cap F_{p,3}) + P(F_{p,1} \cap F_{p,2} \cap F_{p,3}) \\ &+ P(F_{p,4}) - P(F_{p,1} \cap F_{p,4}) - P(F_{p,2} \cap F_{p,4}) - P(F_{p,3} \cap F_{p,4}) + P(F_{p,1} \cap F_{p,2} \cap F_{p,4}) \\ &+ P(F_{p,1} \cap F_{p,3} \cap F_{p,4}) + P(F_{p,2} \cap F_{p,3} \cap F_{p,4}) - P(F_{p,1} \cap F_{p,2} \cap F_{p,3} \cap F_{p,4}) \\ &+ P(F_{p,5}) - \dots \\ &= \sum_{k=1}^M P(F_{p,k}) - \sum \sum_{k<l}^M P(F_{p,k} \cap F_{p,l}) + \sum \sum \sum_{k<l<m}^M P(F_{p,k} \cap F_{p,l} \cap F_{p,m}) - \dots \end{aligned} \quad (3.2)$$

όπου \cap δηλώνει τομή και το \cup είναι το σύμβολο της ένωσης.

Στην περίπτωση του δικτύου, που φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 3, υποθέτουμε ότι η αξιοπιστία ($R_i = 1 - P_{f,i}$) κάθε αγωγού είναι ίδια με αυτή των υπολοίπων ($R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R$).

Το δίκτυο έχει 4 διαδρομές: $F_{p,1}$: 5-2, $F_{p,2}$: 4-1, $F_{p,3}$: 5-3-1, $F_{p,4}$: 4-3-2 και οι πιθανότητες αστοχίας τους είναι: $P(F_{p,1}) = P(F_{p,2}) = 1 - R^2$ και $P(F_{p,3}) = P(F_{p,4}) = 1 - R^3$. Οι πιθανότητες των όρων της τομής μπορούν εύκολα να υπολογισθούν, $P(F_{p,1} \cap F_{p,2}) = 1 - R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 = 1 - R^4$. Επομένως, η αναλυτική λύση για την αξιοπιστία του δικτύου, όσον αφορά τη διαδρομή από τον κόμβο a στον d είναι:

$$\hat{R}_{s,ad} = 1 - \hat{P}_{f,ad} = 2R^2 + 2R^3 - 5R^4 + 2R^5.$$

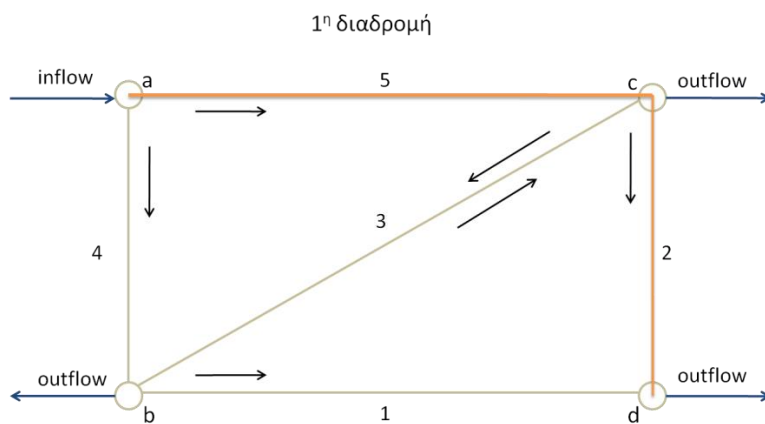
Το μέγεθος της (3.2) μεγαλώνει εκθετικά καθώς το M αυξάνει, καθώς 2^{M-1} όροι πρέπει να υπολογιστούν. Έτσι για ένα δίκτυο με 10 διαδρομές, η πιθανότητα αστοχίας του δικτύου είναι το άθροισμα $2^{10}-1=1023$ όροι, που σημαίνει ότι ο ακριβής υπολογισμός γίνεται εξαιρετικά χρονοβόρος, ακόμα και για μικρά δίκτυα πόσο μάλλον για δίκτυα πραγματικής κλίμακας. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα υπολογίζονται 1^{ης} ή 2^{ης} τάξης προσεγγίσεις ή όρια της πιθανότητας αστοχίας. Μια 1^{ης} τάξης προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί η $\hat{P}_{f,ij} \approx \sum_{k=1}^M P(F_k)$, υποθέτοντας ότι $P(F_k) \ll 1$ και οι όροι $P(F_k \cap F_l)$ θεωρούνται αμελητέοι. Εναλλακτικά, 2^{ης} τάξης προσεγγίσεις μπορούν να υπολογιστούν:

$$P(F_1) + \sum_{k=2}^M \max \left[\left(P(F_k) - \sum_{l=1}^{k-1} P(F_k \cap F_l) \right); 0 \right] \leq \hat{P}_{f,ij} \leq \sum_{k=1}^M P(F_k) - \sum_{k=2}^M \max_{l < k} P(F_k \cap F_l) \quad (3.3)$$

Η παραπάνω εξίσωση δίνει εκτιμήσεις της $\hat{P}_{f,ij}$, οι οποίες είναι επαρκούς ακρίβειας για τους σκοπούς της μηχανικής. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι τα όρια εξαρτώνται από τη διάταξη των M διαδρομών. Εκτός από όρια 2^{ης} τάξης, τύποι που χρησιμοποιούν όρια 3^{ης} τάξης

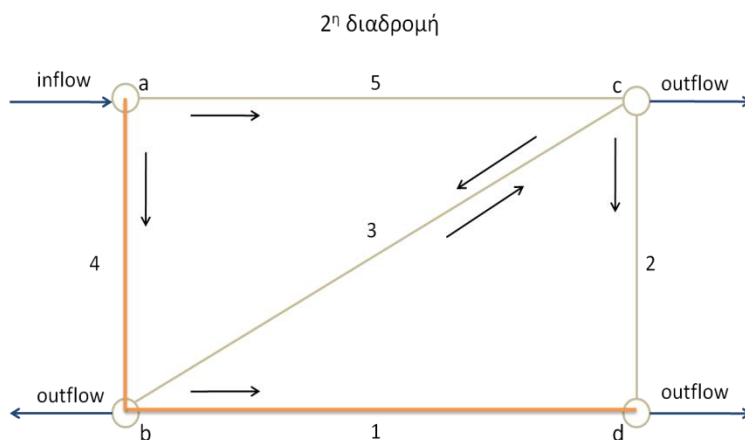
υπάρχουν επίσης στην βιβλιογραφία. Αυτές επίσης εξαρτώνται από την αρίθμηση των διαδρομών και παρότι η μεταβλητότητα είναι πολύ μικρότερη (συγκρινόμενη με την σχέση (3.3)), ο υπολογιστικός φόρτος για τον υπολογισμό των κοινών πιθανοτήτων, αποτελούμενων από 3 όρους, είναι σημαντικός.

Για λόγους εποπτείας και καλύτερης κατανόησης, παρακάτω επιλύεται βήμα-βήμα το απλό δίκτυο, που φαίνεται στην Εικόνα 3, σύμφωνα με τη μέθοδο απαρίθμησης διαδρομών αν υποθέσουμε ότι η πιθανότητα αστοχίας για κάθε αγωγό είναι $P_f = 0.1$, άρα αντίστοιχα η αξιοπιστία του θα είναι $R=0.9$.



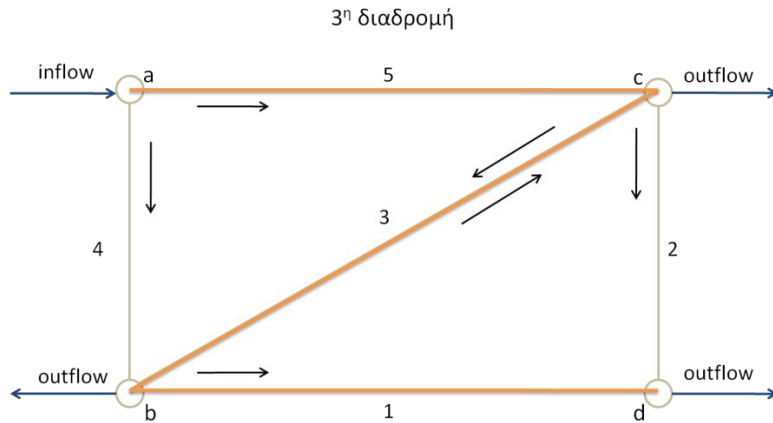
Η διαδρομή του νερού ξεκινά από τον κόμβο a και καταλήγει στον d, διερχόμενο από τους αγωγούς 5, 2. Η πιθανότητα αστοχίας της 1^{ης} διαδρομής είναι:

$$P(F_{p,1}) = 1 - \bar{P}_{f,5} \cap \bar{P}_{f,2} = \\ = 1 - (1 - \bar{P}_{f,5}) \cdot (1 - \bar{P}_{f,2}) = 0.19$$



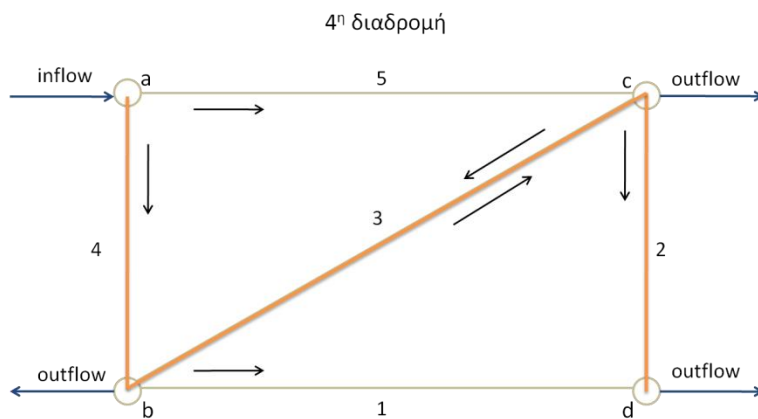
Η διαδρομή του νερού ξεκινά από τον κόμβο a και καταλήγει στον d, διερχόμενο από τους αγωγούς 4, 1. Η πιθανότητα αστοχίας της 2^{ης} διαδρομής είναι:

$$P(F_{p,2}) = 1 - \bar{P}_{f,4} \cap \bar{P}_{f,1} = \\ = 1 - (1 - \bar{P}_{f,4}) \cdot (1 - \bar{P}_{f,1}) = 0.19$$



Η διαδρομή του νερού ξεκινά από τον κόμβο a και καταλήγει στον d, διερχόμενο από τους αγωγούς 5, 3, 1. Η πιθανότητα αστοχίας της 3^{ης} διαδρομής είναι:

$$\begin{aligned}
 P(F_{p,3}) &= 1 - \bar{P}_{f,5} \cap \bar{P}_{f,3} \cap \bar{P}_{f,1} = \\
 &= 1 - (1 - \bar{P}_{f,5}) \cdot (1 - \bar{P}_{f,3}) \cdot (1 - \bar{P}_{f,1}) = \\
 &= 0.271
 \end{aligned}$$



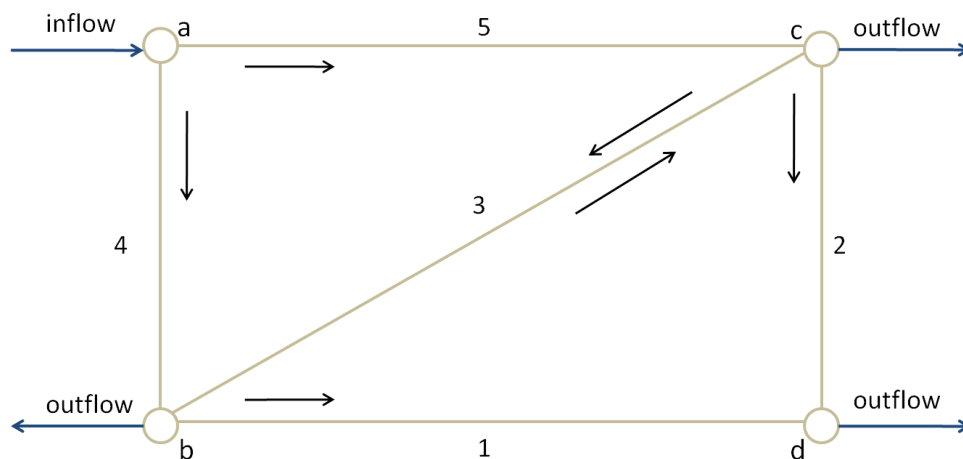
Η διαδρομή του νερού ξεκινά από τον κόμβο a και καταλήγει στον d, διερχόμενο από τους αγωγούς 4, 3, 2. Η πιθανότητα αστοχίας της 4^{ης} διαδρομής είναι:

$$\begin{aligned}
 P(F_{p,4}) &= 1 - \bar{P}_{f,4} \cap \bar{P}_{f,3} \cap \bar{P}_{f,2} = \\
 &= 1 - (1 - \bar{P}_{f,4}) \cdot (1 - \bar{P}_{f,3}) \cdot (1 - \bar{P}_{f,2}) = \\
 &= 0.271
 \end{aligned}$$

Εικόνα 2: Σχηματική παρουσίαση 4 διαδρομών σύμφωνα με την εφαρμογή της μεθόδου απαρίθμησης διαδρομών στο δίκτυο της Εικόνας 3

$$\begin{aligned}
\hat{P}_{f,ad} &= P(F_{p,1}) + P(F_{p,2}) - P(F_{p,1} \cap F_{p,2}) \\
&\quad + P(F_{p,3}) - P(F_{p,1} \cap F_{p,3}) - P(F_{p,2} \cap F_{p,3}) + P(F_{p,1} \cap F_{p,2} \cap F_{p,3}) \\
&\quad + P(F_{p,4}) - P(F_{p,1} \cap F_{p,4}) - P(F_{p,2} \cap F_{p,4}) - P(F_{p,3} \cap F_{p,4}) + P(F_{p,1} \cap F_{p,2} \cap F_{p,4}) \\
&\quad + P(F_{p,1} \cap F_{p,3} \cap F_{p,4}) + P(F_{p,2} \cap F_{p,3} \cap F_{p,4}) - P(F_{p,1} \cap F_{p,2} \cap F_{p,3} \cap F_{p,4}) \\
&= (1 - R^2) + (1 - R^2) - (1 - R^4) \\
&\quad + (1 - R^3) - (1 - R^4) - (1 - R^4) + (1 - R^5) \\
&\quad + (1 - R^3) - (1 - R^4) - (1 - R^4) - (1 - R^5) + (1 - R^5) \\
&\quad + (1 - R^5) + (1 - R^5) - (1 - R^5) \\
&= 1 - 2R^2 - 2R^3 + 5R^4 - 2R^5 \\
&= 0.0215
\end{aligned}$$

Η αξιοπιστία αντίστοιχα του δικτύου, όσον αφορά τη διαδρομή από τον κόμβο a στον d, υπολογίζεται ως: $\hat{R}_{s,ad} = 1 - \hat{P}_{f,ad} = 1 - 0.0215 = 0.9785$.



Εικόνα 3: Απλό δίκτυο για εφαρμογή της μεθόδου θεωρίας γράφων κα της μεθόδου Monte Carlo

3.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΟΜΩΝ

Η μέθοδος ελαχίστων τομών (Minimal Cut-set Method) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται εναλλακτικά για τον αναλυτικό υπολογισμό της αξιοπιστίας του δικτύου. Μια ελάχιστη τομή (F_C) ενός γράφου είναι αυτή που περιλαμβάνει τον ελάχιστο αριθμό στοιχείων. Στην περίπτωση ενός δικτύου ύδρευσης, μια τομή (cut-set) είναι μια ομάδα αγωγών, η οποία αν απομονωθεί, η ροή του νερού μεταξύ των κόμβων i και j δεν είναι δυνατή. Η πιθανότητα αστοχίας μιας τομής ισοδυναμεί με την πιθανότητα, ότι όλοι οι αγωγοί, που περιλαμβάνει η τομή, έχουν αστοχήσει, έτσι προκύπτει ένα παράλληλο σύστημα και η πιθανότητα είναι ίση με:

$$P(F_{c,m}) = \bar{P}_{f,1} \cap \bar{P}_{f,2} \cap \dots \bar{P}_{f,nc} = \prod_{n=1}^{nc} \bar{P}_{f,n} \quad (3.4)$$

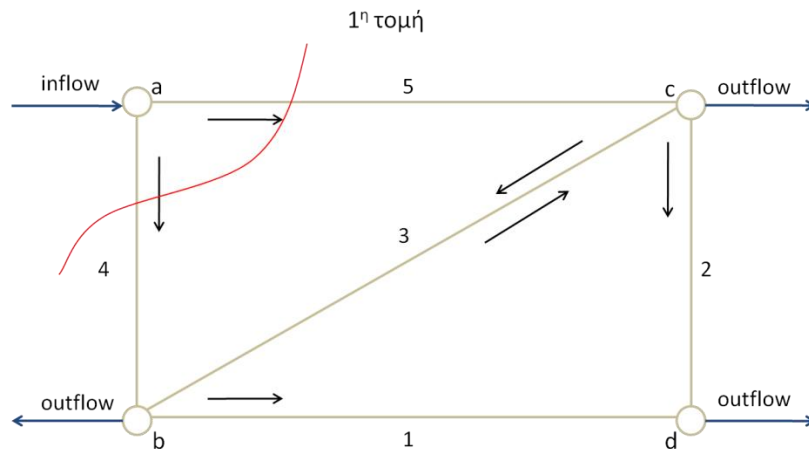
όπου nc είναι ο αριθμός των αγωγών της m -οστής τομής. Υπάρχουν ποικίλοι αλγόριθμοι, προκειμένου να βρούμε την ελάχιστη τομή ενός γραφήματος. Σύμφωνα με τη σχέση (3.4), τομές που εμπεριέχουν πολλούς αγωγούς έχουν μικρές πιθανότητες $P(F_{c,m})$ και γι' αυτό μπορούν να παραλειφθούν. Αν ακολουθηθεί η μέθοδος ελαχίστων τομών, η αξιοπιστία του δικτύου ισοδυναμεί με την πιθανότητα εμφάνισης τουλάχιστον μιας τομής. Επιπλέον, οι όροι με πολλές ενώσεις (μεγαλύτερες ή ίσες με 3) τομών μπορούν να αμεληθούν, αφού οι πιθανότητες τους είναι πολύ μικρές. Συνεπώς, αν M είναι ο αριθμός των ελαχίστων τομών μεταξύ i και j και αν χρησιμοποιήσουμε το F για να δηλώσουμε τις ελάχιστες τομές, τότε ο αναλυτικός υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας $\hat{P}_{f,ij}$ μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.2) και λαμβάνοντας υπόψη ότι:

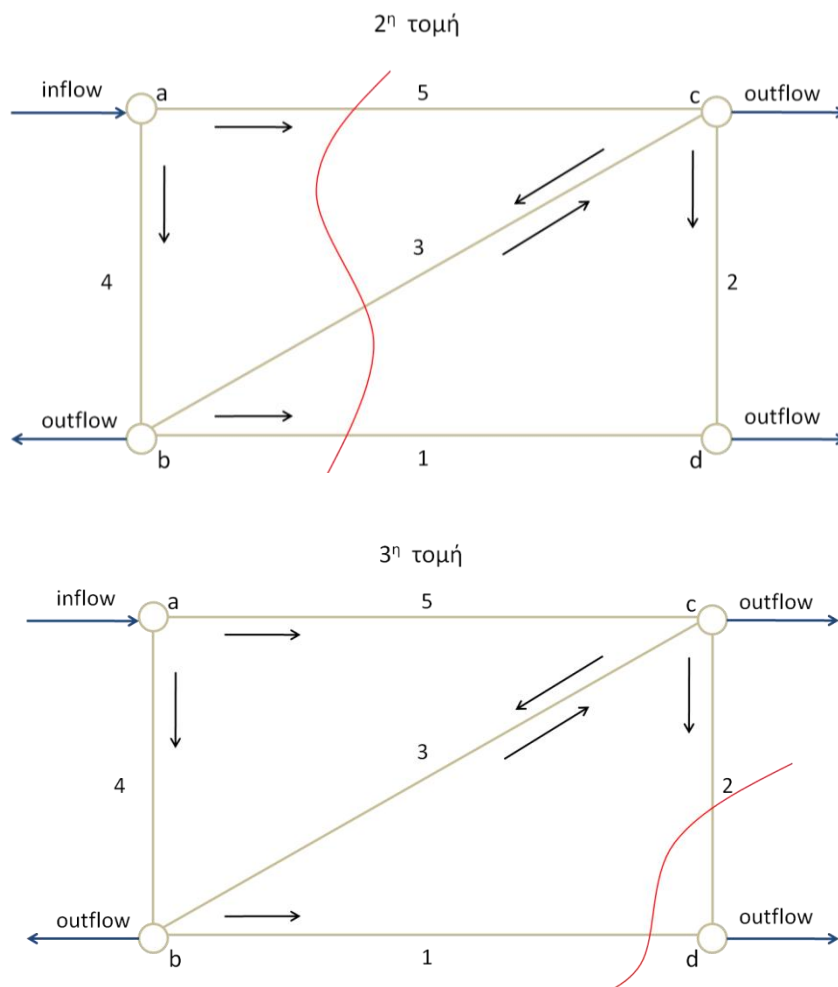
$$P_{f,ij}^{cut} = 1 - P_{f,ij}^{path} = 1 - P(F_{c,1} \cup F_{c,2} \cup \dots \cup F_{c,m}) \quad (3.5)$$

Παρατηρώντας το δίκτυο που φαίνεται παραπάνω στην Εικόνα 3, βλέπουμε ότι μπορούν να γίνουν 3 τομές: $F_{c,1}:4-5$, $F_{c,2}=1-3-5$, $F_{c,3}=1-2$, ενώ η πιθανότητα αστοχίας κάθε αγωγού είναι $\bar{P}_f = p = 1 - R$. Οι τομές προσομοιάζουν με τις διαδρομές της μεθόδου απαρίθμησης διαδρομών, αλλά έχουν επιλεγεί ακολουθώντας ένα διαφορετικό σκεπτικό. Η πιθανότητα αστοχίας των τομών είναι $P(F_{c,1}) = P(F_{c,3}) = p^2$, $P(F_{c,2}) = p^3$, $P(F_{c,1} \cap F_{c,2}) = p^4$, $P(F_{c,1} \cap F_{c,3}) = p^4$, $P(F_{c,2} \cap F_{c,3}) = p^4$, $P(F_{c,1} \cap F_{c,2} \cap F_{c,3}) = p^5$ και έτσι η πιθανότητα αστοχίας θα είναι:

$$\begin{aligned}
 \hat{P}_{f,ad} &= P(F_{c,1}) \\
 &+ P(F_{c,3}) - P(F_{c,1} \cap F_{c,3}) \\
 &+ P(F_{c,2}) - P(F_{c,1} \cap F_{c,2}) - P(F_{c,3} \cap F_{c,2}) + P(F_{c,1} \cap F_{c,3} \cap F_{c,2}) \\
 &= p^2 + p^2 - p^4 + p^3 - p^4 - p^4 + p^5 \\
 &= 2p^2 + p^3 - 3p^4 + p^5
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Εφαρμόζεται η διαδικασία της μεθόδου ελαχίστων τομών στο απλό δίκτυο της Εικόνα 3, προκειμένου να γίνει πλήρως κατανοητή και στα επόμενα σχήματα εμφανίζονται οι ελάχιστες τομές που πραγματοποιούνται. Καθεμία από τις 3 τομές επιλέχθηκε, έτσι ώστε να μην είναι δυνατή η ροή του νερού από τον κόμβο a προς τον d. Υποθέτουμε ότι για κάθε αγωγό $\bar{P}_f = p = 0.1$ και σύμφωνα με την (3.6), $\hat{P}_{f,ad} = 0.0207$ ή $\hat{R}_{s,ad} = 1 - 0.0207 = 0.9793$.





Εικόνα 4: Σχηματική παρουσίαση 3 τομών σύμφωνα με την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τομών στο δίκτυο της Εικόνας 3

3.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ MONTE CARLO

Η μέθοδος της προσομοίωσης Monte Carlo (MCS) χρησιμοποιείται όταν η αναλυτική λύση είναι δύσκολη ή υπολογιστικά χρονοβόρα να ευρεθεί. Αυτή είναι κυρίως η περίπτωση πολύπλοκης φύσης προβλημάτων, προβλημάτων με μεγάλο αριθμό μεταβλητών ή NP-hard προβλημάτων. Επιτυχημένες εφαρμογές της MCS έχουν γίνει από τους Javanbarg et al. (2009) και από τους Ramirez-Marquez and Coit (2005). Για τέτοια προβλήματα, αν ο αριθμός των

προσομοιώσεων, N_{∞} , είναι μεγάλος τότε μια αμερόληπτη εκτιμήτρια της πιθανότητας αστοχίας μπορεί να βρεθεί με τη χρήση της σχέσης:

$$\hat{P}_{f,ij} = \frac{1}{N_{\infty}} \sum_{j=1}^{N_{\infty}} I(x_j) \approx \frac{N_H}{N_{MCS}} \quad (3.7)$$

όπου $I(x_j)$ είναι ένα λογικό διάνυσμα που υποδεικνύει επιτυχείς ή ανεπιτυχείς προσομοιώσεις, N_H είναι ο αριθμός των αποτυχημένων προσομοιώσεων, N_{MCS} είναι ο συνολικός αριθμός των απαιτητών προσομοιώσεων ώστε να αποκτηθεί μια ακριβής εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας $\hat{P}_{f,ij}$. Έτσι για τον υπολογισμό του $\hat{P}_{f,ij}$ ένας επαρκής αριθμός N_{MCS} ανεξάρτητων, τυχαίων δειγμάτων παράγεται με τη χρήση μιας συγκεκριμένης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για κάθε στοιχείο του πίνακα x .

Συνεπώς, N_H είναι ο αριθμός των προσομοιώσεων που συνέβη αστοχία, ενώ N_{MCS} είναι ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων που χρειάστηκαν, για να επιτευχθεί μια ακριβής εκτίμηση της $\hat{P}_{f,ij}$. Αν απαιτείται ακρίβεια της τάξης του δ_0 , το μέγεθος του δείγματος προσεγγίζεται ως:

$$N_{MCS} = \frac{1}{\hat{P}_{f,ij} \delta_0^2} \quad (3.8)$$

Έτσι αν η επιθυμητή ακρίβεια είναι $\delta_0 = 10\%$ και η πιθανότητα που ζητείται είναι της τάξης του 0.01, ο απαιτούμενος αριθμός προσομοιώσεων N_{MCS} είναι $1 / (0.01 \times 0.1^2) = 10000$. Η εξίσωση (3.7) είναι ένας καλός δείκτης, που δηλώνει ότι πρέπει να έχουμε έναν ικανοποιητικό αριθμό αποτυχημένων προσομοιώσεων, ή με άλλα λόγια ο αριθμητής N_H πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να προκύψει μια αξιόπιστη εκτίμηση της P_f . Από τις αναλύσεις των δικτύων που διενεργήθηκαν, βγήκε το συμπέρασμα ότι το μέγεθος του δικτύου δεν επηρεάζει τις εκτιμήσεις αξιοπιστίας τους. Όμως όταν η διάσταση του δικτύου είναι μεγάλη, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του, ο απαραίτητος αριθμός προσομοιώσεων διαφέρει και ένας πιο

αναλυτικός τρόπος επεξεργασίας δεδομένων είναι απαραίτητος. Σε κάθε περίπτωση, σημαντικός υπολογιστικός φόρτος απαιτείται, ανάλογα με τη τάξη μεγέθους της πιθανότητας αστοχίας που ζητείται και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε προβλήματος.

Στην περίπτωση των αστικών δικτύων ύδρευσης, η μέθοδος Monte Carlo βασίζεται στη μείωση της τοπολογίας του δικτύου (αμελώντας διαδρομές του δικτύου, στις οποίες τμήματα αγωγών θεωρείται ότι έχουν αστοχήσει) και μειώνοντας έτσι το συνολικό αριθμό των θεωρούμενων διαδρομών. Αυτό επαναλαμβάνεται N_{MCS} φορές, δηλαδή N_{MCS} επιλύσεις του δικτύου πραγματοποιούνται για να βρούμε την $\hat{P}_{f,ij}$. Τα βασικά βήματα της μεθόδου Monte Carlo δίνονται παρακάτω και πρέπει να επισημανθεί ότι στην παρούσα εργασία έχει ληφθεί υπόψη η παλαιότητα του δικτύων ενιαία για όλη την έκταση του μέσω του συντελεστή $k=3.5$ που αυξάνει τις πιθανότητες αστοχίας των αγωγών:

- Σχεδιάζεται το αστικό δίκτυο ύδρευσης ως ένα κατευθυνόμενο γράφημα, με τους αγωγούς να αναπαρίστανται ως τόξα και τις συνδέσεις ως κόμβοι
- Για διάφορα σεισμικά σενάρια (M_w , PGV, PGD), δημιουργούνται προσομοιώσεις
 - Εκχωρούνται οι πιθανότητες αστοχίας σε κάθε τόξο-αγωγό, λαμβάνοντας υπόψη την παλαιότητα του δικτύου μέσω του συντελεστή k , όπως φαίνεται από την εξίσωση (2.8)
 - Με βάση την πιθανότητα αστοχίας P_f του κάθε αγωγού, καθορίζεται αν αυτός αστοχεί (0) ή όχι (1).
 - Απαριθμούνται όλες οι διαδρομές από τον κόμβο i στον κόμβο j , απομακρύνοντας τους αγωγούς που αστόχησαν.
 - Εάν δεν υπάρχει διαδρομή μεταξύ των κόμβων εισόδου-εξόδου, αυξάνεται ο μετρητής αποτυχημένων προσομοιώσεων (N_{failed}) κατά 1.
- Υπολογίζεται η πιθανότητα να μην φτάσει νερό από τον κόμβο i στον j

$$\hat{P}_{f,ij} = N_{failed} / N_{MCS}$$

Το διάγραμμα ροής της μεθόδου Monte Carlo, που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της εργασίας, δίνεται στην Εικόνα 5 και υπολογίζει μαζί $\hat{P}_{f,ij}$ και δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης του

δικτύου SR (θα αναλυθεί παρακάτω). Σε κάθε προσομοίωση, εκχωρείται για κάθε αγωγό είτε η τιμή (0) με πιθανότητα \bar{P}_f , που υποδηλώνει ότι αυτός έχει αστοχήσει, είτε η τιμή (1) με πιθανότητα $1 - \bar{P}_f$, που σημαίνει μη-αστοχία. Η \bar{P}_f αντιστοιχεί στην πιθανότητα αστοχίας του κάθε αγωγού. Από τη στιγμή που κάθε αγωγός έχει πάρει την τιμή (0) ή (1) αφαιρούνται από το δίκτυο οι αγωγοί, που έχουν αστοχήσει και χρησιμοποιώντας αλγόριθμους με βάση τη θεωρία γράφων, μπορούμε να προσδιορίσουμε αν υπάρχει διαδρομή μεταξύ των κόμβων i και j , η οποία φανερώνει ότι είναι εφικτή η ροή του νερού μεταξύ των i και j . Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Dijkstra, ο οποίος δίνει γρήγορους και ακριβείς υπολογισμούς. Αν υπάρχει τουλάχιστον μια διαδρομή μεταξύ ενός κόμβου εισόδου νερού i και ενός κόμβου εξόδου j , τότε η προσομοίωση θεωρείται επιτυχημένη. Αφού τελειώσουν όλες οι προσομοιώσεις, η αξιοπιστία του δικτύου, αναφορικά με την διαδρομή $i \rightarrow j$, μπορεί να υπολογιστεί, διαιρώντας τον αριθμό των επιτυχημένων προσομοιώσεων με το συνολικό αριθμό τους. Αλλιώς, η πιθανότητα αστοχίας $\hat{P}_{f,ij}$ μπορεί να υπολογιστεί, διαιρώντας τον αριθμό των αποτυχημένων προσομοιώσεων με το συνολικό αριθμό τους ($\hat{P}_{f,ij} = N_{failed} / N_{MCS}$). Η μέθοδος Monte Carlo διευκολύνει ιδιαίτερα τον υπολογισμό αστοχιών για αγωγούς και κόμβους δικτύων ύδρευσης.

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ:

- Δεδομένη τοπολογία δικτύου (nn: αριθμός κόμβων, ne: αριθμός αγωγών).
- Δεδομένες σεισμικές παράμετροι (μέγεθος M_w , PGV, PGD κ.α.).
- Διάνυσμα κόμβων εισροής νερού, {συμβολίζεται με i }.
- Διάνυσμα κόμβων εκροής νερού, {συμβολίζεται με j }.
- Διάνυσμα για πιθανότητες αστοχίας αγωγών {συμβολίζεται με P_f }

for all inflow nodes **do**

for all outflow nodes **do**

- generate a vector r of N_{MCS} times, so that $r_k \in [0,1]$, $k = 1 \dots N_{MCS}$.

for all pipes **do**

- according to P_f , determine if the pipe survives (or fails), using a binomial distribution.
- **if** the pipe survives: (1-state) $\rightarrow x_s = 1$, **else** the pipe fails: (0-state) $\rightarrow x_s = 0$

end for

set $countFailedSimulations = 0$,

for all samples with least one failed pipe **do**

- remove from the network all failed pipes { pipes with $x_s = 0$ }
- **if** no path exists between inflow-outflow nodes
 $countFailedSimulations = countFailedSimulations + 1$

end for

calculate $P_{f,ij} = countFailedSimulations / N_{MCS}$

end for {inflow nodes loop}

- obtain $X = [1, 2, \dots, X_k], k = 1 \dots m$.

end for {outflow nodes loop}

- calculate $SR = \sum_{k=1}^m (\omega_k X_k) / \sum_{k=1}^m \omega_k$ {serviceability ratio}

Εικόνα 5: Περιγραφή του αλγορίθμου Monte Carlo που χρησιμοποιήθηκε. Υπολογίζονται η πιθανότητα αστοχίας των κόμβων ($\hat{P}_{f,ij}$) και ο δείκτης SR του δικτύου.

Προκειμένου να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου, έγινε εφαρμογή της στο απλό δίκτυο της Εικόνας 3 και συνοψίζονται παρακάτω στον Πίνακα 2 τα αποτελέσματα των πιθανοτήτων αστοχίας για τους κόμβους εξόδου b, c, d. Γίνεται η παραδοχή ότι, η πιθανότητα αστοχίας όλων των σωλήνων είναι ίση με $\bar{P}_f = p = 0.1$, ($R=0.9$) και η αναλυτική λύση για την πιθανότητα αστοχίας των δικτύου, αναφορικά με τη διαδρομή $a \rightarrow d$ είναι:

$\hat{P}_{f,ij} = 1 - 2R^2 - 2R^3 + 5R^4 - 2R^5 = 0.0215$. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2, τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo, που ταιριάζουν μ' αυτά της αναλυτικής λύσης, δίνονται από την εκτέλεση του κώδικα στις 10.000 προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή πιθανότητας αστοχίας για τον κόμβο d στις 10.000 προσομοιώσεις, μετά από 30 επαναλήψεις του κώδικα είναι 0.0217 (κελί με πορτοκαλί χρώμα), πολύ κοντά στο 0.0215. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, τα αποτελέσματα της μεθόδου συγκλίνουν σ' αυτόν τον αριθμό προσομοιώσεων.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα πιθανοτήτων αστοχίας από εφαρμογή μεθόδου Monte Carlo στο δίκτυο της Εικόνα 3

Α/Α Προσομοίωσης	Προσομοιώσεις: 1.000			Προσομοιώσεις: 10.000			Προσομοιώσεις: 100.000		
	b	c	d	b	c	d	b	c	d
1	0,0120	0,0130	0,0240	0,0159	0,0151	0,0284	0,0114	0,0116	0,0217
2	0,0160	0,0160	0,0300	0,0097	0,0097	0,0202	0,0113	0,0112	0,0206
3	0,0140	0,0150	0,0250	0,0127	0,0129	0,0211	0,0113	0,0116	0,0211
4	0,0140	0,0140	0,0250	0,0125	0,0117	0,0213	0,0119	0,0117	0,0218
5	0,0150	0,0120	0,0240	0,0132	0,0135	0,0214	0,0118	0,0118	0,0212
6	0,0120	0,0080	0,0170	0,0142	0,013	0,0222	0,0113	0,0113	0,0216
7	0,0070	0,0070	0,0160	0,0119	0,0118	0,0231	0,0117	0,0112	0,0218
8	0,0110	0,0120	0,0210	0,0109	0,0123	0,0214	0,0116	0,0113	0,0211
9	0,0180	0,0150	0,0290	0,0119	0,0116	0,0214	0,0121	0,0124	0,0216
10	0,0170	0,0170	0,0280	0,0118	0,0117	0,023	0,0117	0,0116	0,0213
11	0,0020	0,0050	0,0140	0,0121	0,0112	0,0229	0,0116	0,0115	0,0215
12	0,0090	0,0100	0,0180	0,0105	0,0106	0,0217	0,0115	0,0114	0,0218
13	0,0130	0,0130	0,0210	0,0127	0,0135	0,025	0,0113	0,0113	0,0215
14	0,0070	0,0080	0,0170	0,0112	0,0106	0,0208	0,0115	0,0112	0,0213
15	0,0050	0,0070	0,0120	0,0123	0,0115	0,0227	0,0119	0,0118	0,0213
16	0,0170	0,0140	0,0320	0,0118	0,0127	0,0212	0,0123	0,0123	0,022
17	0,0070	0,0060	0,0130	0,0112	0,0116	0,0221	0,0115	0,0112	0,0213
18	0,0090	0,0100	0,0210	0,0104	0,0114	0,019	0,012	0,0117	0,0214
19	0,0160	0,0130	0,0260	0,0114	0,0103	0,0207	0,0116	0,0116	0,0215
20	0,0110	0,0120	0,0190	0,0105	0,0106	0,0219	0,0116	0,0115	0,0213
21	0,0120	0,0110	0,0210	0,0113	0,0112	0,0206	0,0119	0,0117	0,0212
22	0,0060	0,0060	0,0120	0,0123	0,0117	0,0211	0,0117	0,0118	0,0218
23	0,0070	0,0070	0,0140	0,0115	0,0113	0,0193	0,0117	0,0117	0,0211
24	0,0060	0,0040	0,0140	0,0114	0,0111	0,021	0,0116	0,012	0,0215
25	0,0130	0,0110	0,0230	0,0132	0,0135	0,0227	0,0115	0,0114	0,0212
26	0,0100	0,0110	0,0220	0,0129	0,013	0,0231	0,0122	0,012	0,0224
27	0,0110	0,0100	0,0240	0,0113	0,0121	0,0212	0,012	0,0117	0,0213
28	0,0090	0,0110	0,0160	0,0125	0,0117	0,0207	0,0124	0,0122	0,0221
29	0,0150	0,0120	0,0220	0,014	0,0141	0,0246	0,0115	0,0116	0,0211
30	0,0140	0,0170	0,0320	0,0117	0,011	0,0199	0,0113	0,0113	0,021
Μέση Τιμή	0,0112	0,0109	0,0211	0,0120	0,0119	0,0217	0,0117	0,0116	0,0214
Τυπική Απόκλιση	0,0041	0,0036	0,0059	0,0013	0,0012	0,0018	0,0003	0,0003	0,0004

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Από τη στιγμή που η πιθανότητα αστοχίας κάθε αγωγού είναι γνωστή, η απόδοση του δικτύου και η πιθανότητα αστοχίας του μπορεί να εκτιμηθεί. Ανάλογα με τον τύπο του προβλήματος, διαφορετικές προσεγγίσεις μπορούν να επιλεγούν. Η πιο σημαντική παράμετρος, που επηρεάζει την επιλογή της μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί είναι πώς μετράται η απόδοση του δικτύου και πώς ορίζεται η πιθανότητα αστοχίας του. Στην απλούστερη περίπτωση, ένα δίκτυο αστοχεί όταν δεν μπορεί να μεταφέρει νερό από τους κόμβους εισόδου σε κάθε οικιακή σύνδεση, δηλαδή στους κόμβους εξόδου του. Μια άλλη προσέγγιση θα μπορούσε να λάβει υπόψη τον αριθμό των καταναλωτών, που μένουν χωρίς νερό. Εάν τέτοιοι απλοποιημένοι ορισμοί της απόδοσης του δικτύου υιοθετηθούν, η απόδοση μπορεί να υπολογιστεί γρήγορα χρησιμοποιώντας μεθόδους, που βασίζονται στη θεωρία γράφων (Graph Theory). Εναλλακτικά, αν η αστοχία εξαρτάται από τις υδραυλικές παραμέτρους, τότε θα πρέπει να γίνει υδραυλική ανάλυση με το κατάλληλο λογισμικό και να εξεταστούν οι παράμετροι που οδηγούν το δίκτυο σε αστοχία ή δεν εξασφαλίζουν ένα επιθυμητό επίπεδο εξυπηρέτησης. Για παράδειγμα, η πίεση του νερού σε κάθε οικιακή σύνδεση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μια ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή. Στην παρούσα εργασία, θεωρείται σαν αστοχία του δικτύου η αδυναμία του να παρέχει νερό σε έναν καταναλωτή ή σε μια οικιακή σύνδεση. Γι' αυτό ορίζουμε σαν πιθανότητα αστοχίας, την πιθανότητα το δίκτυο να μην μπορεί να μεταφέρει νερό από ένα κόμβο εισόδου i σε ένα κόμβο εξόδου j . Συνεπώς αν η πιθανότητα αστοχίας να μεταφερθεί νερό μεταξύ των i και j συμβολίζεται ως $\hat{P}_{f,ij}$, η αξιοπιστία του δικτύου αντίστοιχα δηλώνεται ως:

$$\hat{R}_{s,ij} = 1 - \hat{P}_{f,ij} \quad (3.9)$$

Για δίκτυα νερού με περισσότερους από έναν κόμβους εισόδου, θεωρείται σαν πιθανότητα αστοχίας, η μικρότερη πιθανότητα μεταξύ όλων των κόμβων εισόδου και του εξεταζόμενου κόμβου εξόδου. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται από την εγγύτητα μεταξύ κόμβων εισόδου και κόμβου εξόδου, καθώς και από την τοπολογία του δικτύου και τις πιθανές διαδρομές που

δημιουργούνται μεταξύ τους. Για να υπολογιστεί η πιθανότητα αστοχίας, ακολουθείται μια μέθοδος, που βασίζεται στην προσομοίωση Monte Carlo (MCS).

Η κατάσταση του δικτύου μπορεί να εκτιμηθεί, υιοθετώντας την έννοια της "Απώλειας Συνδεσιμότητας" (Loss of Connectivity: LOC) ή με τη χρήση του "Λόγου Ικανότητας Εξυπηρέτησης" (Serviceability Ratio: SR). Με βάση τους δείκτες LOC και SR, είναι εφικτό να προσδιορίσουμε αποδεκτά επίπεδα απόδοσης του δικτύου. Για παράδειγμα, μια τιμή LOC ίση με 20%, 50% και 80% δηλώνει ελάχιστο, μέτριο και μεγάλο επίπεδο ζημιάς, αντίστοιχα. Η απώλεια της συνδεσιμότητας μεταξύ ενός κόμβου εισόδου νερού i και ενός κόμβου εξόδου j , υπολογίζεται απλά ως ο λόγος των δυνατών διαδρομών μεταξύ των i και j ($N_{p,ij}$) του δικτύου με ζημιές προς αυτές του αρχικού δικτύου χωρίς ζημιές:

$$LOC_{ij} = 1 - (N_{p,ij}^{dam.}) / (N_{p,ij}^{orig.}) \quad (3.10)$$

Η εξίσωση (3.10) αφορά σε μια μεμονωμένη διαδρομή $i \rightarrow j$, ενώ η μέση τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρούμε ένα δείκτη που εκτιμά την απώλεια συνδεσιμότητας όλου του δικτύου LOC_{net} .

Ο τύπος του λόγου ικανότητας εξυπηρέτησης (SR) δίνεται στην εξίσωση (3.11). Αν ω_j είναι ο πληθυσμός ή ο αριθμός των καταναλωτών της οικιακής σύνδεσης j , N είναι ο αριθμός των κόμβων του δικτύου και X_j είναι μια δυαδική παράμετρος, που δηλώνει αν ο κόμβος j είναι προσπελάσιμος ή όχι, δηλαδή αν μπορεί το νερό να φτάσει από τον κόμβο εισόδου στον κόμβο j , τότε το SR ορίζεται ως:

$$SR = \frac{\sum_j^N \omega_j X_j}{\sum_j^N \omega_j} \quad (3.11)$$

Προκειμένου να αποφασίσουμε αν είναι δυνατό να μεταφερθεί νερό στον κόμβο j ξεκινώντας από τον κόμβο i , μοντελοποιούμε το δίκτυο με τη βοήθεια ενός γράφου (Graph model) και στη συνέχεια εφαρμόζουμε ένα πρότυπο αλγόριθμο Dijkstra της θεωρίας γράφων. Ο Dijkstra

πρόκειται για ένα πολύ συνηθισμένο μαθηματικό αλγόριθμο εύρεσης συντομότερων διαδρομών (single-source shortest path problem) σε ένα κατευθυνόμενο ή μη γράφημα, που δίνει γρήγορους και έγκυρους υπολογισμούς σε εφαρμογές δικτύων. Το μητρώο συνδεσιμότητας B μπορεί να υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας το μητρώο γειτνίασης A_{ij} . Τα στοιχεία του μητρώου γειτνίασης μπορεί να είναι 0 ή 1, ανάλογα με το αν υπάρχει αγωγός, που συνδέει τον κόμβο i με τον j . Έτσι αν n είναι ο αριθμός των κόμβων του γραφήματος το B υπολογίζεται ως:

$$B = A^1 + A^2 + \dots + A^{n-1} \quad (3.12)$$

και οι κόμβοι i, j συνδέονται μόνο αν $B(i, j) \neq 0$.

Οι δείκτες SR και LOC μπορούν να υπολογιστούν εύκολα με τη βοήθεια του αλγορίθμου Monte Carlo. Όμως ο υπολογισμός του LOC περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των διαθέσιμων διαδρομών μεταξύ των κόμβων i και j και όσο το δίκτυο μεγαλώνει, ο υπολογιστικός φόρτος για την εύρεση του δείκτη LOC αυξάνεται εκθετικά. Στη γλώσσα της επιστήμης των υπολογιστών, αυτό είναι ένα NP-hard πρόβλημα και έτσι ο υπολογισμός του LOC χαρακτηρίζεται μη πρακτικός ή σε περιπτώσεις μεγάλων δικτύων, αδύνατος.

Αντιθέτως, το SR εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων του δικτύου και γι' αυτό η υπολογιστική προσπάθεια αυξάνει γραμμικά με τον αριθμό των κόμβων. Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέγεται ο δείκτης απόδοσης SR για να προσδιοριστεί η ολική κατάσταση του δικτύου. Μέσα στον αλγόριθμο Monte Carlo, το SR υπολογίζεται N_{MCS} φορές και έτσι μπορούν να υπολογιστούν τα στατιστικά στοιχεία, μέση τιμή και τυπική απόκλιση, τα οποία φανερώνουν την ολική κατάσταση του δικτύου για δεδομένη ομάδα τιμών $\hat{P}_{f,ij}$. Προκείμενου να δοθεί μια ποσοτική ερμηνεία των τιμών SR που προκύπτουν, $SR \geq 80\%$ υποδηλώνει καλή απόδοση του δικτύου, ενώ $SR \leq 30\%$ ανεπαρκή απόδοση και οι ενδιάμεσες τιμές αντιστοιχούν σε μέτρια απόδοση.

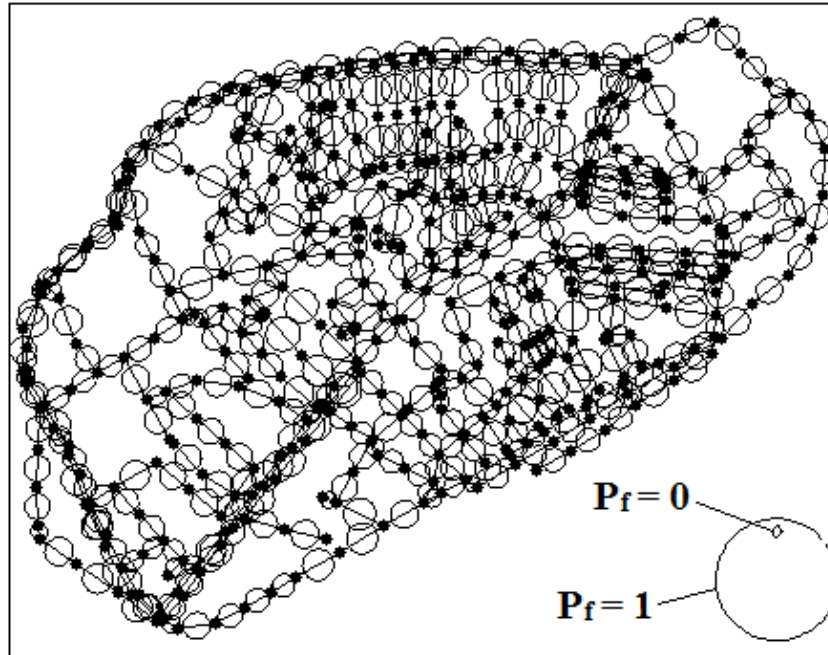
Στην αριθμητική εφαρμογή, που θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο, υπολογίζεται το SR για τη χρονική στιγμή αμέσως μετά το σεισμό καθώς και σε επόμενες χρονικές στιγμές κατά τις

οποίες επισκευάζονται σταδιακά οι αγωγοί που υπέστησαν βλάβες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το SR, μέχρι να επιτευχθεί ο επιθυμητός στόχος και το δίκτυο να φτάσει σε επίπεδα απόδοσης πριν από το σεισμό.

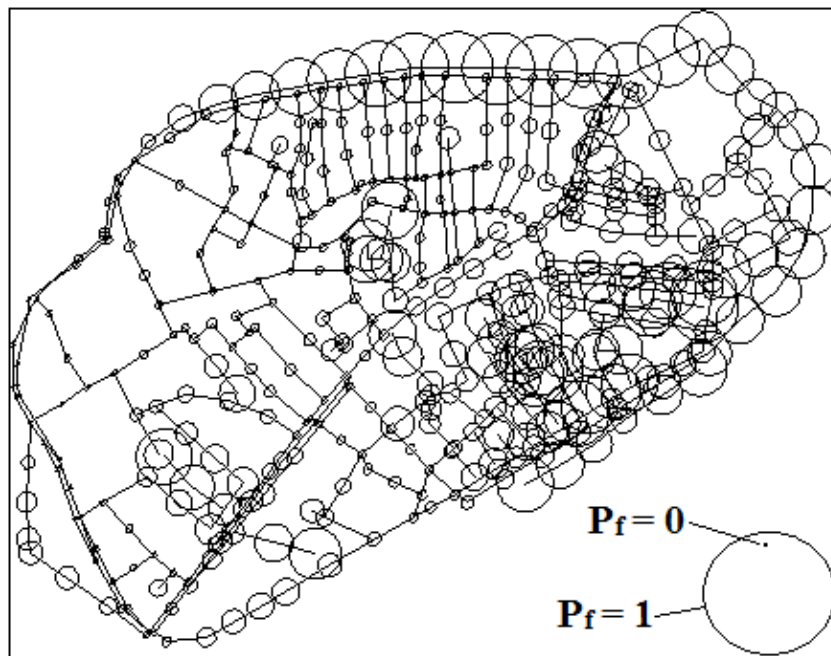
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

4.1 ΑΠΛΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΟ MATLAB

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η λειτουργία και ο τρόπος σύνδεσης των συστατικών στοιχείων ενός δικτύου ύδρευσης, θα πρέπει να γίνει γραφική αναπαράσταση του, μέσω χρήσης κατάλληλου λογισμικού. Τα τελευταία χρόνια έχει επεκταθεί ιδιαίτερα η αξιοποίηση του προγράμματος MATLAB ως εργαλείο απεικόνισης δικτύων, καθώς παρέχει τη δυνατότητα, πέρα από την ανάλυση και την εξαγωγή των ζητούμενων αποτελεσμάτων, για αποτύπωση και πλήρη εποπτεία της κατάστασης του δικτύου σε διάφορες φάσεις της ανάλυσης και επομένως καθιστά πιο εύκολη την επέμβαση από τη πλευρά του χρήστη και την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων. Μάλιστα, αφού υπολογιστούν οι πιθανότητες αστοχίας των αγωγών και των κόμβων, το MATLAB δίνει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης του δικτύου με την επισήμανση των αντίστοιχων τιμών των πιθανοτήτων και τη χρήση των απαιτούμενων συμβόλων και χρωμάτων για την καλύτερη αναπαράσταση του. Στην Εικόνα 6 φαίνεται το δίκτυο της Λευκάδας, που θα αναλυθεί στο κεφάλαιο των αριθμητικών εφαρμογών, όπου με κύκλο διαφορετικής διαμέτρου απεικονίζονται σχηματικά οι πιθανότητες αστοχίας των αγωγών. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερος ο κύκλος, τόσο μεγαλύτερη και η πιθανότητα αστοχίας του αγωγού. Επίσης, στην Εικόνα 7 παριστάνονται παρομοίως, τα μεγέθη των πιθανοτήτων αστοχίας των κόμβων με κύκλους μεταβαλλόμενης διαμέτρου, δίνοντας αδρομερώς μια αποτύπωση των βλαβών, που έχει υποστεί το δίκτυο λόγω σεισμού. Ωστόσο, η απεικόνιση του δικτύου και των στοιχείων του μέσω MATLAB προϋποθέτει τη συγγραφή κώδικα, που πολλές φορές είναι χρονοβόρα και δεν έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα, αναφορικά με την αποτύπωση του δικτύου και έτσι αποφασίστηκε στο πλαίσιο της εργασίας να μη χρησιμοποιηθεί.



Εικόνα 6: Απεικόνιση πιθανοτήτων αστοχίας αγωγών δικτύου στο MATLAB



Εικόνα 7: Απεικόνιση πιθανοτήτων αστοχίας κόμβων δικτύου στο MATLAB

4.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ GIS ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ARCMAP

Ως Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΓΣΠ, Geographic Information System, GIS) ορίζεται ένα σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, τη διαχείριση και την απεικόνιση χωρικών δεδομένων, που υποστηρίζει τη διαδικασία του σχεδιασμού, παρέχοντας τη δυνατότητα στο χρήστη, να αναλύει γεωγραφικές πληροφορίες για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό, σύμφωνα με το δικό του μοντέλο λήψης αποφάσεων (Burrough P. 1986). Γενικότερα τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών μπορούν να θεωρηθούν σαν ένα σύνολο προγραμμάτων, που λειτουργούν πάνω σε μια χωρική βάση δεδομένων (Goodchild M. 1992).

Το λογισμικό ενός ΓΣΠ περιλαμβάνει έξι βασικά υποσυστήματα για:

- Εισαγωγή δεδομένων και έλεγχο-επαλήθευση τους, που καλύπτει τις ανάγκες μετασχηματισμού των στοιχείων από την αρχική τους μορφή (π.χ. χάρτες, αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες, πίνακες, κλπ.) σε αναγνωρίσιμη ψηφιακή μορφή.
- Διαχείριση της γεωγραφικής βάσης δεδομένων, που αναφέρεται στον τρόπο που δομούνται και οργανώνονται τα χωρικά και μη χωρικά στοιχεία.
- Μετασχηματισμό των δεδομένων, που στοχεύουν στον συντονισμό και την ανάλυση των στοιχείων.
- Αναζήτηση, που βοηθά το χρήστη να επικοινωνεί με τον Η/Υ αναζητώντας λύση μέσα από μια σειρά ερωτημάτων.
- Εργαλεία χωρικής ανάλυσης, αναγκαία για την κάλυψη των αναγκών για εμπειρικές εφαρμογές, που ουσιαστικά αναφέρονται στην ανάλυση χώρου.

Στο πλαίσιο της εργασίας, προκειμένου να δημιουργηθούν χάρτες κατανομής του πληθυσμού ανά κόμβο και να αναπαρασταθούν οι πιθανότητες αστοχίας των κόμβων του δικτύου, αλλά και για την μετέπειτα επεξεργασία και μελέτη του μοντέλου του δικτύου, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ArcGIS (ESRI), στο οποίο εμπεριέχεται το λογισμικό ArcMap. Με το ArcMap, επιδιώκεται η ευκολότερη και πιο κατανοητή αναπαράσταση των δεδομένων σε σύστημα συντεταγμένων Χ-Υ με τη χρήση διαφόρων επιπέδων (Layers), η περαιτέρω επεξεργασία τους

με τη χρήση εντολών του λογισμικού καθώς και η δημιουργία βάσης δεδομένων για την καλύτερη αποθήκευση και αναπαράσταση των διαφόρων στοιχείων του δικτύου. Η βάση αυτή περιλαμβάνει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του δικτύου, όπως μήκος σωλήνα, υλικό σωλήνα, διάμετρο, συντεταγμένες κόμβων στο χώρο. Η Εικόνα 8 δείχνει ένα παράδειγμα της βάσης δεδομένων που δημιουργείται και περιλαμβάνει τις συντεταγμένες των κόμβων αρχής-τέλους κάθε αγωγού και το μήκος του.

Τα διάφορα στοιχεία ενός δικτύου ύδρευσης μπορούν να εισαχθούν σε ένα ΓΣΠ με τη χωρική τους υπόσταση (σημεία, γραμμές, πολύγωνα) αλλά και με τις περιγραφικές πληροφορίες που τα αφορούν (π.χ. πιέσεις των κόμβων). Ο τρόπος εισαγωγής και επεξεργασίας των δεδομένων στο λογισμικό ArcMap δίνεται παρακάτω:

- Γίνεται εισαγωγή σε φύλλο Excel των απαιτούμενων δεδομένων για τους αγωγούς (αριθμός, κόμβοι αρχής-τέλους και συντεταγμένες ΧΥ αυτών, μήκος, υλικό, σεισμικές παράμετροι PGV, PGD, PGS).
- Στο ίδιο φύλλο Excel εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν τους κόμβους (αριθμός, συντεταγμένες ΧΥ, πιθανότητες αστοχίας για τη χρονική στιγμή μετά το σεισμό καθώς και σε μετέπειτα φάσεις επιδιόρθωσης).
- Στο περιβάλλον ArcMap επιλέγεται εισαγωγή δεδομένων (Add Data) και αναζητείται στον αντίστοιχο φάκελο το παραπάνω αρχείο Excel, το οποίο πλέον εμφανίζεται στον πίνακα περιεχομένων (Table of Contents) ως επίπεδο (Layer). Με δεξί κλικ στο συγκεκριμένο layer και την εντολή Display XY Data εμφανίζονται οι κόμβοι του δικτύου, με την προϋπόθεση ότι έχει προσδιοριστεί το σωστό σύστημα συντεταγμένων ΧΥ.
- Προκειμένου να είναι εφικτό να μελετηθούν και να τροποποιηθούν τα στοιχεία του παραπάνω layer, θα πρέπει να γίνει εξαγωγή του σε αρχείο τύπου Shape file.
- Για να σχεδιαστούν οι αγωγοί, που παριστάνονται ως γραμμές μεταξύ των κόμβων, χρησιμοποιείται η εντολή XY To Line, η οποία βρίσκεται στο παράθυρο ArcToolbox. Θα πρέπει να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες του κόμβου αρχής και τέλους κάθε αγωγού και το μήκος του, στοιχεία που εισάγονται σε φύλλο Excel.

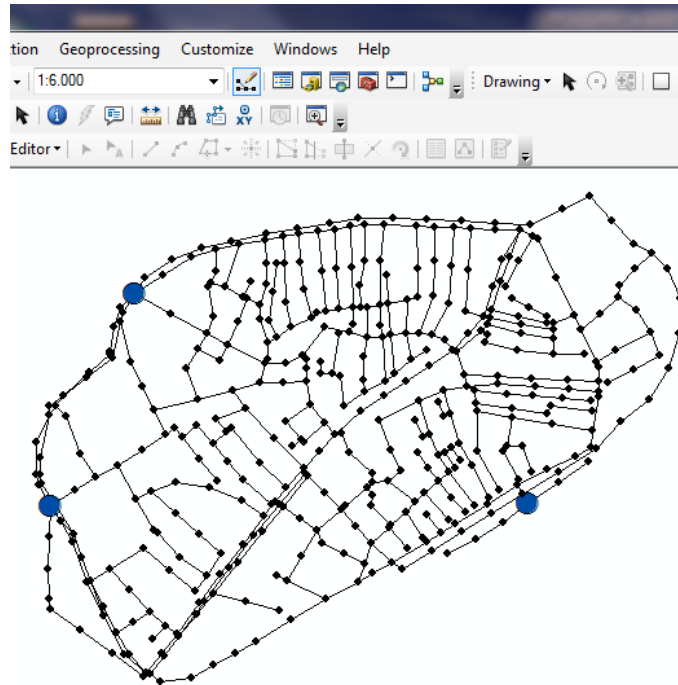
- Για να αναπαρασταθούν οι πιθανότητες αστοχίας των κόμβων, εκχωρήθηκαν οι τιμές των πιθανοτήτων στη βάση δεδομένων (φύλλο Excel) των κόμβων του δικτύου στο ArcMap και ακολούθησε παρεμβολή των τιμών (Interpolation) για δημιουργία χάρτη(Heat Map). Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε είναι η Kriging, η οποία κρίθηκε η πλέον κατάλληλη για την αριθμητική εφαρμογή, που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου γραμμικής παρεμβολής σε κάθε περίπτωση σχετίζεται τόσο με την χωρική κατανομή των σημείων δειγματοληψίας, όσο και με το φαινόμενο που μελετάται. Επίσης εξαρτάται από τα διατιθέμενα εργαλεία που διαθέτει κάθε πρόγραμμα. Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιείται το ArcGIS 10.3.1 (ESRI), το οποίο περιλαμβάνει συγκεκριμένες μεθόδους παρεμβολής:

- IDW (Inverse Distance Weighted)
- Kriging
- Natural Neighbor
- Spline
- Topo to raster
- Trend

OID*	Shape*	start x	start y	dest x	dest y	Shape Length
1	Polyline	891,13534	700,573396	913,3974	689,713836	24,769525
2	Polyline	278,302537	639,485362	322,795105	615,394179	50,596183
3	Polyline	322,795105	615,394179	367,287672	591,302996	50,596182
4	Polyline	367,287672	591,302996	393,743881	577,238781	29,962195
5	Polyline	393,743881	577,238781	438,967098	553,668209	50,997169
6	Polyline	438,967098	553,668209	464,120047	553,668209	25,152949
7	Polyline	464,120047	553,668209	485,363218	564,476808	23,834809
8	Polyline	485,363218	564,476808	512,765671	598,956021	44,042145
9	Polyline	564,836659	586,84592	583,347594	586,84592	18,510935
10	Polyline	583,347594	586,84592	593,605282	588,714136	10,426428
11	Polyline	593,605282	588,714136	611,759864	590,991837	18,296906
12	Polyline	611,759864	590,991837	628,530383	590,991837	16,770519

Εικόνα 8: Βάση δεδομένων στο ArcMap



Εικόνα 9: Απεικόνιση δικτύου στο ArcMap

4.3 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕΣΩ ΑΡΧΕΙΩΝ DXF

Το DXF (Drawing Interchange Format) είναι ένας τύπος αρχείου, που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει δεδομένα μεταξύ διαφόρων λογισμικών. Ένα αρχείο DXF μπορεί να είναι είτε δυαδικής είτε ASCII μορφής και συνήθως χρησιμοποιείται για να μεταφέρει σχεδιαστικά δεδομένα μεταξύ CAD προγραμμάτων. Είναι εφικτό να μετατραπεί ένα αρχείο DXF σε μορφή DWG και έπειτα να επεξεργαστεί, όπως ένα οποιοδήποτε σχεδιαστικό αρχείο, αλλά και να γίνει εξαγωγή ενός σχεδίου (ή επιλεγμένων αντικειμένων μέσα σε ένα σχέδιο) σε αρχείο DXF.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, χρησιμοποιείται η DXFLib, η οποία είναι μια βιβλιοθήκη, γραμμένη σε κώδικα MATLAB και επιτρέπει τη δημιουργία απλών αρχείων AutoCAD DXF. Με τη βοήθεια της DXFLib μπορεί να γίνει εξαγωγή σημείων, γραμμών, επιφανειών, κειμένου και γεωμετρικών σχημάτων. Στην περίπτωση ενός δικτύου ύδρευσης,

χρειάζεται να απεικονιστούν οι κόμβοι με μικρούς σημειακούς κύκλους και οι αγωγοί με ευθύγραμμα τμήματα, που συνδέουν τους κύκλους.

Ένα ευθύγραμμο τμήμα ορίζεται από τις συντεταγμένες X1, Y1 του αρχικού σημείου και τις συντεταγμένες X2, Y2 του τελικού σημείου. Για κάθε ευθύγραμμο τμήμα του σχεδίου στο αρχείο DXF πρέπει να γραφεί:

```
{0 LINE 10 X1 20 Y1 11 X2 21 Y2}T
```

το οποίο μεταφράζεται σε κώδικα MATLAB ως συνάρτηση (Function plotline), που καλείται από το κυρίως script:

```
function []=plotline(dxf, x1, y1, x2, y2)
fprintf(dxf.fdx, '0\n');
fprintf(dxf.fdx, 'LINE\n');
fprintf(dxf.fdx, '8\n');
fprintf(dxf.fdx, '%s\n', dxf.layer);
fprintf(dxf.fdx, '10\n');
fprintf(dxf.fdx, '%.15e\n', x1);
fprintf(dxf.fdx, '20\n');
fprintf(dxf.fdx, '%.15e\n', y1);
fprintf(dxf.fdx, '11\n');
fprintf(dxf.fdx, '%.15e\n', x2);
fprintf(dxf.fdx, '21\n');
fprintf(dxf.fdx, '%.15e\n', y2);
end
```

Ένας κύκλος ορίζεται από τις συντεταγμένες X1, Y1 του κέντρου του και την ακτίνα R. Για κάθε κύκλο του σχεδίου στο αρχείο DXF πρέπει να γραφεί:

```
{0 CIRCLE 10 X1 20 Y1 40 R}T
```

το οποίο αντίστοιχα μεταφράζεται σε κώδικα MATLAB ως συνάρτηση (Function plotcircle):


```

function []=plotcircle(dxf, x1, y1, r)
fprintf(dxf.fdx, '0\n');
fprintf(dxf.fdx, 'CIRCLE\n');
fprintf(dxf.fdx, '8\n');
fprintf(dxf.fdx, '%s\n', dxf.layer);
fprintf(dxf.fdx, '10\n');
fprintf(dxf.fdx, '%.15e\n', x1);
fprintf(dxf.fdx, '20\n');
fprintf(dxf.fdx, '%.15e\n', y1);
fprintf(dxf.fdx, '40\n');
fprintf(dxf.fdx, '%.15e\n', r);
end

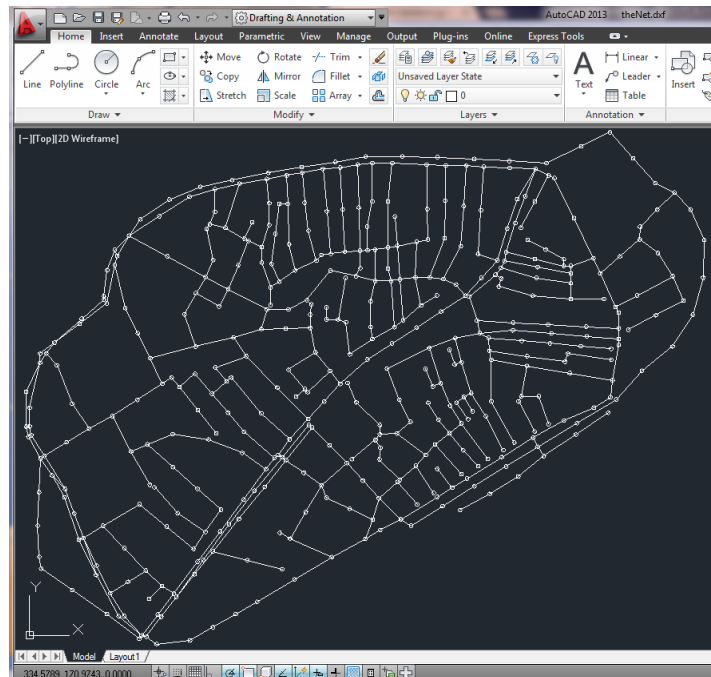
```

Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι είναι εφικτή η εξαγωγή σε σχεδιαστικό πρόγραμμα τύπου CAD, δικτύων που αποτελούνται από πολλούς κόμβους και αγωγούς και η μετέπειτα επεξεργασία τους. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να απεικονιστούν εύκολα με άλλο χρώμα και πάχος γραμμής, οι σωλήνες που επισκευάζονται σε καθημερινή βάση μέχρι να πετύχουμε το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης, καθώς επίσης και να γίνουν οποιεσδήποτε σχεδιαστικές παρεμβάσεις από τη πλευρά του χρήστη. Επίσης η διαδικασία αυτή απλοποιείται σημαντικά, διότι γίνεται να τροποποιηθεί το δίκτυο με τη σύνταξη απλών εντολών σε MATLAB και χωρίς την παρέμβαση σε CAD πρόγραμμα, πόσο μάλλον όταν ένα δίκτυο είναι μεγάλο σε έκταση.

Στην Εικόνα 10 παρατίθεται το κύριο script σε περιβάλλον MATLAB και στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται το δίκτυο με τους κόμβους ως κύκλους και τους αγωγούς ως γραμμές στο πρόγραμμα AutoCAD.

```
Editor - C:\Users\user\Desktop\diplom project\diktyo_autocad\diktyo.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base fx
1 - clc; clear; close all;
2
3 % apeikonish diktuou se dxf
4 - xy = [838.346853,759.84881;913.3974,689.713836;891.13534,700.
5
6 - Etmp = [3,2;109,322;322,144;144,264;264,162;162,161;161,160;1
7
8 - fname = 'theNet.dxf';
9 - fid=plotstart(fname)
10
11 - plotsetlayer(fid, 'lines');
12
13 - for i=1:size(Etmp,1)
14     i1 = Etmp(i,1);
15     i2 = Etmp(i,2);
16
17     plotline(fid, xy(i1,1), xy(i1,2),xy(i2,1), xy(i2,2));
18 - end
19
20 - r=2.2;
21 - for i=1:size(xy,1)
22     plotcircle(fid, xy(i,1),xy(i,2), r);
23 - end
24
25 - plotend(fid);
```

Εικόνα 10: Κύριο script στο MATLAB



Εικόνα 11: Απεικόνιση δικτύου σε AutoCAD DXF

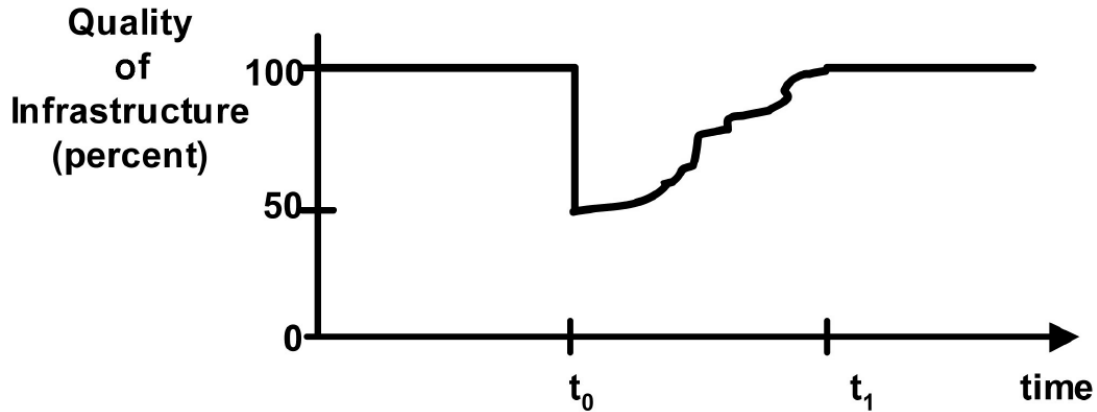
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ

5.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η προσαρμοστικότητα (Resilience) είναι μία συνάρτηση η οποία δίνει την ικανότητα μιας κατασκευής ή ενός συστήματος (π.χ. κτιρίου, γέφυρας, δικτύου υποδομών ή μιας κοινωνίας) να υποστηρίξει ένα επίπεδο λειτουργικότητας ή απόδοσης μέσα σε μια χρονική περίοδο που ορίζεται σα χρόνος ελέγχου (Control Time), που καθορίζεται από τους διαχειριστές του έργου ή την κοινωνία. Η προσαρμοστικότητα υπολογίζεται ως το εμβαδόν της περιοχής που περικλείεται από την καμπύλη Q σε διάγραμμα Λειτουργικότητα-Χρόνος (Functionality-Time), όπου Q είναι μια παράμετρος που μετρά τη λειτουργικότητα και μπορεί να αντιπροσωπεύει διαφορετικές πτυχές της αποδοτικότητας ενός δικτύου υποδομών, όπως ικανότητα εξυπηρέτησης (Serviceability), οικονομικές απώλειες (Economic Losses), αριθμός θανάτων κλπ.

Η έννοια της προσαρμοστικότητας μπορεί να γίνει πιο εύκολα κατανοητή με την Εικόνα 8, που αναπαριστά τη λειτουργικότητα ενός δικτύου με το χρόνο. Τη χρονική στιγμή t_0 ένα καταστρεπτικό γεγονός (π.χ. σεισμός) ξεσπά και η λειτουργικότητα μειώνεται σημαντικά. Ο χρόνος, που απαιτείται για αποκατάσταση των υπηρεσιών, ονομάζεται χρόνος αποκατάστασης T_{RE} . Αν το δίκτυο επανέρχεται σε επίπεδο λειτουργικότητας πριν το σεισμό τη χρονική στιγμή t_1 , τότε $T_{RE}=t_1-t_0$. Όπως προαναφέρθηκε, η προσαρμοστικότητα υπολογίζεται ως το εμβαδό της περιοχής κάτω από το γράφημα, που φαίνεται στην Εικόνα 8 και σύμφωνα με τη σχέση (5.1).

$$Re_s = \frac{1}{T_{RE}} \int_{t_0}^{t_0+T_{RE}} Q(t) dt \quad (5.1)$$



Εικόνα 12: Απεικόνιση της προσαρμοστικότητας ενός δικτύου

Ο χρόνος αποκατάστασης (T_{RE} : Recovery Time) είναι η απαιτούμενη χρονική περίοδος για αποκατάσταση και επαναφορά της λειτουργικότητας μιας κατασκευής, ενός συστήματος υποδομής (παροχή ύδρευσης, σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, κτίριο νοσοκομείου) ή μιας κοινωνίας, σε ένα επιθυμητό επίπεδο έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί το ίδιο, κοντά ή καλύτερα από την αρχική κατάσταση.

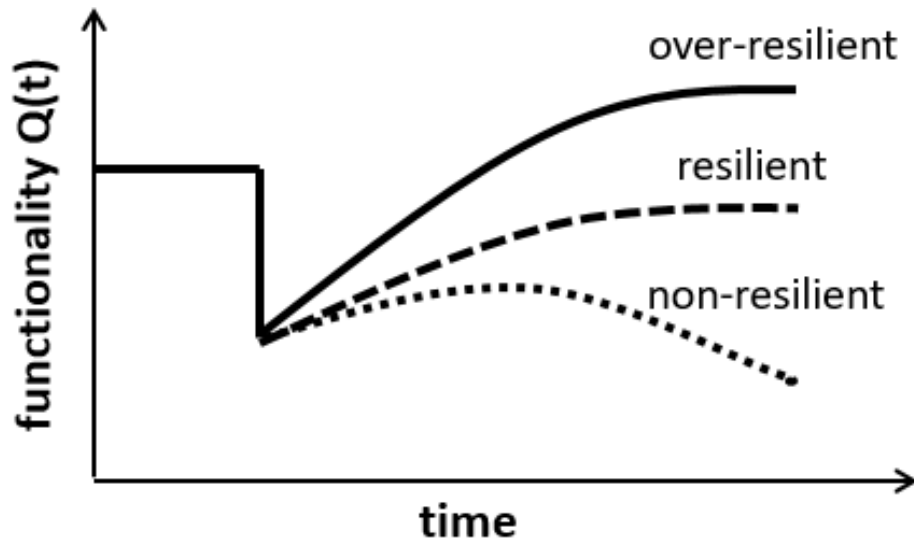
Ο χρόνος αποκατάστασης είναι μια τυχαία μεταβλητή με μεγάλες αβεβαιότητες, που περιλαμβάνει το χρόνο αποκατάστασης της ίδιας της κατασκευής και το χρόνο διακοπής των επαγγελματικών δραστηριοτήτων και είναι συνήθως μικρότερος από το χρόνο ελέγχου. Εξαρτάται τυπικά από την ένταση του σεισμού και από την τοποθεσία του συστήματος με τους δοσμένους πόρους του όπως κεφάλαιο, υλικά και εργασία, μετά το μεγάλο σεισμικό γεγονός. Γι' αυτούς τους λόγους, ο χρόνος αποκατάστασης είναι η πιο δύσκολη ποσότητα για πρόβλεψη προκειμένου να υπολογίσουμε την προσαρμοστικότητα. Οι Porter et al. προσπάθησαν να κάνουν μια διάκριση μεταξύ χρόνου διακοπής εργασιών (Downtime) και χρόνου επιδιορθώσεων (Repair Time) και προσπάθησαν να ποσοτικοποιήσουν το τελευταίο. Σ' αυτή την εργασία τα επίπεδα ζημιών συνδυάστηκαν με τη διάρκεια επιδιορθώσεων και με κατανομές πιθανοτήτων για να εκτιμήσουν από κοινού τις διάρκειες επιδιορθώσεων. Ενώ οι προηγούμενοι ορισμοί αφορούν σε κατασκευές, υποδομές ή κοινωνικούς οργανισμούς, μια

πιο γενική εφαρμογή αυτών των ορισμών είναι για κοινωνίες που εμφανίζουν προσαρμοστικότητα σε καταστροφές (Disaster Resilience Communities).

Η προσαρμοστικότητα έναντι καταστροφών, που προκαλούνται από τη φύση ή τον ανθρώπινο παράγοντα, είναι ζωτικής σημασίας για την επανόρθωση της κοινωνίας. Ο σχεδιασμός σύμφωνα με την προσαρμοστικότητα έγκειται στο να γίνει μια ιεράρχηση των δραστηριοτήτων που πρέπει να πραγματοποιηθούν, ώστε να αντιμετωπιστούν έκτακτες καταστάσεις αμέσως μετά την καταστροφή και σταδιακά να επανέλθουν οι υπηρεσίες, που προσφέρονται από το δίκτυο της κοινωνίας. Ωστόσο, θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην αποκατάσταση των κρίσιμων υπηρεσιών και στην πρόσβαση της κοινωνίας στα δίκτυα υποδομής σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα μετά την καταστροφή. Μια κοινωνία με υψηλό δείκτη προσαρμοστικότητας, αναμένεται να επανέλθει γρήγορα σε επίπεδα λειτουργικότητας πριν από το καταστρεπτικό γεγονός, δηλαδή να εμφανίσει μικρό χρόνο αποκατάστασης T_{RE} , να επιδείξει μειωμένες πιθανότητες αστοχίας καθώς και περιορισμένης κλίμακας ζημιές από τις αστοχίες.

Ένα σύστημα ή δίκτυο θεωρείται ότι διαθέτει προσαρμοστικότητα, όταν μπορεί να επανέλθει σε επιθυμητά επίπεδα λειτουργικότητας σε δεδομένο χρονικό διάστημα. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος, η λειτουργικότητα που έπεται ενός σεισμού και μετά την επιδιόρθωση των όποιων βλαβών μπορεί να είναι αυξημένη συγκριτικά μ' αυτή πριν το σεισμό, αλλά μπορεί να φτάσει και σε χαμηλότερο επίπεδο. Επομένως αν ένα σύστημα αποκατασταθεί σε σταθερό επίπεδο λειτουργικότητας ισοδύναμο ή μικρότερο από αυτό πριν από το σεισμό θεωρείται **resilient**, ενώ αν φτάσει σε επίπεδο μεγαλύτερο, **over-resilient**. Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρείται, ότι ένα σύστημα δεν διατηρεί σταθερό το επίπεδο λειτουργικότητας του και με τον καιρό φθίνει, οπότε θεωρείται **non-resilient**. Όλες οι παραπάνω εκδοχές φαίνονται στην Εικόνα 9. Οι παραπάνω κατηγορίες προσαρμοστικότητας εξαρτώνται από το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων πόρων (εργασία, κεφάλαιο κλπ) και συνακόλουθα από την ποιότητα των εργασιών αποκατάστασης. Επιπλέον ευθύνη φέρουν οι εκάστοτε Αρχές διαχείρισης και επίβλεψης του συστήματος ή δικτύου, οι οποίες αναλαμβάνουν την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και επιδιόρθωση αν χρειαστεί

των βλαβών και γενικότερα τον προγραμματισμό και συντονισμό των εργασιών που απαιτούνται.



Εικόνα 13: Συστήματα με διαφορετική ικανότητα προσαρμοστικότητας

5.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η έννοια της προσαρμοστικότητας είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή, προκειμένου οι αρμόδιοι φορείς να ανταποκριθούν άμεσα και να λάβουν τα απαιτούμενα μέτρα για τη μείωση των απωλειών (απώλεια ζωής, τραυματισμοί, οικονομικές απώλειες, διακοπή σημαντικών υπηρεσιών) και να ελαχιστοποιήσουν κάθε μείωση στην ποιότητα ζωής εξαιτίας μιας καταστροφής όπως ο σεισμός. Στην προσπάθεια μας να ορίσουμε πλήρως και με σαφήνεια την προσαρμοστικότητα, θα πρέπει να ανατρέξουμε στα κομμάτια που την απαρτίζουν. Οι Bruneau et al. προτείνουν ότι η προσαρμοστικότητα έχει 4 βασικά στοιχεία που τη συνθέτουν και συγκεκριμένα αυτά είναι:

- στιβαρότητα ή ευρωστία (Robustness),
- ταχύτητα (Rapidity),
- εφεδρεία (Redundancy),
- επινοητικότητα (Resourcefulness)

Τα 2 τελευταία στοιχεία φαίνεται να λειτουργούν συμπληρωματικά, αλλά επηρεάζουν σημαντικά την προσαρμοστικότητα ενός συστήματος, καθώς στηρίζονται στις ανθρώπινες δεξιότητες, στην αντίληψη και στην ικανότητα αυτοσχεδιασμού κατά τη διάρκεια και μετά το καταστρεπτικό γεγονός.

Η στιβαρότητα αναφέρεται στη δύναμη ή στην ικανότητα των στοιχείων, των συστημάτων ή των άλλων μονάδων ανάλυσης να αντέξουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο καταπόνησης, χωρίς να υποστούν σημαντική μείωση λειτουργικότητας ή απώλειες. Στην Εικόνα 10 η στιβαρότητα ορίζεται ως η υπολειπόμενη λειτουργικότητα του συστήματος αμέσως μετά το καταστρεπτικό γεγονός και συμβολίζεται με R . Η στιβαρότητα ενός συστήματος εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και γι' αυτό μπορεί να προσεγγιστεί κατόπιν στατιστικής ανάλυσης, υπολογίζοντας τη μέση τιμή, τυπική απόκλιση και μια συγκεκριμένη κατανομή πιθανοτήτων.

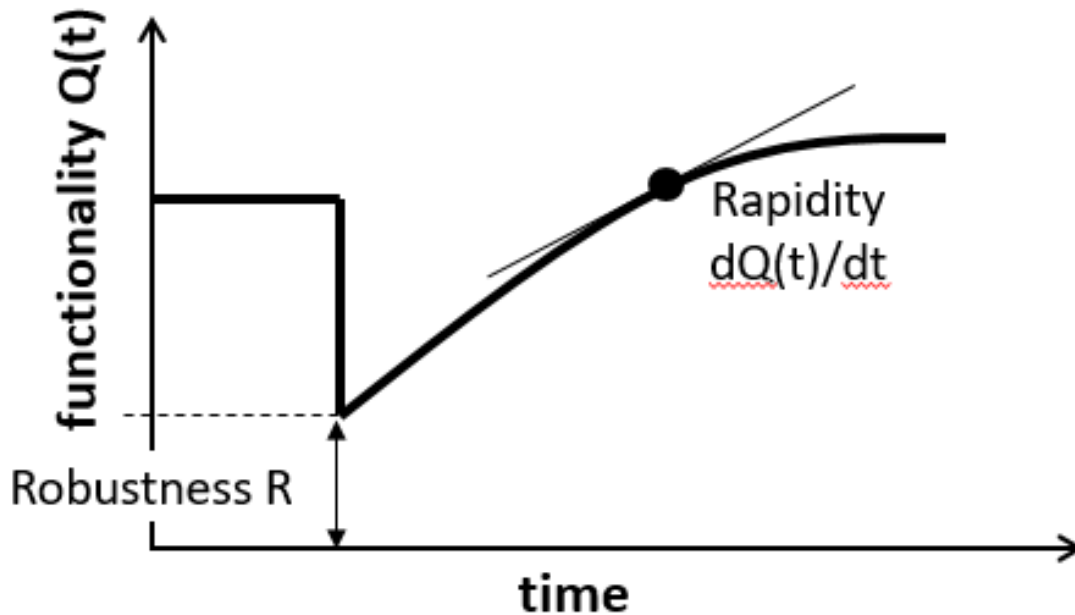
Η ταχύτητα αναφέρεται στην ικανότητα να τεθούν προτεραιότητες και να επιτευχθούν οι επιδιωκόμενοι στόχοι, προσπαθώντας παράλληλα να μειώσουμε το χρόνο που απαιτείται για τις εργασίες αποκατάστασης και να επανέλθουμε τελικά σε επίπεδο απόδοσης πριν από το γεγονός. Η ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής που ενώνει 2 σημεία της καμπύλης λειτουργικότητας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, δίνεται από τη σχέση (5.2) και φαίνεται στην Εικόνα 10.

$$Rapidit\y = \frac{dQ(t)}{dt} \quad , \quad t_{OE} \leq t \leq t_{OE} + T_{RE} \quad (5.2)$$

Η εφεδρεία αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να ικανοποιήσει επιτυχώς την ζήτηση, χρησιμοποιώντας εναλλακτικούς μηχανισμούς ή διαδρομές και αναδιανεμόντας τη ζήτηση στα στοιχεία του συστήματος που έχουν υποστεί μερικώς ή καθόλου βλάβες και μπορούν να αξιοποιηθούν.

Η επινοητικότητα εκφράζεται με την αξιοποίηση και το αρμονικό συνταίριασμα υλικών και ανθρώπινων πόρων, προκειμένου να επιτύχουμε στόχους και να αποκαταστήσουμε τις όποιες βλάβες, όταν συμβαίνουν καταστροφές. Η επινοητικότητα έχει άμεση εξάρτηση με τον

ανθρωπινό παράγοντα τις δεξιότητες και την ευστροφία αυτού σε συνθήκες, όπου απαιτούνται να ληφθούν γρήγορα σημαντικές αποφάσεις διαχείρισης καταστροφών.



Εικόνα 14: Απεικόνιση τρωτότητας και ταχύτητας

5.3 ΕΝΝΟΙΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Η ικανότητα εξυπηρέτησης ενός δικτύου αντιπροσωπεύεται από τον αντίστοιχο δείκτη Λόγος Ικανότητας Εξυπηρέτησης (SR: Serviceability Ratio), που αναπτύχθηκε διεξοδικά στην ενότητα 3.3, όπου γίνεται περιγραφή των δεικτών απόδοσης ενός δικτύου ύδρευσης. Συγκεκριμένα δίνεται από την εξίσωση (3.11) και προτιμάται από το δείκτη LOC (Loss of Connectivity), καθώς απαιτεί πολύ λιγότερο υπολογιστικό φόρτο και δεν καθυστερεί χρονικά τις εκτελούμενες αναλύσεις. Η ικανότητα εξυπηρέτησης καθορίζεται από τη συνδεσιμότητα-τοπολογία των κόμβων και την ανάλυση ροής του δικτύου, που έχει υποστεί ζημιές λόγω σεισμού και υπολογίζεται με την προσομοίωση Monte Carlo. Έχει παρατηρηθεί, ότι ο δείκτης αυτός μειώνεται σημαντικά, όσο το δίκτυο γηράσκει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η παλαιότητα του δικτύου σχετίζεται με το δείκτη $k(t) = S_{UD}(t) / S_D(t)$, όπου οι δείκτες UD και D, Δαναφέρονται στην κατάσταση του δικτύου χωρίς και με βλάβες αντίστοιχα και επηρεάζει τη πιθανότητα

αστοχίας των αγωγών, όπως φαίνεται από τη σχέση (2.8) και συνακόλουθα το δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης. Στο πλαίσιο της εργασίας δε θα διερευνηθεί η σχέση του SR με την παλαιότητα του δικτύου, αλλά θα παρουσιαστεί η συμπεριφορά του για διαφορετικούς ρυθμούς επιδιόρθωσης αγωγών, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση του.

5.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύστημα ή δίκτυο, που διαθέτει προσαρμοστικότητα θα πρέπει να αναγνωριστούν και να κατανοηθούν οι βασικοί στόχοι απόδοσης και οι κατηγορίες υπηρεσιών, που πρέπει να παρέχει αυτό. Η προηγούμενη έρευνα πάνω στην ικανότητα εξυπηρέτησης ενός δικτύου ύδρευσης και στην αποκατάσταση αυτού μετά από σεισμό, επικεντρώθηκε στην ικανότητα του να μεταφέρει κάποιο αποδεκτό επίπεδο παροχής νερού στις συνδέσεις νερού, αμελώντας χαρακτηριστικά όπως τον όγκο, την πίεση, την ποιότητα και την αξιοπιστία γενικότερα του διαθέσιμου νερού. Αν δε ληφθούν υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τότε αφήνεται σημαντικό κενό στην κατανόηση της απόδοσης ενός δικτύου μετά από το σεισμικό γεγονός.

Η εκτίμηση της ικανότητας εξυπηρέτησης ενός δικτύου ύδρευσης μετά από ένα σεισμό και πώς αυτό επηρεάζει την προσαρμοστικότητα της κοινωνίας (Community Resilience) προϋποθέτει τη μελέτη και κατανόηση (α) των κατηγοριών εξυπηρέτησης που πρέπει να παρέχει ένα δίκτυο ύδρευσης μετά από ένα καταστροφικό γεγονός, με προτεραιότητα σ' αυτές που η κοινωνία εξαρτάται άμεσα και στηρίζει τη βιωσιμότητα της, (β) του πώς οι κατηγορίες εξυπηρέτησης αλληλεπιδρούν με θετικό ή αρνητικό τρόπο κατά τη διάρκεια της μετασεισμικής απόκρισης και της περιόδου αποκατάστασης και της αντίστοιχης σημασίας που έχει κάθε κατηγορία στην προσαρμοστικότητα της κοινωνίας, (γ) των επιθυμητών στόχων ή επιπέδων απόδοσης που πρέπει να πληροί κάθε κατηγορία εξυπηρέτησης.

Οι τρεις βασικές κατηγορίες σεισμικής απόδοσης ενός δικτύου ύδρευσης σύμφωνα με τον Davis (2011) είναι: υπηρεσίες σχετικές με το νερό, προστασία ζωής και προστασία περιουσίας. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από τουλάχιστον πέντε επιπλέον κατηγορίες (μεταφορά

νερού, ποιότητα, ποσότητα, πυροπροστασία και λειτουργικότητα). Είναι σημαντικό να υπάρχει πρόβλεψη και μέριμνα για τις απαραίτητες υπηρεσίες νερού και την προστασία ζωής και περιουσίας. Η ασφάλεια της ζωής μπορεί να απειληθεί, όταν για παράδειγμα η εγκατάσταση του δικτύου ύδρευσης αστοχεί ή όταν επικίνδυνα χημικά εισέρχονται στην ατμόσφαιρα ή όταν μεγάλες ποσότητες νερού απελευθερώνονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές εξαιτίας αστοχίας των εγκαταστάσεων του δικτύου ύδρευσης. Η προστασία της περιουσίας μπορεί να απειληθεί από ζημιές στο δίκτυο και στα συστατικά μέρη αυτού, επομένως θα πρέπει να ληφθούν τα απαιτούμενα μέτρα για μετριασμό των σεισμικών επιπτώσεων στα κρίσιμα κομμάτια του δικτύου (π.χ. δεξαμενές και αγωγοί)

Τα παραπάνω προληπτικά μέτρα, παρότι είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία της ζωής και της περιουσίας και βελτιώνουν την προσαρμοστικότητα του δικτύου, επικεντρώνονται σε συγκεκριμένα μέρη του και σαν αποτέλεσμα δε βελτιώνουν πάντα άμεσα την ικανότητα να προσφερθούν υπηρεσίες νερού μετά το σεισμό. Οι υπηρεσίες νερού περιλαμβάνουν αυτές τις πτυχές, που είναι απαραίτητες, ώστε να προσφέρεται ασφαλής και αξιόπιστη ποσότητα νερού στους καταναλωτές όπως μεταφορά νερού, ποιότητα, ποσότητα και λειτουργικότητα δικτύου ύδρευσης. Σ' αυτό το σημείο καλό είναι να διευκρινιστεί ότι οι υπηρεσίες λειτουργικότητας περιγράφουν την ικανότητα ενός συστήματος να εκτελεί τις λειτουργίες του αξιόπιστα. Η αξιοπιστία ενός συστήματος (System Reliability) είναι ένας δείκτης που φανερώνει την σταθερότητα και αξιοπιστία του έναντι σε σεισμό και η απόδοση του (Performance) δηλώνει την ικανότητα ή αλλιώς το βαθμό στον οποίο εκτελεί τις απαιτούμενες και προγραμματισμένες λειτουργίες του. Παρακάτω περιγράφονται οι βασικές υπηρεσίες, που πρέπει να εξασφαλίζει ένα δίκτυο ύδρευσης, επισημαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά τους και οι σημαντικές ενέργειες που πρέπει να γίνουν για την αποκατάσταση των υπηρεσιών, στην περίπτωση που διαταραχθεί η παροχή τους.

Βασικότερη υπηρεσία αποτελεί η μεταφορά νερού, σύμφωνα με την οποία το σύστημα δύναται να διανείμει νερό στις συνδέσεις των καταναλωτών, αλλά μετά το καταστροφικό γεγονός είναι πιθανό να μην καλύπτει τις απαιτούμενες προδιαγραφές ποιότητας και όγκου νερού και τις απαιτήσεις πυροπροστασίας και λειτουργικότητας του. Για την άμεση

αποκατάσταση του δικτύου, πραγματοποιούνται επιθεωρήσεις από εξειδικευμένα συνεργεία για αναγνώριση βλαβών, απομονώνοντας κομμάτια του δικτύου και θέτοντας σε λειτουργία το εφεδρικό παράλληλο σύστημα αγωγών (αν υπάρχει). Επίσης θα πρέπει να ληφθεί πρόνοια από τις αρμόδιες αρχές μετά το συμβάν για εξασφάλιση της ομαλότητας και της βιωσιμότητας της κοινωνίας, με την παροχή δεξαμενών νερού και των απαραίτητων εφοδίων στους πάσχοντες.

Το νερό που φτάνει στις συνδέσεις πρέπει να καλύπτει προδιαγραφές ποιότητας και να έχει την ίδια σύσταση μ' αυτό πριν το σεισμό. Επίσης δίνεται έμφαση στη διαδικασία καθαρισμού νερού, καθώς το αντίστοιχο σύστημα καθαρισμού μπορεί να έχει υποστεί βλάβες και έτσι το νερό να μην είναι πόσιμο και εξασφαλίζονται ελάχιστες απαιτήσεις πίεσης για την απομάκρυνση των ρύπων από το σύστημα ύδρευσης. Η αντισεισμική θωράκιση του συστήματος επεξεργασίας νερού, οι επιδιορθώσεις των αγωγών, η χρήση απολυμαντικών και η απομάκρυνση των ρύπων και γενικότερα η τήρηση των προτύπων υγείας και η συνεργασία με τους αρμοδίους φορείς κρίνονται απαραίτητα σημεία για την αξιοπιστία του δικτύου ύδρευσης, όσον αφορά την ποιότητα νερού.

Η ποσότητα νερού στις συνδέσεις των καταναλωτών συχνά ελαττώνεται μετά το σεισμό, καθώς συμβαίνουν διαρροές κατά μήκος αγωγών αλλά και βλάβες στις συνδέσεις αυτών, με αποτέλεσμα να χάνεται σημαντικός όγκος νερού. Επιπλέον τα επίπεδα πίεσης νερού εμφανίζονται μειωμένα σε σχέση μ' αυτά πριν το σεισμό και συνακόλουθα η προκύπτουσα παροχή δε καλύπτει τις ανάγκες των καταναλωτών. Η παροχή κινητών δεξαμενών πόσιμου νερού για κατάσταση έκτακτης ανάγκης, σε περίπτωση που δεν είναι εύκολη η πρόσβαση σε νερό και η σταδιακή επισκευή των αγωγών και άλλων συστατικών μερών του δικτύου επιλύει το πρόβλημα της ποσότητας.

Προκειμένου να χαρακτηρίσουμε ένα σύστημα νερού αξιόπιστο και ολοκληρωμένο, είναι σαφές ότι οφείλει να καλύπτει απαιτήσεις πυροπροστασίας με την εγκατάσταση πυροσβεστικών κρουνών σε καίρια σημεία του δικτύου και την εξασφάλιση για απρόσκοπτη λειτουργία τους. Επειδή μια πυρκαγιά είναι πιθανόν να λάβει μεγάλες διαστάσεις, θα πρέπει

να δοθεί έμφαση στην άμεση αποκατάσταση των κατηγοριών εξυπηρέτησης μεταφορά νερού και ποσότητα και στην παροχή κατάλληλου εξοπλισμού κατάσβεσης.

Όσον αφορά τη λειτουργικότητα ενός δικτύου, επισημαίνεται ότι αυτό χάνει ένα ποσοστό της αξιοπιστίας του μετά το σεισμό και μεταβάλλονται οι παράμετροι λειτουργίας του, μπορεί ακόμη ορισμένες κατηγορίες εξυπηρέτησης να διακόπτονται μερικώς ή πλήρως. Ο τρόπος κατασκευής και ο σχεδιασμός ενός δικτύου έναντι σεισμού και γενικότερα φυσικών καταστροφών, η ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών και οι πόροι (χρηματικοί ή μη) για επιδιορθώσεις και ανακατασκευές οδηγούν στο να παραμένει σταθερά αξιόπιστο και να καλύπτει τις βασικές ανάγκες των καταναλωτών για τις οποίες έχει σχεδιαστεί.

5.5 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, οι κατηγορίες εξυπηρέτησης δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους άλλα συνδέονται και όλες μαζί και καθεμία ξεχωριστά επηρεάζουν την απόδοση του δικτύου. Οι αρμόδιοι φορείς οφείλουν να καταστρώσουν ένα σχέδιο για την αποκατάσταση των κατηγοριών εξυπηρέτησης και θέσουν προτεραιότητες για την συντομότερη δυνατή βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μετά το σεισμό.

1) Αλληλεπίδραση μεταφοράς νερού-ποιότητας

Όταν οι εργασίες αποκατάστασης που αφορούν την ποιότητα του νερού συνδέονται με τις αντίστοιχες εργασίες για μεταφορά νερού, τότε έχουμε καθυστέρηση στη μεταφορά νερού (αλλά και στις υπόλοιπες κατηγορίες εξυπηρέτησης), καθώς τα συνεργεία αποκατάστασης οφείλουν να κάνουν τους απαραίτητους ελέγχους για απολύμανση του νερού ώστε αυτό να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές ποιότητας. Πολλές φορές μάλιστα οι κάτοικοι-καταναλωτές επιζητούν ευλόγως διαβεβαιώσεις για την ποιότητα του νερού ώστε να χαρακτηριστεί πόσιμο και δείχνουν περιορισμένη εμπιστοσύνη ως προς την ποιότητα του νερού του δικτύου.

2) Αλληλεπίδραση ποιότητας- πυροπροστασίας

Όταν η λειτουργία της πυροπροστασίας καλύπτεται μέσω των ίδιων σωλήνων του δικτύου που παρέχουν νερό στις συνδέσεις των καταναλωτών, το οποίο νερό περνά από ελέγχους ποιότητας, τότε είναι πιθανό, αν δεν έχουν ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα διαχείρισης, να μην ικανοποιηθούν σωστά ούτε η πυροπροστασία ούτε η ποιότητα του νερού. Η απλή μεταφορά νερού με απαίτηση υψηλής πίεσης είναι η προϋπόθεση για πυροπροστασία.

3) Αλληλεπίδραση ποιότητας- ποσότητας

Η αλληλεπίδραση μεταξύ ποιότητας και μεταφοράς νερού εμπλέκει και την κατηγορία εξυπηρέτησης της ποσότητας. Προκειμένου να ελεγχθούν από άποψη ποιότητας οι όγκοι του νερού που θα φτάσουν στους καταναλωτές συμβαίνουν καθυστερήσεις στη μεταφορά αφενός και στη ποσότητα αφετέρου του νερού.

4) Αλληλεπίδραση μεταφοράς νερού- ποσότητας

Οι εργασίες αποκατάστασης του δικτύου για μεταφορά νερού εξαρτώνται από τη συνολική ποσότητα του νερού που είναι διαθέσιμη για μεταφορά στους καταναλωτές. Αν δε γίνουν οι απαραίτητες εργασίες για ρύθμιση των όγκων νερού, τότε μειώνεται η εξυπηρέτηση της μεταφοράς νερού.

5) Αλληλεπίδραση πυροπροστασίας-ποσότητας

Όταν οι δύο κατηγορίες καλύπτονται από το ίδιο δίκτυο, οι εργασίες αποκατάστασης στοχεύουν στην ικανοποίηση και των 2 κατηγοριών. Όταν οι ποσότητες του νερού είναι περιορισμένες(λόγω διαρροής σε σωλήνες π.χ.) τότε και η κατάσβεση εστιών φωτιάς είναι δύσκολα αντιμετωπίσιμη.

6) Αλληλεπίδραση πυροπροστασίας- μεταφοράς νερού

Οι ζημιές σε ένα δίκτυο ύδρευσης επηρεάζουν την ικανότητα για μεταφορά νερού και η αδυναμία για απομόνωση των ζημιών και την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου επιδρά αρνητικά στην πυροπροστασία. Στην περίπτωση που σ' ένα δίκτυο, που έχει υποστεί βλάβες, δοθεί προτεραιότητα για κατάσβεση πυρκαγιών τότε είναι πιθανόν να φτάσει ελάχιστο ή και καθόλου νερό στους καταναλωτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

6.1 ΒΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ MONTE CARLO

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα βήματα της μεθόδου Monte Carlo, που ακολουθήθηκαν για την ανάλυση των δύο δικτύων, που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο των αριθμητικών εφαρμογών, ώστε η μέθοδος να γίνει πλήρως κατανοητή και να μη δημιουργηθούν πιθανές ασάφειες στον αναγνώστη.

Σε ένα φύλλο εργασίας τύπου script στο MATLAB, που ονομάζεται *DMAdata* εισάγονται σε μορφή πίνακα οι συντεταγμένες των κόμβων και τα χαρακτηριστικά των αγωγών του δικτύου (κόμβοι αρχής-τέλους, υλικό σωλήνα, μήκος, PGV, PGD, PGS), όπου PGS (Peak Ground Strain) η μέγιστη εδαφική τάση. Στο πλαίσιο της εργασίας, έχουμε θεωρήσει ομοιόμορφη σεισμική φόρτιση σε όλο το δίκτυο με σεισμική παράμετρο αποκλειστικά την PGV και μηδενικά PGD, PGS. Στο ίδιο script εμφανίζεται και η πληθυσμιακή κατανομή στους κόμβους του δικτύου, που είναι χρήσιμη για την εύρεση του δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης (SR).

Στο script *ResNetSetUp* εκχωρούνται για κάθε σωλήνα, οι τιμές των παραμέτρων προσαρμογής σχετικών με το υλικό K_1 , K_2 , το μήκος σωλήνα και οι σεισμικές παράμετροι PGV, PGD, ως δεδομένα εισόδου της συνάρτησης *pipefragility*, η οποία υπολογίζει την πιθανότητα αστοχίας των αγωγών με βάση τις σχέσεις (2.5), (2.6), (2.8). Στη συνέχεια καλείται το script της μεθόδου Monte Carlo (*MonteCarloMethod*), στο οποίο έχει επιλεγθεί να πραγματοποιηθούν 10.000 προσομοιώσεις, δηλαδή 10.000 επαναλήψεις της μεθόδου, εφόσον παρατηρείται ότι μ' αυτόν τον αριθμό τα αποτελέσματα συγκλίνουν. Σ' αυτό το script, με δεδομένες τις πιθανότητες αστοχίας των αγωγών του δικτύου, αποφασίζεται αν ένας αγωγός έχει αστοχήσει ή όχι και έτσι διαμορφώνεται εκ νέου το δίκτυο με τους εναπομείναντες αγωγούς με τη βοήθεια ενός μητρώου γειτνίασης (Adjacency Matrix) και υπολογίζονται οι πιθανότητες αστοχίας των κόμβων, καθώς και η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης.

Παρακάτω στον κώδικα, καλείται το script *PipesPerDay*, με βάση το οποίο επισκευάζονται καθημερινά οι αγωγοί ξεκινώντας από αυτούς που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας και συνεχίζοντας μέχρι όλοι οι αγωγοί να αποκτήσουν την κατασκευαστική πιθανότητα αστοχίας $\leq 5\%$. Στο script *PipesPerDay* ανάλογα με τον ρυθμό επισκευής αγωγών που επιλέχθηκε, εκχωρείται η τιμή της κατασκευαστικής πιθανότητας αστοχίας σε διαφορετικό αριθμό αγωγών καθημερινά και καλείται εκ νέου το script *MonteCarloMethod* για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων αστοχίας και του SR. Σταδιακά με τις φάσεις επιδιόρθωσης των αγωγών, αυξάνεται και η ικανότητα εξυπηρέτησης του δικτύου (SR: Serviceability Ratio) με στόχο να φτάσει σε επίπεδο λειτουργικότητας πριν από το σεισμό.

Παρακάτω παρατίθεται το script της *MonteCarloMethod* από περιβάλλον MATLAB, που παρουσιάζει τη βασική λογική της συγκεκριμένης μεθόδου και επισημαίνονται με έντονη γραφή και τα διακριτικά (%%%) τα σχόλια επί του κώδικα, που βοηθούν στην εμπέδωση της διαδικασίας, που ακολουθείται:

```

%%% μηδενίζεται ο πίνακας sims
sims=zeros(nmc,nn,length(snode0));

clear xs

%%% για κάθε αγωγό εκχωρείται η τιμή (0) με
πιθανότητα pf και η τιμή (1) με πιθανότητα 1-pf
for ie=1:ne %%ne πλήθος αγωγών
    pw=[pf(ie) 1-pf(ie)];

    %%% xs = 1 --> ο αγωγός δεν έχει αστοχήσει
    %%% xs = 0 --> ο αγωγός αστοχεί
    xs(ie,:)=nunidrnd(2,pw,[1 nmc])-1;
end

for i=1:nmc %%% nmc πλήθος προσομοιώσεων

    nelf=max(0,find(xs(:,i)==0));
    %%% γίνεται εύρεση των αγωγών που αστόχησαν
    nelfStored(i)=size(nelf,1);

```

```

if size(nelf,1)>0
    %%% δεδομένη η συνδεσμολογία του δικτύου
    πριν τις αστοχίες
    Etmp=E(:,1:2);
    for ii=1:size(nelf,1)
        Etmp(nelf(ii),:)=0;
    end
    %%% αφαιρούνται οι αγωγοί που αστόχησαν
    Etmp(~any(Etmp,2),:)=[];

    %%% δημιουργείται το μητρώο γειτνίασης
    Am=adjacencyMatrix(Etmp,nn,dir);

    %%% επιλέγεται ο αλγόριθμος Dijkstra
    εύρεσης ελαχίστων διαδρομών
    algo='dijkstra';
    if strcmp(algo,'Floyd')

        dSP = FastFloyd(1./Am);
        for inode=1:length(enode)
            if any(any(ismember(Etmp,enode(inode))))==0

                sims(i,inode)=inf;
            else

                sims(i,inode)=dSP(snode,enode(inode));
            end
        end
    end

    if indx==1
ind(i) = perfIndex(nn,Etmp,popNode,snode,dir);
    end

    else if strcmp(algo,'dijkstra')

        cd('gaimc')

    %%% για κάθε κόμβο εισροής νερού καθορίζεται αν
    υπάρχει διαδρομή προς τους κόμβους εκροής
        for istart=1:length(snode0)

```



```

        snode = snode0(istart);
        sims(i, :, istart) = dfs(Am, snode);

    end
    %%% υπολογίζεται ο δείκτης ικανότητας
    εξυπηρέτησης SR
    SwXj(i)=0;
    for inode=1:nn

        sims_tot(i, inode)=max(sims(i, inode, :));
        %%% μη αστοχία αν υπάρχει τουλάχιστον μια
        διαδρομή από ένα κόμβο εισόδου
        Xj(inode)=(sims_tot(i, inode)>=0);
        SwXj(i)= SwXj(i)+Xj(inode)*popul(inode);
    end

    SR(i)=SwXj(i)/popul_tot;

    cd ..

    end
end
end

%%% υπολογίζονται οι πιθανότητες αστοχίας
για κάθε κόμβο
for inode=1:size(sims,2)
    probf(inode)=sum(sims_tot(:,inode)<0)/nmc;
    reliab(inode)=1-probf(inode);
end

%%% υπολογίζονται η μέση τιμή και η
τυπική απόκλιση του SR
SRmean=mean(SR(:));
SRstd=std(SR(:));

```

6.2 ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΝΕΑΣ ΑΡΤΑΚΗΣ

6.2.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Η Νέα Αρτάκη είναι μια παραλιακή πόλη, που ανήκει στο νομό Εύβοιας και απέχει περίπου 8 km βόρεια της Χαλκίδας. Έχει αναπτυχθεί εκατέρωθεν της επαρχιακής οδού Χαλκίδας-Αιδηψού και ο οικιστικός ιστός της Δημοτικής ενότητας Νέας Αρτάκης καταλαμβάνει έκταση 2450 στρεμμάτων περίπου. Η Εικόνα 11 δείχνει μια εναέρια άποψη της περιοχής με τη βοήθεια του λογισμικού Google Earth, πάνω στην οποία έχει αποτυπωθεί το κυρίως τμήμα του δικτύου ύδρευσης του οικισμού με τους αγωγούς τροφοδοσίας του (κόκκινο χρώμα), χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS Data), δηλαδή συντεταγμένες κόμβων, τοπολογία και εισάγοντας τα στο λογισμικό ArcMap.

Το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη γραφική διαμόρφωση του δικτύου και την απόκτηση πληροφοριών, που αφορούν τα χαρακτηριστικά του, όπως αριθμός καταναλωτών σε κάθε κόμβο εξόδου, πιθανότητες αστοχίας κόμβων κ.α. Ωστόσο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί προσεκτικά και η προσομοίωση του δικτύου να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματική γεωμετρία του. Τυχόν σφάλματα στη μοντελοποίηση μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων και να εισάγουν συστηματικά σφάλματα. Για παράδειγμα, αν το μήκος του σωλήνα δεν είναι σωστά μοντελοποιημένο, οι πιθανότητες αστοχίας των αγωγών θα διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό όταν υπολογίζονται, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.5), (2.6), (2.7).

Η τροφοδοσία του δικτύου διανομής θα γίνεται μέσω τριών κυρίων αγωγών, που θα συνδέουν τη δεξαμενή του οικισμού (πράσινος κόμβος), η οποία είναι σε φάση κατασκευής, με το δίκτυο. Συγκεκριμένα από την δεξαμενή θα ξεκινά ένας κύριος κλάδος, που θα διακλαδίζεται προς τις τρεις κατευθύνσεις, καταλήγοντας σε τρεις κόμβους εισόδου νερού του δικτύου. Οι κόμβοι αυτοί παριστάνονται με μπλε χρώμα και χρησιμοποιήθηκαν στις εκτελεσθείσες αναλύσεις ως κόμβοι εισόδου, με μηδενική πιθανότητα αστοχίας, που τροφοδοτούν τους υπολοίπους κόμβους εξόδου-τοπικές συνδέσεις με νερό. Οι αγωγοί τροφοδοσίας

παριστάνονται με κόκκινο χρώμα και γίνεται η παραδοχή, ότι δεν αστοχούν σε σεισμό, ώστε κατ' επέκταση να μην αστοχήσουν και οι τρεις κόμβοι εισόδου νερού, άρα αφαιρούνται από το δίκτυο και δε θα ληφθούν υπόψη στις προσομοιώσεις.

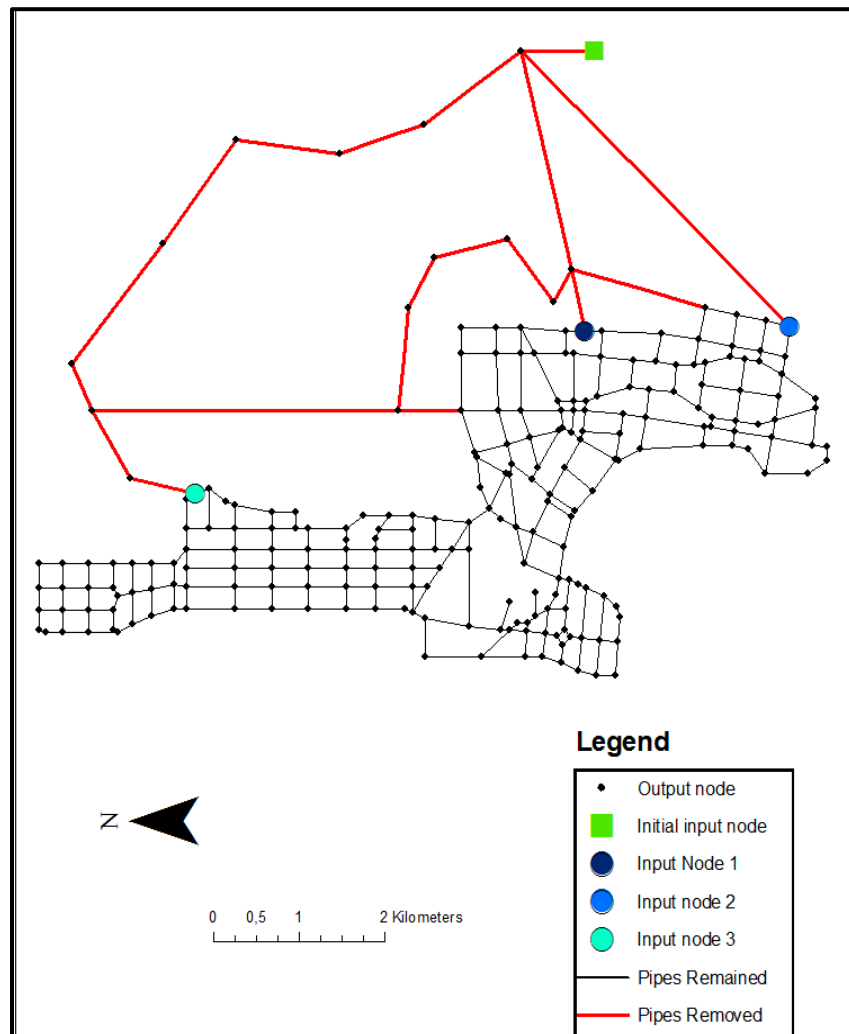
Συνολικά το δίκτυο αποτελείται, μετά την απομάκρυνση των αγωγών τροφοδοσίας, από 346 αγωγούς και 220 κόμβους και καλύπτει μια περιοχή διαστάσεων 9220×4150 m και το συνολικό μήκος των αγωγών είναι 25.453 m.



Εικόνα 15: Εναέρια άποψη της πόλης της Νέας Αρτάκης και γραφική απεικόνιση του δικτύου ύδρευσης της

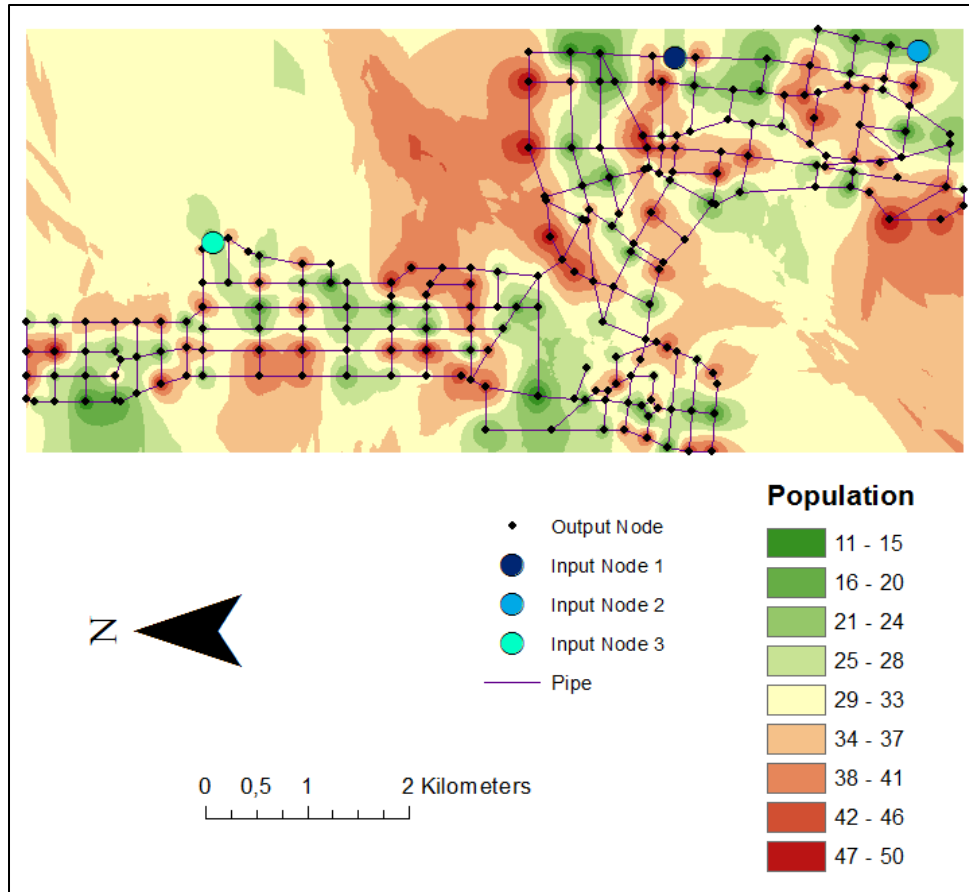
Η Νέα Αρτάκη ανήκει στις μεγαλύτερες πόλεις της Εύβοιας και σύμφωνα με την απογραφή του πληθυσμού το 2011, ο μόνιμος πληθυσμός της εκτιμάται σε 9.500 κατοίκους, ενώ μαζί με τον εποχιακό σε 13.000 κατοίκους. Στη παρούσα εργασία, ο πληθυσμός υπολογίστηκε προσεγγιστικά ανά κόμβου εξόδου του δικτύου και αποτυπώθηκε η χωρική του κατανομή στο χάρτη (heat map) της Εικόνας 13. Κατά μέσο όρο κάθε κόμβος παρέχει νερό σε 31 κατοίκους και ο μέγιστος αριθμός των καταναλωτών σε ένα κόμβο είναι 50. Ο αριθμός των κατοίκων, που

εξυπηρετείται σε κάθε κόμβο εξόδου είναι σημαντικό δεδομένο για τις αναλύσεις, καθώς χρησιμοποιείται για την εύρεση του δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης με βάση τη σχέση (3.11).



Εικόνα 16: Απεικόνιση δικτύου πριν την αφαίρεση των αγωγών τροφοδοσίας (κόκκινο χρώμα)

Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση της κατανομής του πληθυσμού είναι η IDW (Inverse Distance Weighted), καθώς αποτυπώνει καλύτερα από τις υπόλοιπες μεθόδους τον αριθμό των καταναλωτών σε κάθε κόμβο.



Εικόνα 17: Κατανομή πληθυσμού Νέας Αρτάκης

6.2.2 ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Σε πρώτο στάδιο δημιουργήθηκε βάση δεδομένων σε υπολογιστικό φύλλο Excel, η οποία περιλαμβάνει τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα, που αφορούν τα χαρακτηριστικά των αγωγών (μήκος, συντεταγμένες κόμβων αρχής-τέλους) και ως σεισμικές παράμετροι αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν οι PGV, PGD, PGA. Ωστόσο στο πλαίσιο της παρούσας εφαρμογής θα γίνει διερεύνηση της απόκρισης του δικτύου ύδρευσης της Νέας Αρτάκης με παράμετρο αποκλειστικά την PGV και μηδενικές τιμές στις PGD, PGA. Συγκεκριμένα, τα παραπάνω στοιχεία εισήχθησαν στο λογισμικό MATLAB και πραγματοποιήθηκε ανάλυση του δικτύου με τη χρήση κώδικα βασισμένο στη μέθοδο Monte Carlo, κατασκευασμένο από τους Fragiadakis et al. (S.E. Christodoulou & Fragiadakis, 2014, Fragiadakis et al., 2013). Τα βήματα για την

διενέργεια της ανάλυσης, όπως περιγράφηκαν και στην ενότητα 3.2.3, παρατίθενται επίσης παρακάτω:

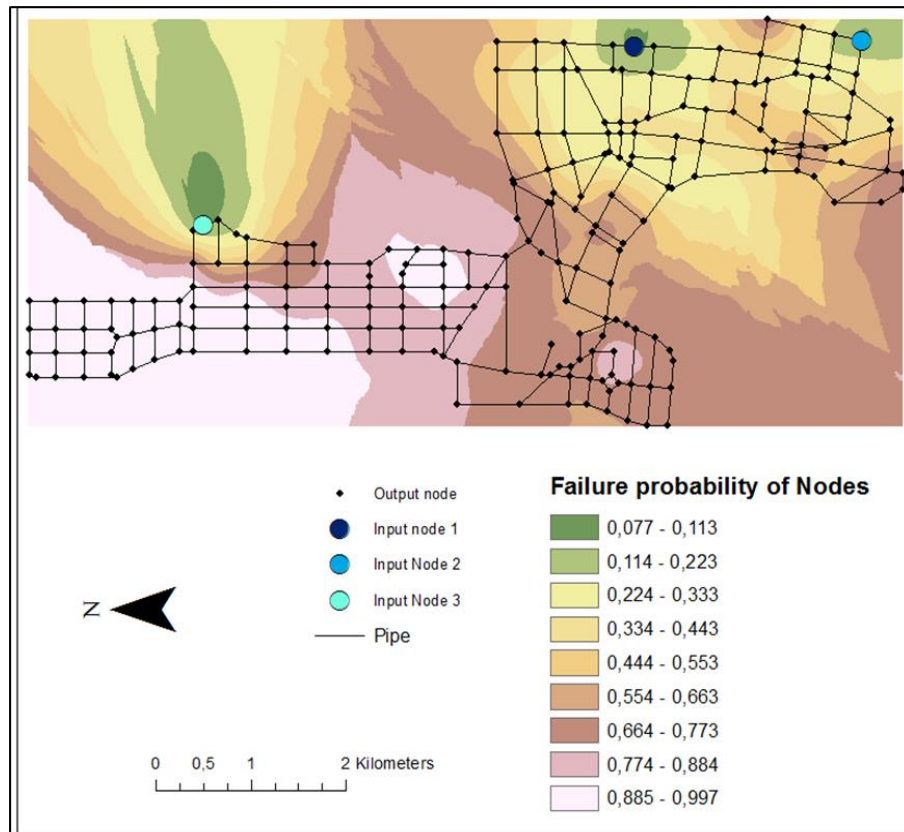
- Χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις των ALA Guidelines για την εύρεση των πιθανοτήτων αστοχίας όλων των σωλήνων, οι οποίες εκχωρούνται στους σωλήνες και καθορίζεται αν αυτός αστοχεί (0) ή όχι (1).
- Απαριθμούνται όλες οι διαδρομές από τον κόμβο i στον κόμβο j , απομακρύνοντας τους αγωγούς που αστόχησαν. Εάν δεν υπάρχει διαδρομή μεταξύ των κόμβων εισόδου-εξόδου, αυξάνεται ο μετρητής αποτυχημένων προσομοιώσεων (N_{failed}) κατά 1.
- Υπολογίζεται η πιθανότητα να μην φτάσει νερό από τον κόμβο i στον j

$$\hat{P}_{f,ij} = N_{failed} / N_{MCS}$$

Τα αποτελέσματα που δίνει ο κώδικας, κατόπιν τροποποίησης, είναι οι πιθανότητες αστοχίας των κόμβων του δικτύου για σεισμό με δεδομένο PGV, ίδιο σε όλη την έκταση του δικτύου και μηδενικές τις υπόλοιπες σεισμικές παραμέτρους. Στην αριθμητική εφαρμογή του δικτύου της Νέας Αρτάκης αποτυπώθηκαν οι πιθανότητες αστοχίας για σεισμική φόρτιση με PGV=70 cm/s, τόσο για αγωγούς μονής κατεύθυνσης (Unidirectional pipes), όσο και αγωγούς διπλής κατεύθυνσης (Bidirectional pipes) στις Εικόνα 18, 15 αντίστοιχα, καθώς και για σεισμό με PGV=100 cm/s και αγωγούς διπλής κατεύθυνσης στην Εικόνα 20. Πρακτικά, σε ένα δίκτυο ύδρευσης οι αγωγοί τοποθετούνται με κλίση και η ροή του νερού είναι σταθερά προς μια κατεύθυνση, εκτός και αν υπάρχει εγκατάσταση αντλιοστασίου, που επιτρέπει την αλλαγή της ροής σε καθορισμένους αγωγούς του δικτύου, γεγονός που μειώνει σημαντικά τις πιθανότητες αστοχίας των κόμβων, καθώς δημιουργούνται επιπλέον διαδρομές, που κάνουν προσβάσιμους από τον κόμβο εισόδου (ή κόμβους εισόδου) περισσότερους κόμβους εξόδου νερού.

Ο αριθμός των προσομοιώσεων Monte Carlo εκτιμήθηκε σε $N_{MCS} = 10.000$, εφόσον αποδείχτηκε στην ενότητα 3.2.3 ότι είναι ο αριθμός προσεγγιστικής σύγκλισης των αποτελεσμάτων. Βασιζόμενοι στις τιμές των πιθανοτήτων αστοχίας των κόμβων, που

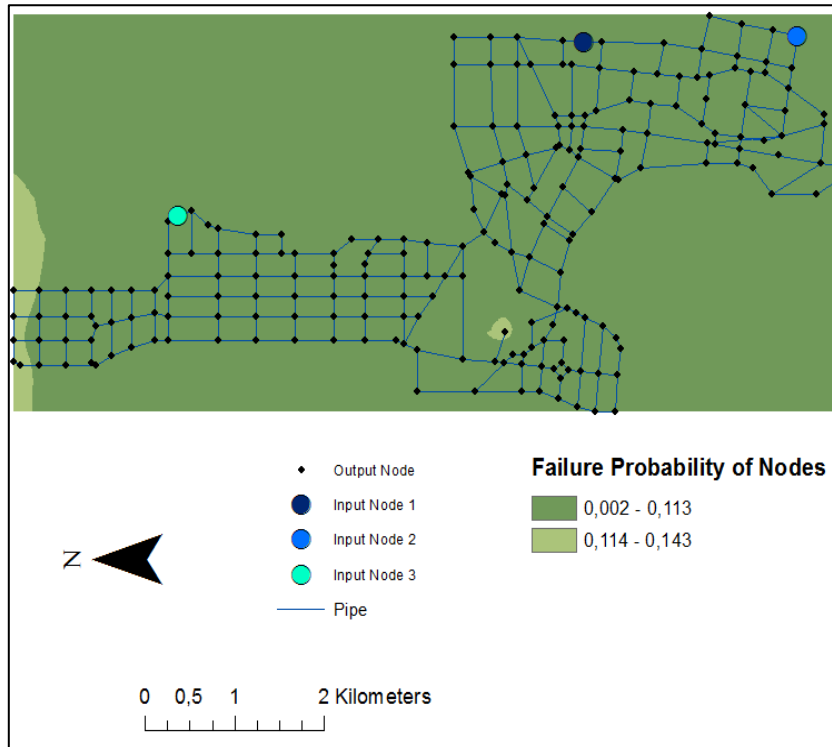
απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή της ομοιόμορφης σεισμικής φόρτισης, που εκφράζεται αποκλειστικά από την PGV, όπως επίσης να παρατηρήσουμε τις διαφορές στη συμπεριφορά του δικτύου, αναφορικά με τη χρήση αγωγών μονής και διπλής κατεύθυνσης.



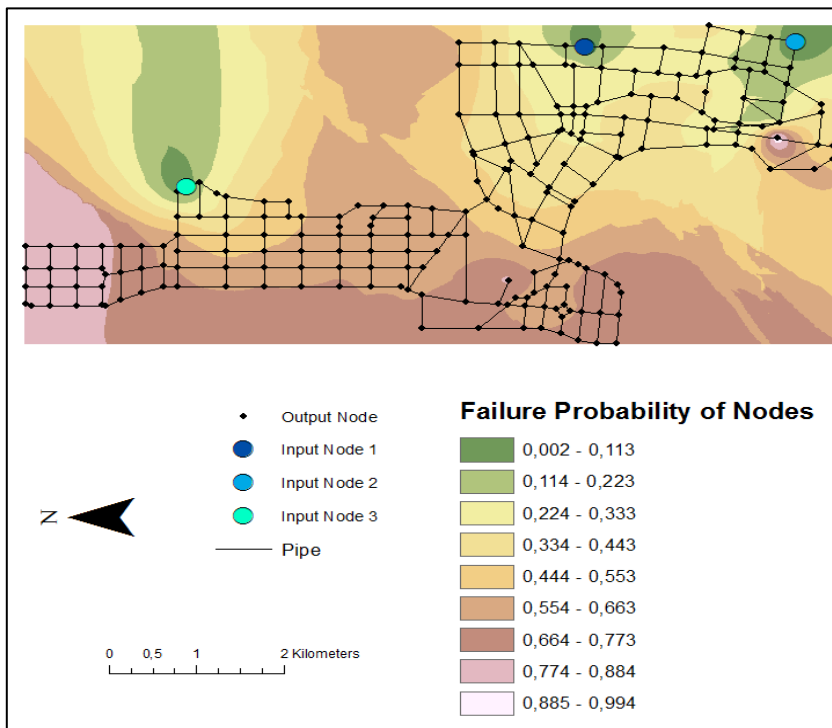
Εικόνα 18: Απεικόνιση πιθανοτήτων αστοχίας δικτύου με $PGV=70$ cm/s και αγωγούς μονής κατεύθυνσης (Unidirectional pipes)

Παρατηρείται ότι και στις εικόνες-heat maps οι πιθανότητες αστοχίας των τριών κόμβων εισόδου νερού είναι μηδενικές, διότι γίνεται η παραδοχή ότι δεν αστοχούν ανεξάρτητα από το μέγεθος του σεισμού, ώστε να τροφοδοτούν σταθερά τους υπόλοιπους κόμβους και να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Επίσης, παρατηρείται ότι στην περίπτωση του δικτύου, που υπόκειται σεισμό με $PGV=70$ cm/s και αγωγούς διπλής κατεύθυνσης δεν παρουσιάζονται σχεδόν καθόλου βλάβες, όπως φαίνεται από τις χαμηλές τιμές των πιθανοτήτων αστοχίας σε όλη την έκταση του, καθώς και ότι οι πιθανότητες αστοχίας των Εικόνα 18 και Εικόνα 20 είναι παραπλήσιες.



Εικόνα 19: Απεικόνιση πιθανοτήτων αστοχίας δικτύου με $PGV=70$ cm/s και αγωγούς διπλής κατεύθυνσης (*Bidirectional pipes*)



Εικόνα 20: Απεικόνιση πιθανοτήτων αστοχίας δικτύου με $PGV=100$ cm/s και αγωγούς διπλής κατεύθυνσης (*Bidirectional pipes*)

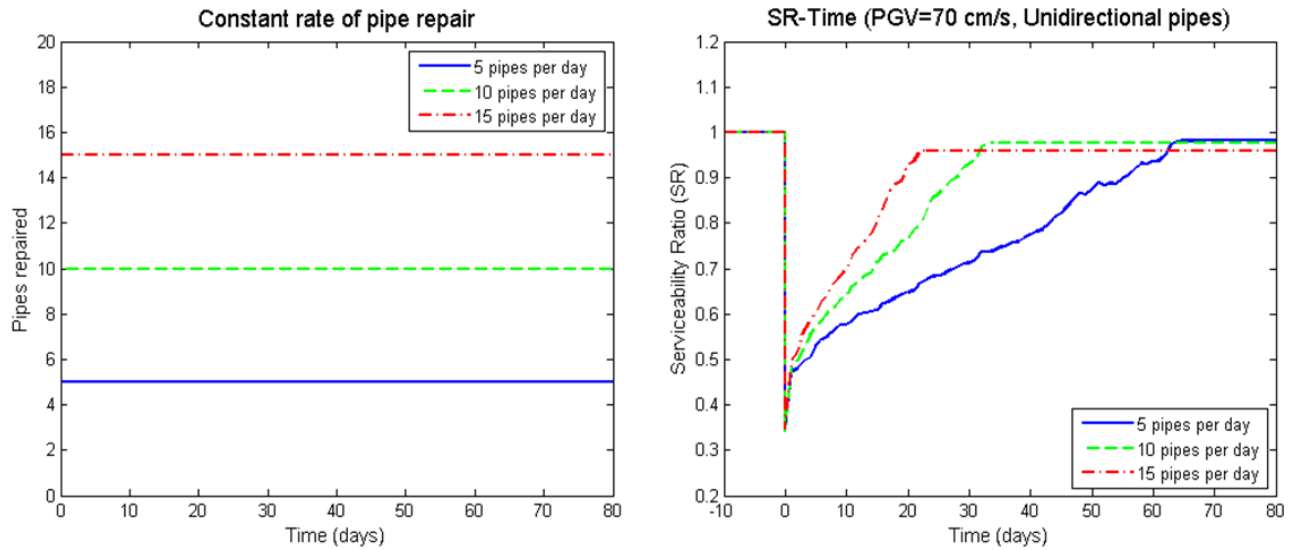
Οι παραπάνω χάρτες-heat maps αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν με τη χρήση λογισμικού GIS, καθώς προσφέρουν καλύτερη απεικόνιση και ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε είναι η kriging, τα πλεονεκτήματα της οποίας παρατίθενται στην ενότητα 0.

6.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΡΥΘΜΟΥΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΑΓΩΓΩΝ

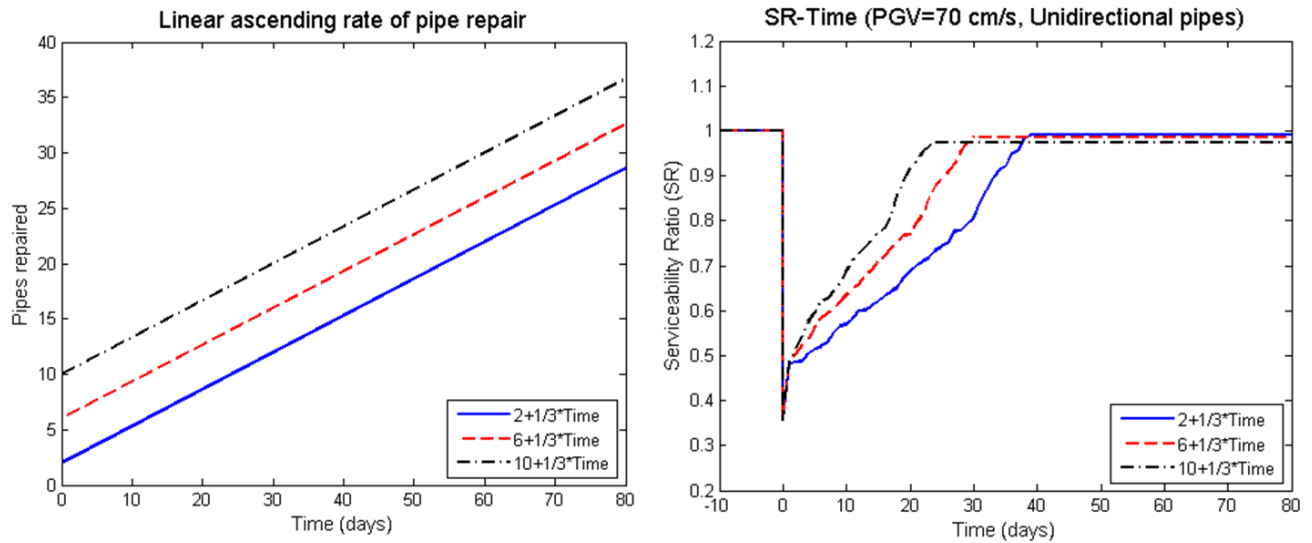
Αμέσως μετά μια σεισμική φόρτιση, ένα δίκτυο ύδρευσης χάνει ένα μέρος της αρχικής του λειτουργικότητας και απαιτείται να γίνουν επισκευές σε εύλογο χρονικό διάστημα, ώστε να επανέλθει στην αρχική του (ή και σε καλύτερη) κατάσταση και να παρέχει στον ίδιο βαθμό και ποιότητα τις υπηρεσίες του. Ο σχεδιασμός με βάση την προσαρμοστικότητα (Resilience-based design) περιλαμβάνει τον προγραμματισμό και την ιεράρχηση των δράσεων σε περιπτώσεις επικίνδυνων καταστάσεων και καταστροφών, προκειμένου να αντιμετωπιστούν περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Οι παράμετροι χρόνος αποκατάστασης ζημιών (Recovery Time) και διαθεσιμότητα πόρων (Availability of Resources) είναι αλληλένδετοι, καθώς αν είναι εφικτό να εργάζονται συγχρόνως πολλά συνεργεία σε διαφορετικές ζώνες του δικτύου ύδρευσης, επισκευάζοντας τα δομικά του στοιχεία, τότε επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου αποκατάστασης και συνακόλουθα αύξηση προσαρμοστικότητας.

Στη σχέση (5.1), όπως προαναφέρθηκε η παράμετρος $Q(t)$ υπολογίζει τη λειτουργικότητα, που εκφράζει διαφορετικές πτυχές της απόδοσης ενός δικτύου υποδομής, όπως η ικανότητα εξυπηρέτησης, οικονομικές απώλειες κ.α. Στην παρούσα εργασία αποφασίστηκε η αξιοποίηση του δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης (SR), ο οποίος περιγράφηκε στην ενότητα 5.3 και ουσιαστικά συνοψίζει όλες τις κατηγορίες εξυπηρέτησης (μεταφορά νερού, ποιότητα, ποσότητα), που πρέπει να καλύπτει ένα δίκτυο ύδρευσης. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται για διαφορετικούς ρυθμούς επισκευής αγωγών μέχρις ότου επισκευαστούν όλοι οι αγωγοί, που λίγο ή πολύ έχουν υποστεί βλάβες. Ειδικότερα, η ανάλυση που γίνεται στο λογισμικό MATLAB υπολογίζει την πιθανότητα αστοχίας όλων των αγωγών, οι οποίοι σε καθημερινή βάση και ξεκινώντας με αυτούς που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες αστοχίας

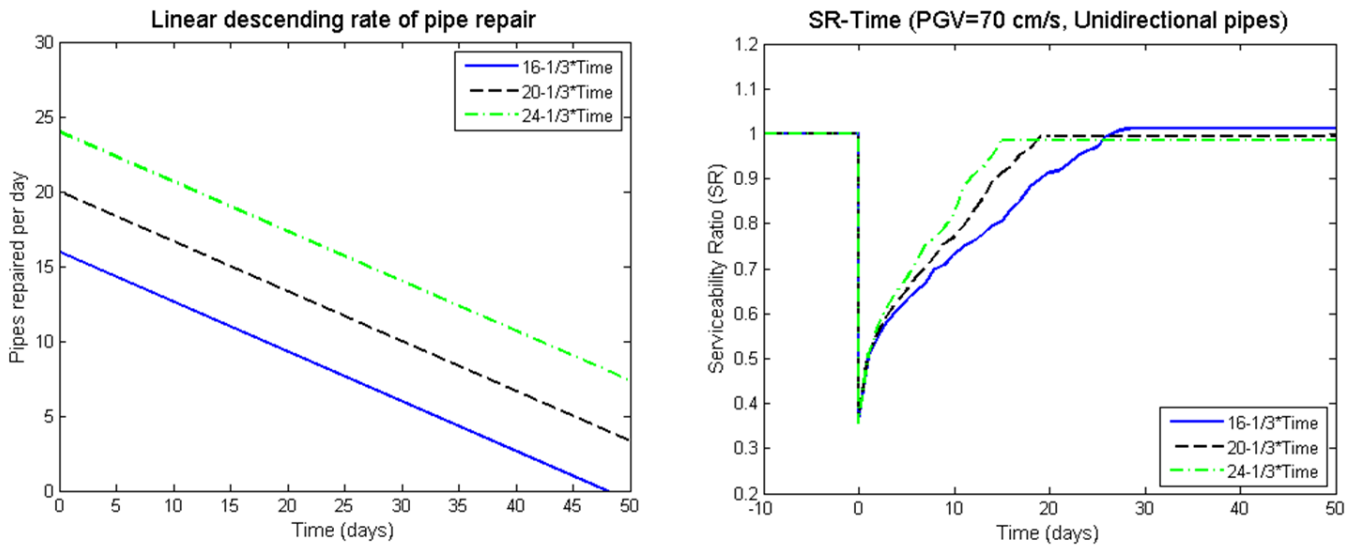
επισκευάζονται (ουσιαστικά τους εκχωρείται η κατασκευαστική πιθανότητα αστοχίας). Επιπλέον, διερευνάται η επιρροή που έχουν διαφορετικοί ρυθμοί επισκευής αγωγών στην προσαρμοστικότητα του υπό μελέτη δικτύου.



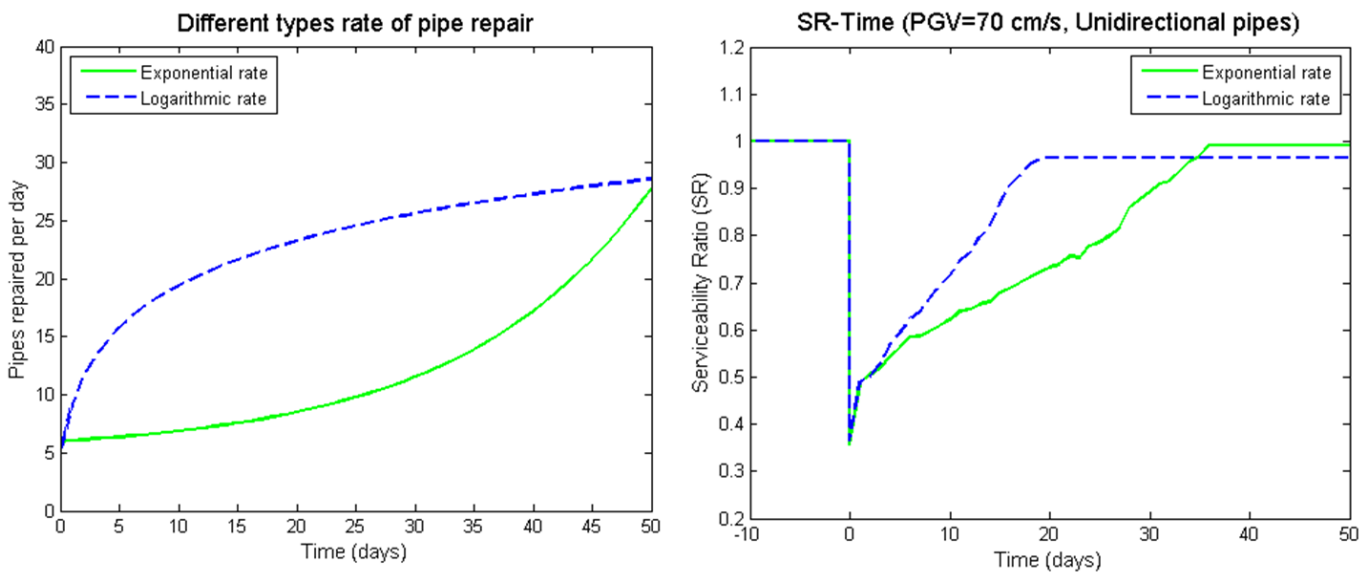
Εικόνα 21: Υπολογισμός δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης για σταθερό αριθμό επισκευής αγωγών ανά ημέρα



Εικόνα 22: Υπολογισμός δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης για σταθερή κλίση $\alpha=1/3$ γραμμικού κλάδου επισκευής αγωγών



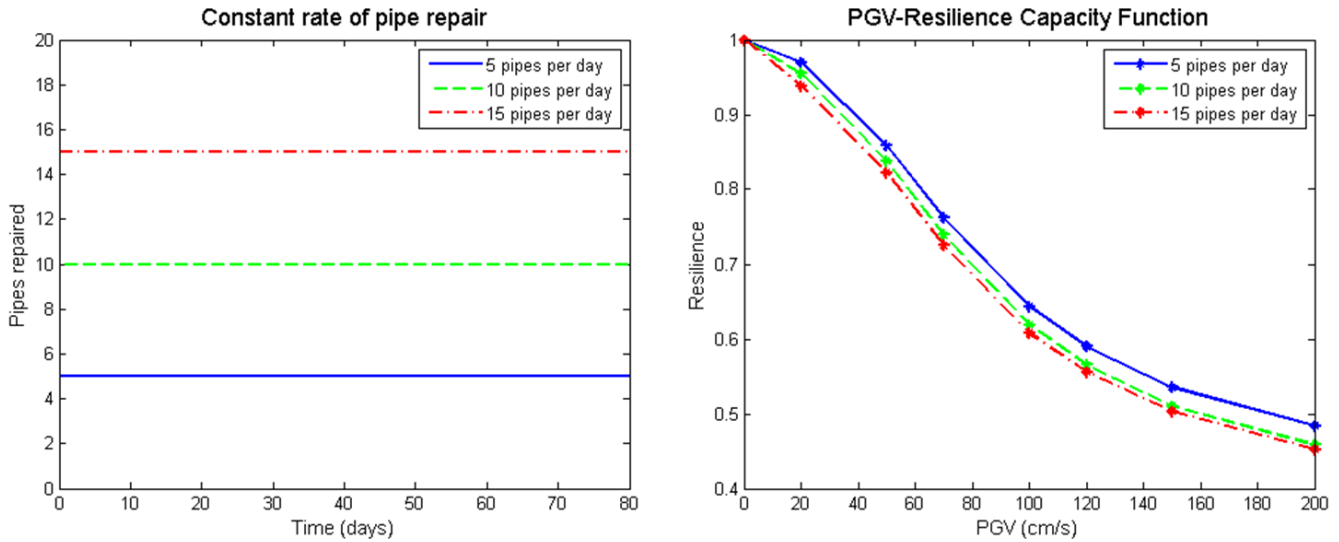
Εικόνα 23: Υπολογισμός δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης για σταθερή κλίση $\alpha=-1/3$ γραμμικού κλάδου επισκευής αγωγών



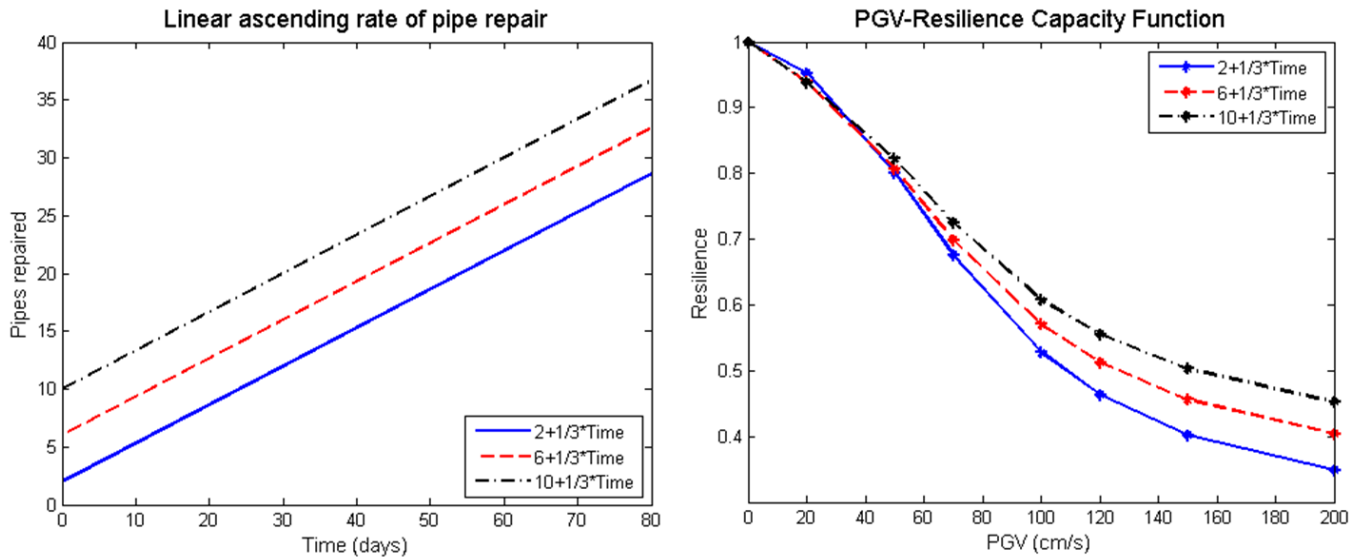
Εικόνα 24: Υπολογισμός δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης για εκθετικό και λογαριθμικό ρυθμό επισκευής αγωγών

Τα αριστερά διαγράμματα των εικόνων 17, 18, 19, 20 με άξονες **Pipes repaired per day-Time (days)** παρουσιάζουν τον ρυθμό επισκευής αγωγών, ενώ τα δεξιά διαγράμματα με άξονες **Serviceability Ratio (SR)-Time (days)** τη μεταβολή του δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης με το χρόνο. Παρατηρείται ότι όσο πιο εντατική είναι η επισκευή των αγωγών τόσο πιο σύντομα χρονικά επιτυγχάνεται η επιθυμητή ικανότητα εξυπηρέτησης, σε επίπεδα λίγο μικρότερα από την αρχική κατάσταση του

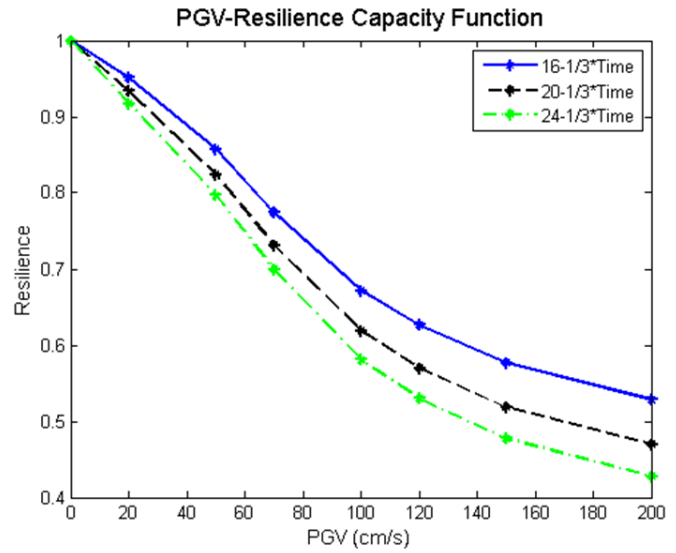
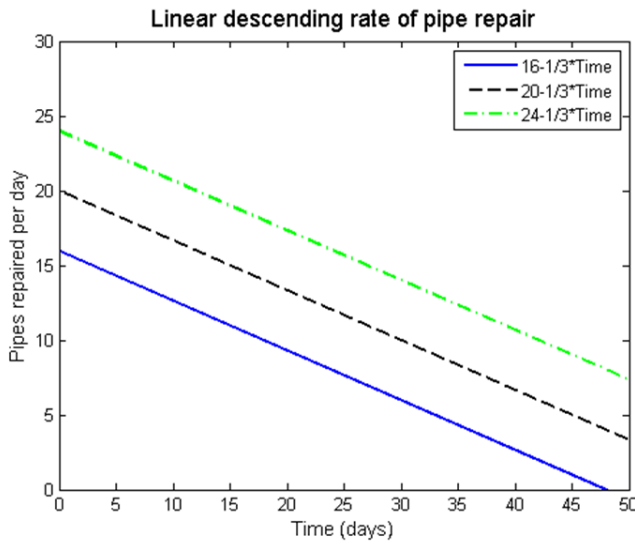
δικτύου. Τα διαγράμματα αυτά έχουν προκύψει για σεισμό με $PGV=70$ cm/s και αγωγούς μονής κατεύθυνσης. Ο λόγος, για τον οποίο μετά τη χρονική στιγμή $t=0$ αυξάνει ο δείκτης SR απότομα είναι ότι επισκευάζονται αρχικά οι αγωγοί με τη μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας, που είναι συνήθως αυτοί με το μεγαλύτερο μήκος.



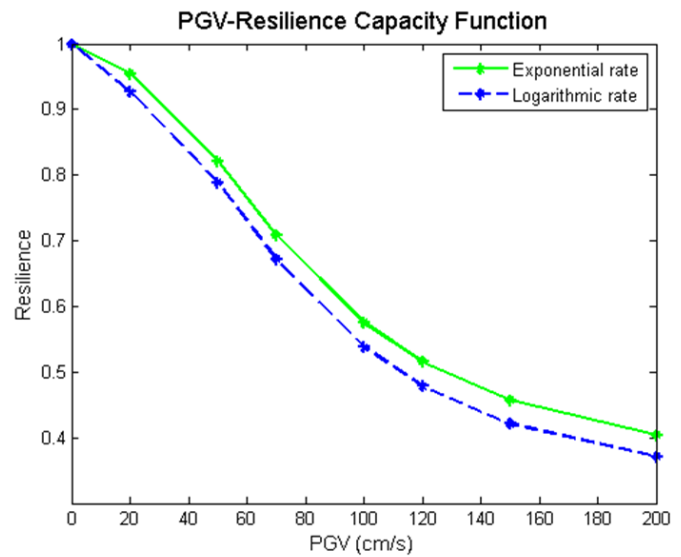
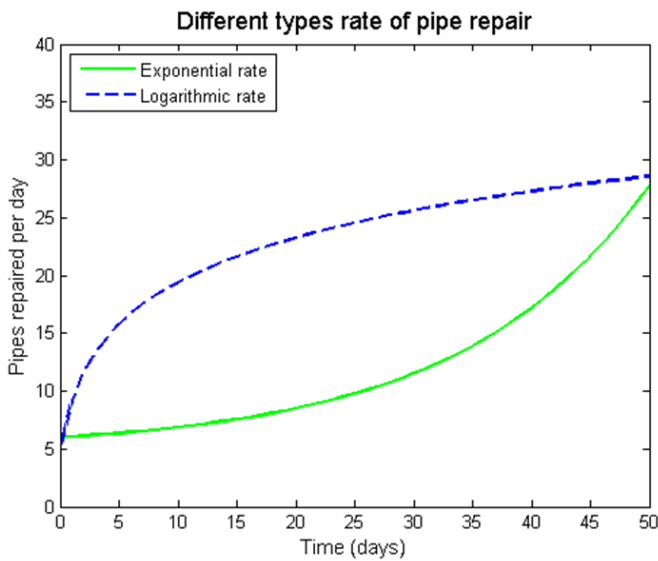
Εικόνα 25: Υπολογισμός προσαρμοστικότητας-PGV για σταθερό αριθμό επισκευής αγωγών ανά ημέρα



Εικόνα 26: Υπολογισμός προσαρμοστικότητας-PGV για σταθερή κλίση $\alpha=1/3$ γραμμικού κλάδου επισκευής αγωγών



Εικόνα 27: Υπολογισμός προσαρμοστικότητας-PGV για σταθερή κλίση $\alpha=-1/3$ γραμμικού κλάδου επισκευής αγωγών



Εικόνα 28: Υπολογισμός προσαρμοστικότητας-PGV για εκθετικό και λογαριθμικό ρυθμό επισκευής αγωγών

Τα αριστερά διαγράμματα των εικόνων 21, 22, 23, 24 με άξονες **Pipes repaired per day-Time (days)** παρουσιάζουν ομοίως το ρυθμό επισκευής αγωγών, ενώ τα δεξιά διαγράμματα τη μεταβολή της προσαρμοστικότητας ως προς τη σεισμική παράμετρο PGV. Όπως είναι αναμενόμενο, η προσαρμοστικότητα μειώνεται όσο αυξάνει το PGV και καταλήγει σε επίπεδα της τάξης 0,4-0,5 για τιμές PGV κοντά στο 200 cm/s. Παρατηρείται, ωστόσο ότι ο ρυθμός επισκευής αγωγών δεν έχει

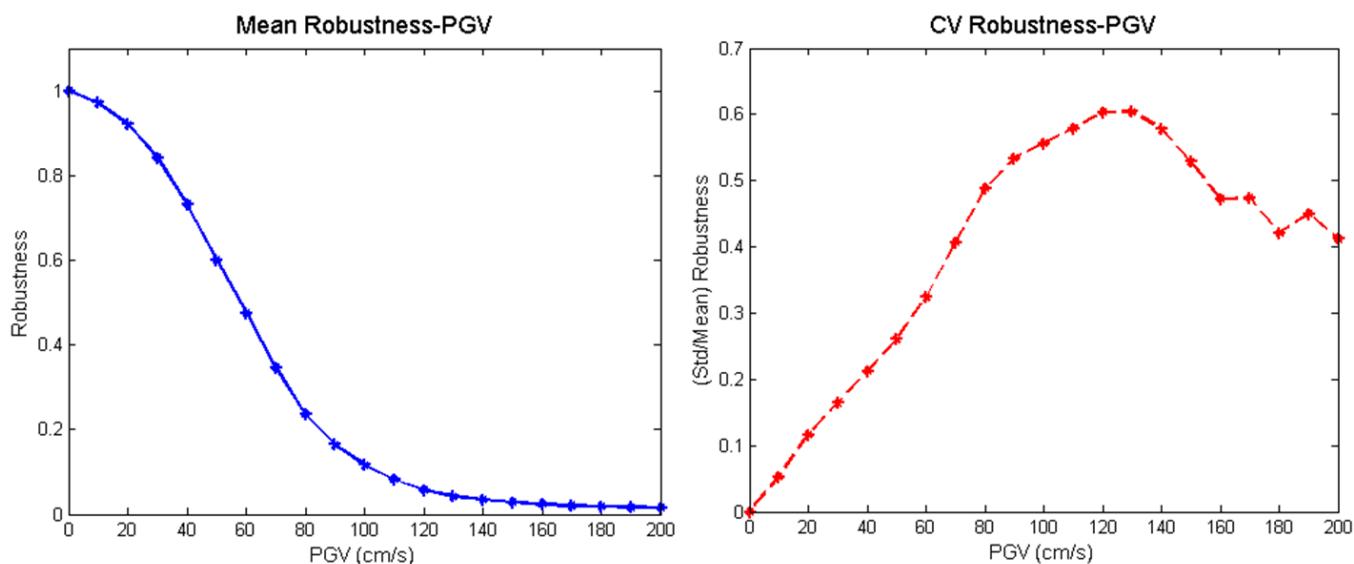
ιδιαίτερη επιρροή στην προσαρμοστικότητα για συγκεκριμένη τιμή PGV, γεγονός που οφείλεται στο ότι σε κάθε περίπτωση ρυθμού επισκευής σωλήνων, τα εμβαδά που περικλείονται στα αντίστοιχα γραφήματα SR-Time δίνουν κοντινές μεταξύ τους τιμές. Αυτό που αλλάζει είναι το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για την επίτευξη αποδεκτής ικανότητας εξυπηρέτησης.

6.2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ PGV ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ SR-ΧΡΟΝΟΥ

Η στιβαρότητα ή αλλιώς ευρωστία αποτελεί μια από τις ιδιότητες της προσαρμοστικότητας και αναλύθηκε στην ενότητα 5.2. Ορίζεται ως η υπολειπόμενη λειτουργικότητα του συστήματος αμέσως μετά το καταστρεπτικό γεγονός και συμβολίζεται με R, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10, που την απεικονίζει σε διάγραμμα Λειτουργικότητας-Χρόνου. Στο αριστερό γράφημα της Εικόνα 29 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής της στιβαρότητας (ή ευρωστίας), δηλαδή στην περίπτωση μας του δείκτη SR του δικτύου της Νέας Αρτάκης, αμέσως μετά στο σεισμό, ως προς τη σεισμική παράμετρο PGV, ενώ στο δεξιό γράφημα ο συντελεστής μεταβολής ή συντελεστής μεταβλητότητας (Coefficient of Variation) της στιβαρότητας επίσης ως προς την PGV. Ο συντελεστής μεταβολής ορίζεται από το λόγο:

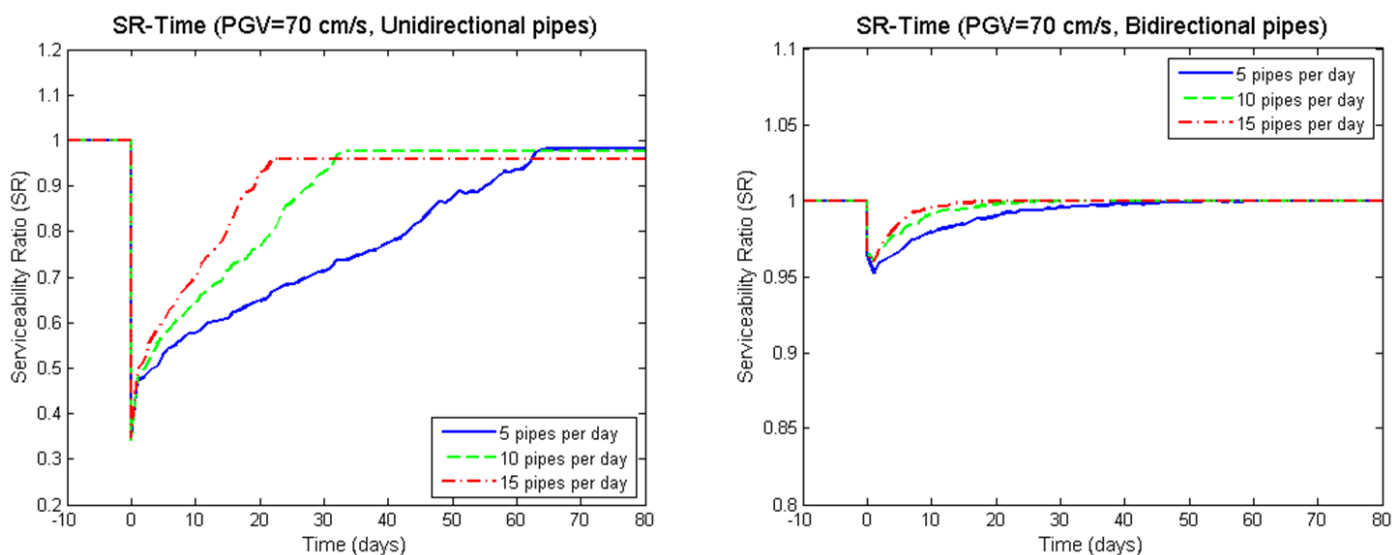
$$COV = \frac{\text{τυπική απόκλιση}}{\text{μέση τιμή}} = \frac{\text{standard deviation}}{\text{mean value}} \quad (6.1)$$

και είναι αδιάστατο μέγεθος, συνεπώς ανεξάρτητο από τις μονάδες μέτρησης και παριστάνει ένα μέτρο σχετικής διασποράς των τιμών, εκφράζει δηλαδή τη μεταβλητότητα των δεδομένων απαλλαγμένη από την επίδραση της μέσης τιμής.



Εικόνα 29: Απεικόνιση μέσης στιβαρότητας (αριστερά) και συντελεστή μεταβολής στιβαρότητας (δεξιά) ως προς PGV

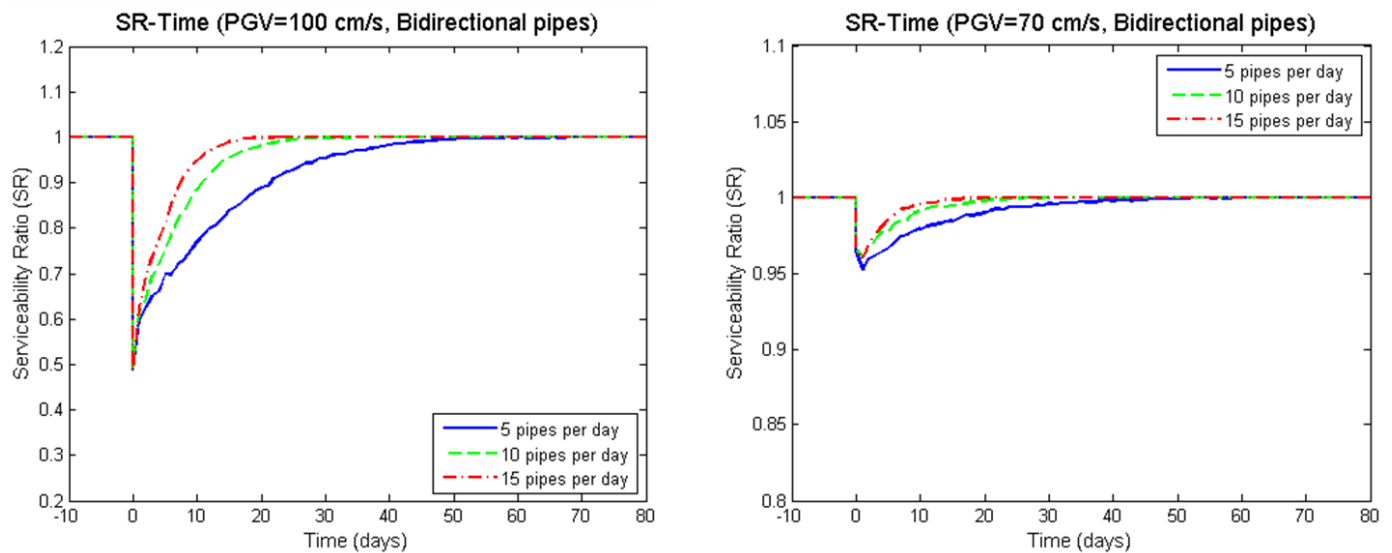
Αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί διερεύνηση της επιρροής του δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης (SR) με το χρόνο, μεταβάλλοντας τη σεισμική παράμετρο PGV και την κατεύθυνση ροής των αγωγών, δηλαδή μονής ή διπλής κατεύθυνσης. Τα διαγράμματα, που παρατίθενται στις Εικόνες 26, 27 δίνουν τη δυνατότητα για σύγκριση τιμών και εξαγωγή παρατηρήσεων.



Εικόνα 30: Σύγκριση διαγραμμάτων SR-Time για ίδιο PGV και αγωγούς μονής (αριστερά) και διπλής (δεξιά) κατεύθυνσης

Πιο συγκεκριμένα, τα 2 γραφήματα της έχουν υλοποιηθεί για σεισμό με PGV=70 cm/s και σταθερό αριθμό επισκευής αγωγών, όπως φαίνεται και στο υπόμνημα και το χαρακτηριστικό που τα διαφοροποιεί είναι ότι στο αριστερό το δίκτυο αποτελείται από αγωγούς μονής κατεύθυνσης, ενώ στο δεξί από αγωγούς διπλής κατεύθυνσης. Παρατηρείται ότι στη 2^η περίπτωση το δίκτυο δεν υφίσταται σχεδόν καθόλου ζημιές, όπως υποδηλώνει η μεγάλη τιμή της στιβαρότητας του ($R \approx 0.95$). Αντίθετα στην 1^η περίπτωση το δίκτυο φέρει αρχικά ζημιές της τάξης του $R \approx 0.35$, που σταδιακά με την επισκευή των αγωγών αποκαθίστανται. Αυτό οφείλεται στο ότι με τους αγωγούς διπλής κατεύθυνσης αυξάνονται οι διαδρομές ροής νερού στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να φτάνει νερό σε περισσότερους κόμβους και έτσι αυτοί να μην αστοχούν.

Στην παρουσιάζονται 2 γραφήματα που αναφέρονται στο δίκτυο της Νέας Αρτάκης για αγωγούς διπλής κατεύθυνσης και διαφορετικό PGV, στο αριστερό PGV=100 cm/s και στο δεξί PGV=70 cm/s. Παρατηρείται επίσης ότι για την περίπτωση με PGV=100 cm/s η στιβαρότητα του δικτύου μειώνεται σημαντικά ($R \approx 0.50$). Εποπτικά η στιβαρότητα στις περιπτώσεις των εικόνων 26, 27 αποτυπώνεται από το χάρτη-heat map των πιθανοτήτων αστοχίας της ενότητας 6.2.2.



Εικόνα 31: Σύγκριση διαγραμμάτων SR-Time για αγωγούς διπλής κατεύθυνσης και διαφορετικό PGV

6.3 ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ

6.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ DMA ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Ως δεύτερο προς μελέτη δίκτυο ύδρευσης επιλέχθηκε ένα κομμάτι του δικτύου της Λευκάδας, το οποίο βρίσκεται στα όρια μιας καθορισμένης DMA (District Metered Area). Τυπικά, το δίκτυο ύδρευσης μιας πόλης χωρίζεται σε ζώνες ανεξάρτητες υδραυλικά μεταξύ τους, έτσι ώστε οι αρμόδιες Αρχές να μπορούν να μελετήσουν ξεχωριστά την καθεμιά, να απομονώσουν τυχόν ζημιές εντός περιορισμένων σε έκταση περιοχών και να πάρουν άμεσα τα απαραίτητα μέτρα για την αντιμετώπιση τους. Ουσιαστικά, η DMA του δικτύου ύδρευσης της Λευκάδας που επιλέχθηκε αποτελεί ένα ανεξάρτητο υδραυλικά τμήμα του με ένα κόμβο εισόδου νερού, όπου δεν παρατηρούνται ανεξέλεγκτες εισροές ή εκροές νερού.

Η συγκεκριμένη ζώνη περιλαμβάνει το κεντρικό τμήμα του δικτύου ύδρευσης της Λευκάδας. Πρακτικά, περιλαμβάνει την περιοχή του ιστορικού κέντρου και τις διπλανές παραλιακές ζώνες και δυτικά οριοθετείται από την τοποθεσία του νοσοκομείου της πόλης. Ο λόγος για τον οποίο μελετάται η DMA αυτή είναι για λόγους πρακτικής και υπολογιστικής ευχέρειας. Ωστόσο η έλλειψη πραγματικών στοιχείων, αναφορικά με την τοποθεσία και τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων δεν επιτρέπει τον σαφή προσδιορισμό των αναλύσεων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, που μπορούν να αξιοποιηθούν στην πράξη. Επομένως το παρόν δίκτυο μπορεί να χαρακτηριστεί ως εμπνευσμένο από την πόλη της Λευκάδας και μια εναέρια άποψη αυτού στο λογισμικό Google Earth φαίνεται στην Εικόνα 32.

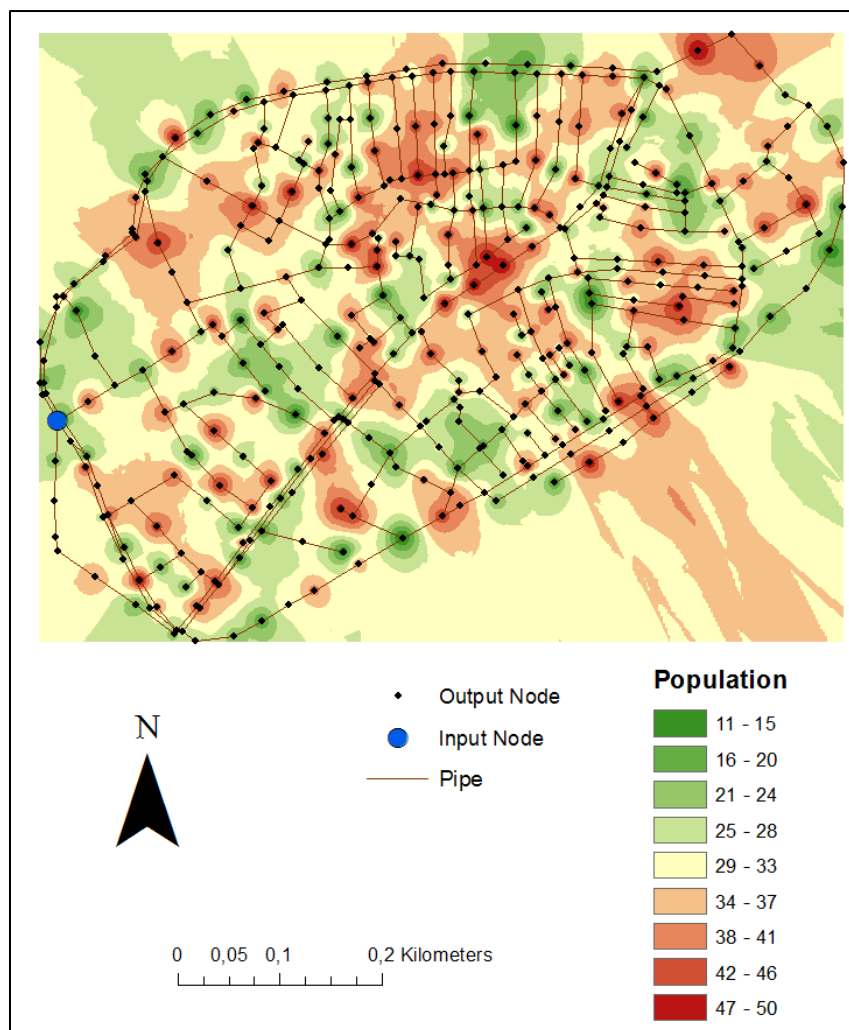
Συνολικά το δίκτυο αποτελείται από 495 αγωγούς, 420 κόμβους, καλύπτει μια περιοχή διαστάσεων 790×595 m και το συνολικό μήκος των αγωγών είναι 15.191 m. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011, η δημοτική ενότητα Λευκάδος έχει πληθυσμό 12.895 μόνιμους κατοίκους, αριθμός που αυξάνει σημαντικά κατά τη θερινή περίοδο. Όπως και στην πρώτη αριθμητική εφαρμογή, ο πληθυσμός υπολογίστηκε προσεγγιστικά ανά κόμβο εξόδου του δικτύου και αποτυπώθηκε η χωρική του κατανομή στο χάρτη (heat map) της Εικόνα 33. Κατά μέσο όρο κάθε κόμβος παρέχει νερό σε 31

καταναλωτές και ο μέγιστος αριθμός καταναλωτών σε ένα κόμβο είναι 50. Η κατανομή του πληθυσμού είναι στοιχείο, που αξιοποιείται για τον υπολογισμό του SR με βάση τη σχέση (3.11).



Εικόνα 32: Εναέρια άποψη της πόλης της Λευκάδας και γραφική απεικόνιση του δικτύου ύδρευσης της

Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση της κατανομής του πληθυσμού είναι η IDW (Inverse Distance Weighted), καθώς αποτυπώνει καλύτερα από τις υπόλοιπες μεθόδους τον αριθμό των καταναλωτών σε κάθε κόμβο.



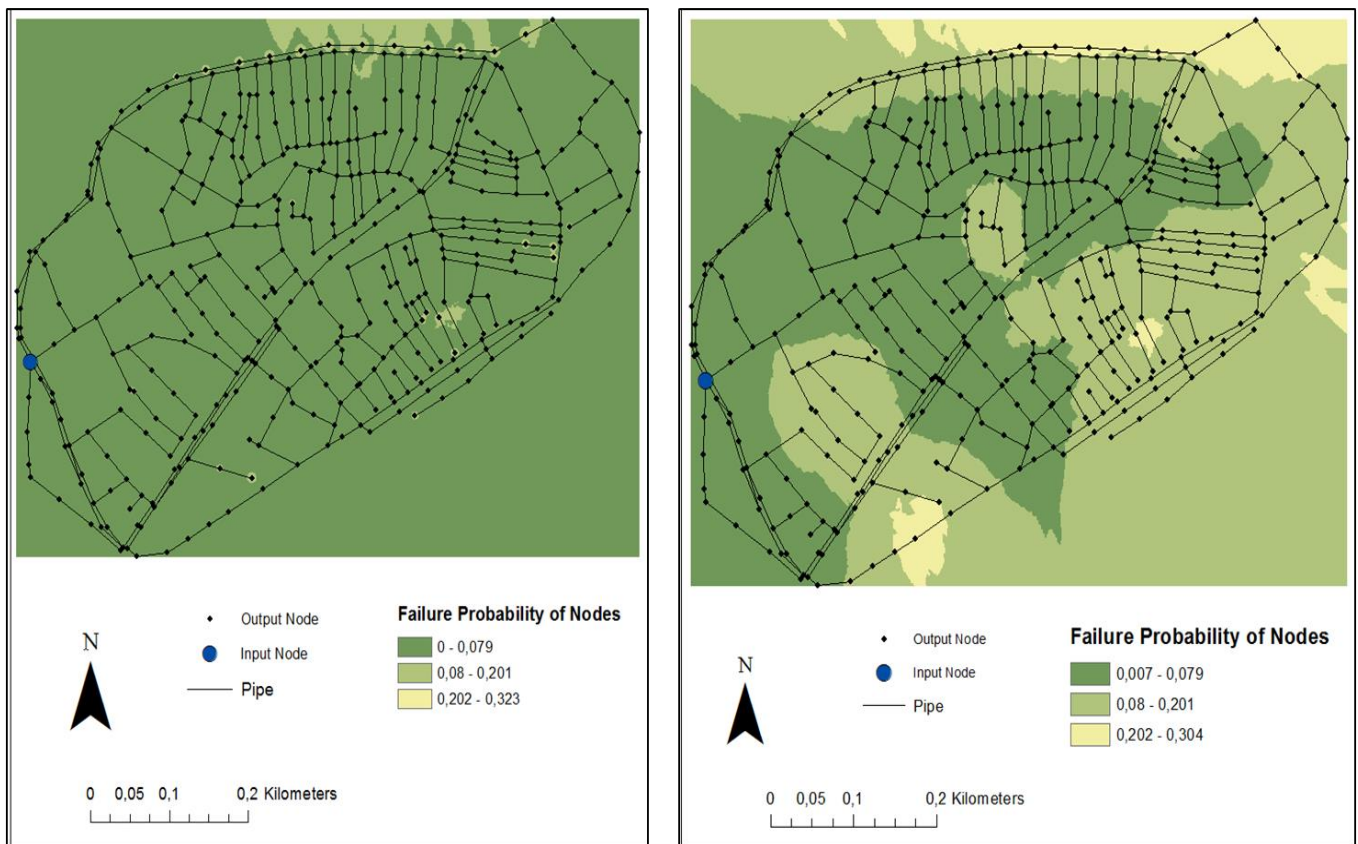
Εικόνα 33: Κατανομή πληθυσμού Λευκάδας

6.3.2 ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Για το υπό μελέτη δίκτυο της Λευκάδας, χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις αγωγοί διπλής κατεύθυνσης (Bidirectional pipes), καθώς έγινε προσπάθεια για χρήση αγωγών μονής κατεύθυνσης με σταδιακή αύξηση του αριθμού των κόμβων εισροής νερού, χωρίς ωστόσο να επιτυγχάνεται επιθυμητό επίπεδο λειτουργικότητας, πιθανώς λόγω της δεδομένης τοπολογίας του δικτύου. Δίνεται έτσι η δυνατότητα για σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά του δικτύου της Νέας Αρτάκης, όπου χρησιμοποιήθηκαν αγωγοί μονής κατεύθυνσης. Στην παρούσα αριθμητική εφαρμογή πραγματοποιήθηκε, ομοίως με την προηγούμενη εφαρμογή, ανάλυση του δικτύου με τη χρήση

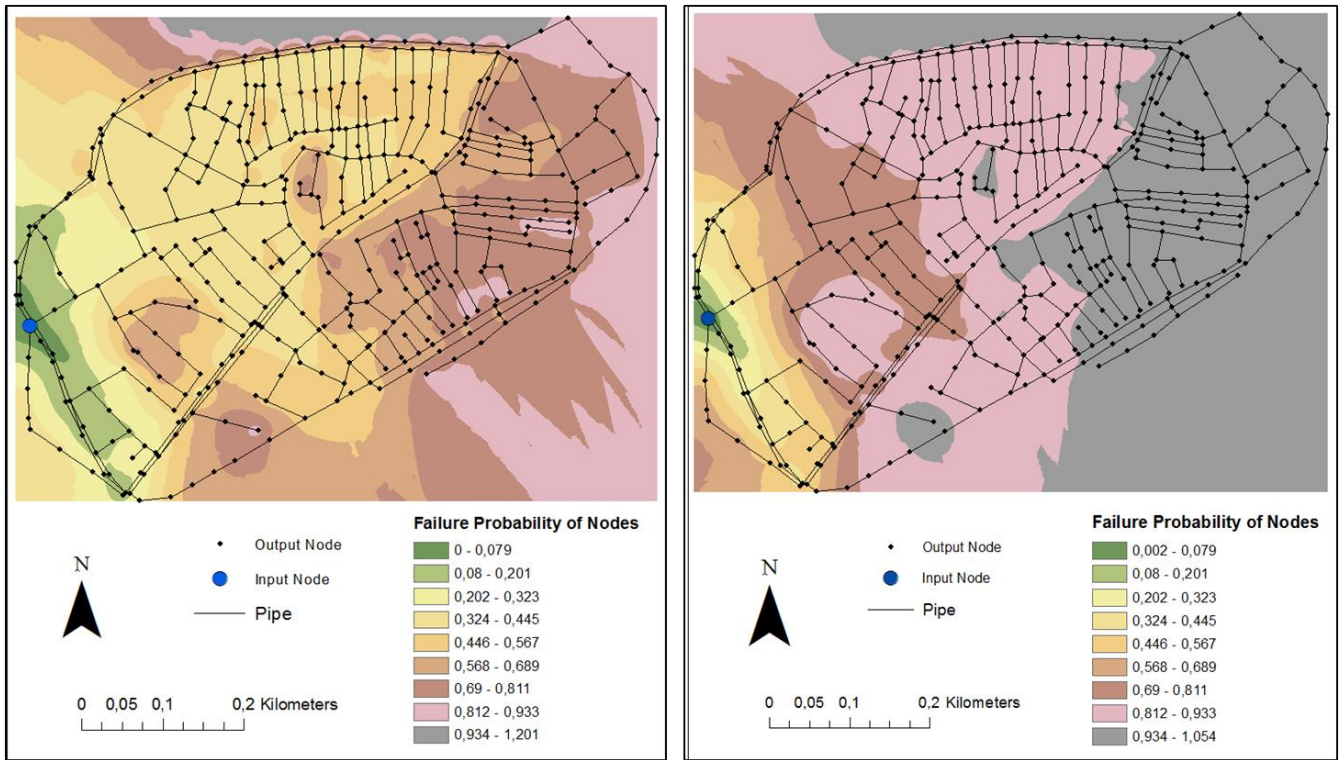
κώδικα, βασισμένο στη μέθοδο Monte Carlo και κατασκευασμένο από τους Fragiadakis et al. (S.E. Christodoulou & Fragiadakis, 2014, Fragiadakis et al., 2013). Τα βήματα για την διενέργεια της ανάλυσης αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.2.2.

Επιχειρείται να γίνει διερεύνηση των πιθανοτήτων αστοχίας των κόμβων του δικτύου της Λευκάδας με τη μεταβολή της σεισμικής παραμέτρου PGV ξεκινώντας από την τιμή 50 cm/s μέχρι 200 cm/s και μηδενικές τις υπόλοιπες σεισμικές παραμέτρους. Οι πιθανότητες αστοχίας αποτυπώνονται σε χάρτη (heat map), που προσφέρει εποπτεία και κατανόηση από την πλευρά του αναγνώστη.

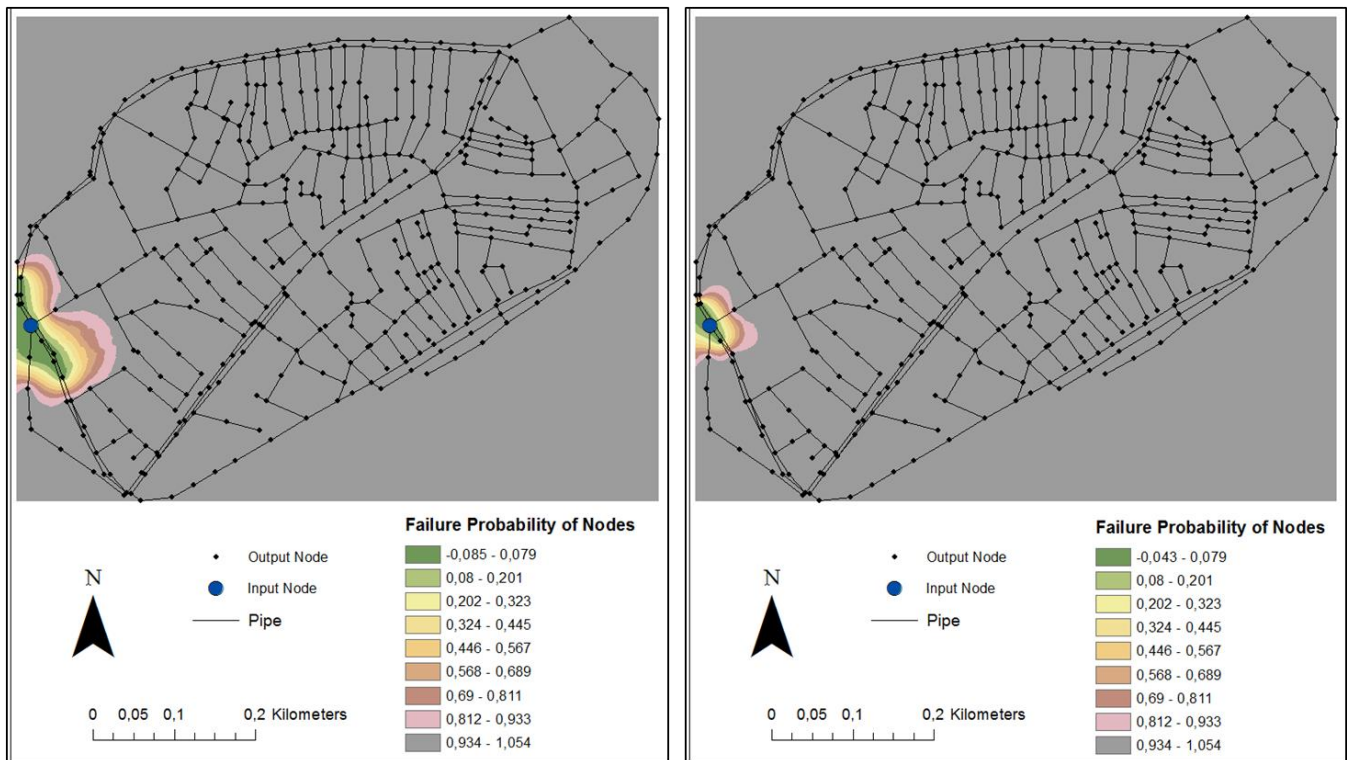


Εικόνα 34: Απεικόνιση πιθανοτήτων αστοχίας για PGV=50 cm/s (αριστερά) και PGV=70 cm/s (δεξιά)

Παρατηρείται ότι για τιμές PGV των 2 χαρτών της Εικόνας 30 οι πιθανότητες είναι ιδιαίτερα μικρές, γεγονός που μεταφράζεται στο ότι το δίκτυο δεν υφίσταται βλάβες. Οι βλάβες ξεκινούν από PGV=100cm/s και το δίκτυο φαίνεται να πλήττεται παντελώς για τιμές από PGV=150 cm/s, όπως φαίνεται στην εικόνα 31. Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε είναι η kriging.



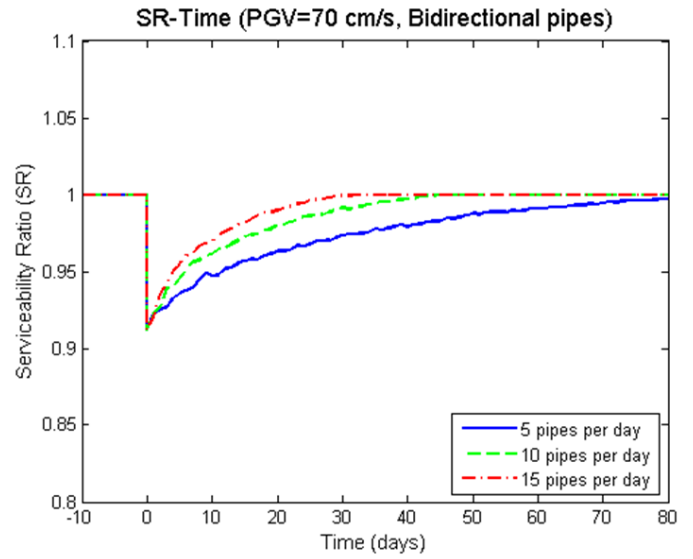
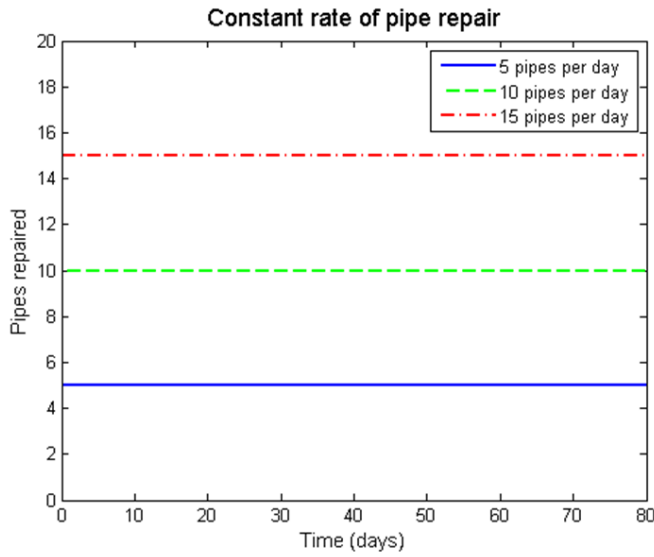
Εικόνα 35: Απεικόνιση πιθανοτήτων αστοχίας για $PGV=100\text{ cm/s}$ (αριστερά) και $PGV=120\text{ cm/s}$ (δεξιά)



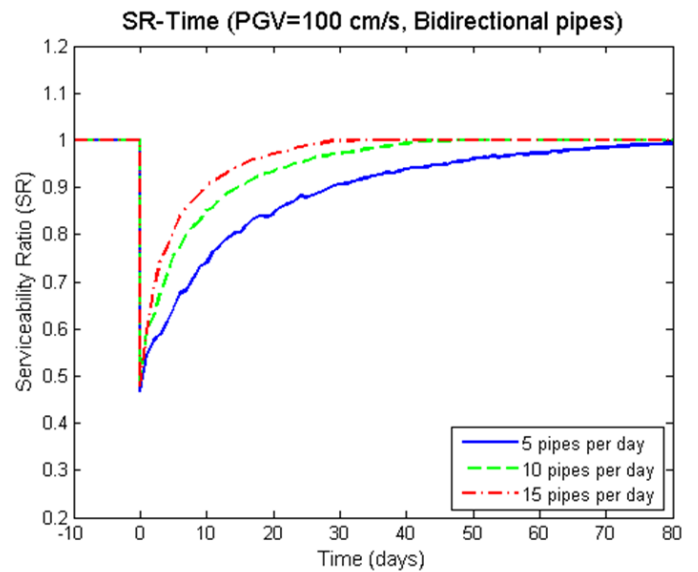
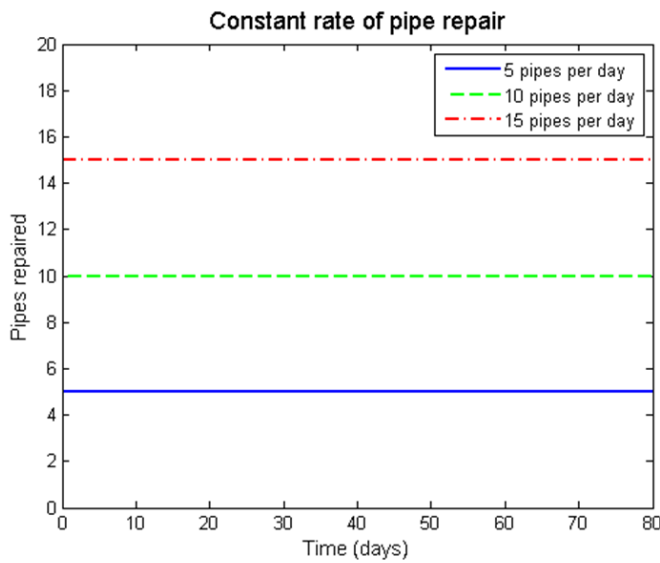
Εικόνα 36: Απεικόνιση πιθανοτήτων αστοχίας για $PGV=150\text{ cm/s}$ (αριστερά) και $PGV=200\text{ cm/s}$ (δεξιά)

6.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ, ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

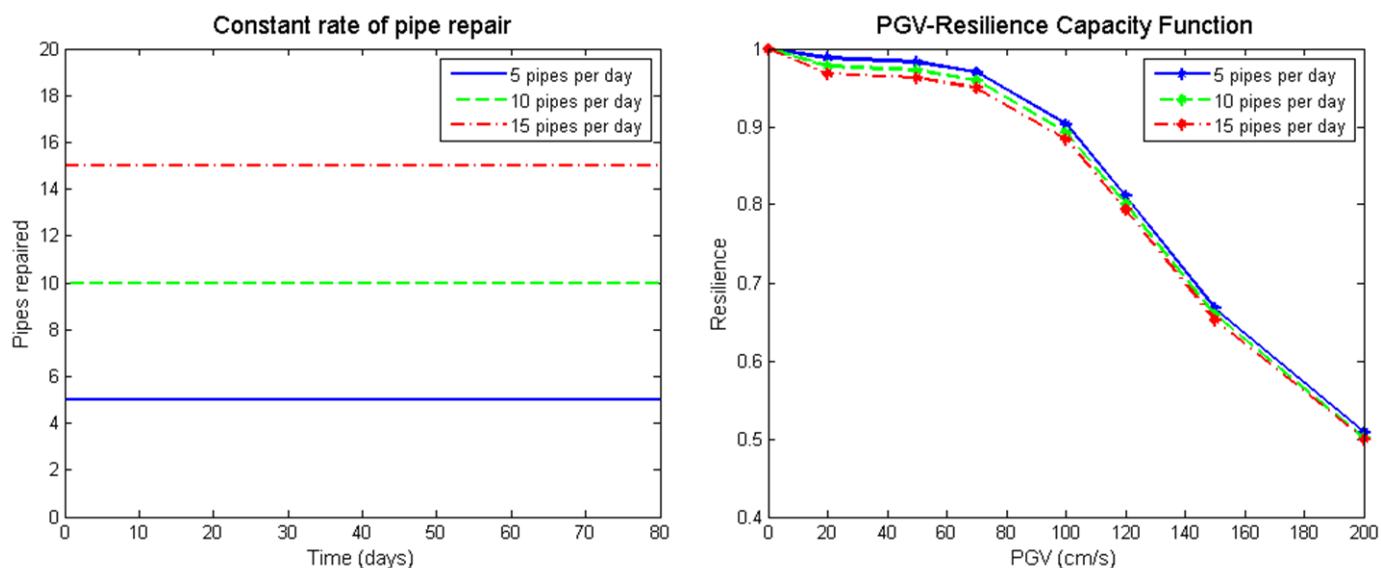
Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα γραφήματα των Εικόνων 33, 34, που αφορούν την επιδιόρθωση των αγωγών, αμέσως μετά το σεισμό, με σταθερό αριθμό επισκευής αγωγών ανά ημέρα, που προέκυψαν κατόπιν αναλύσεων στο λογισμικό MATLAB και σύμφωνα με τη μέθοδο Monte Carlo για $PGV=70\text{ cm/s}$ και $PGV=100\text{ cm/s}$ αντίστοιχα. Ταξινομήθηκαν οι πιθανότητες αστοχίας των αγωγών σε φθίνουσα σειρά και εκχωρήθηκε σταδιακά, ανάλογα με τον ρυθμό επισκευής τους, η κατασκευαστική πιθανότητα αστοχίας τους, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργικότητα, που εκφράζεται με το δείκτη SR. Με βάση τους ίδιους ρυθμούς επισκευής, προσδιορίστηκε η προσαρμοστικότητα για την εκάστοτε περίπτωση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35.



Εικόνα 37: Υπολογισμός δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης για $PGV=70\text{ cm/s}$ και σταθερό αριθμό επισκευής αγωγών ανά ημέρα

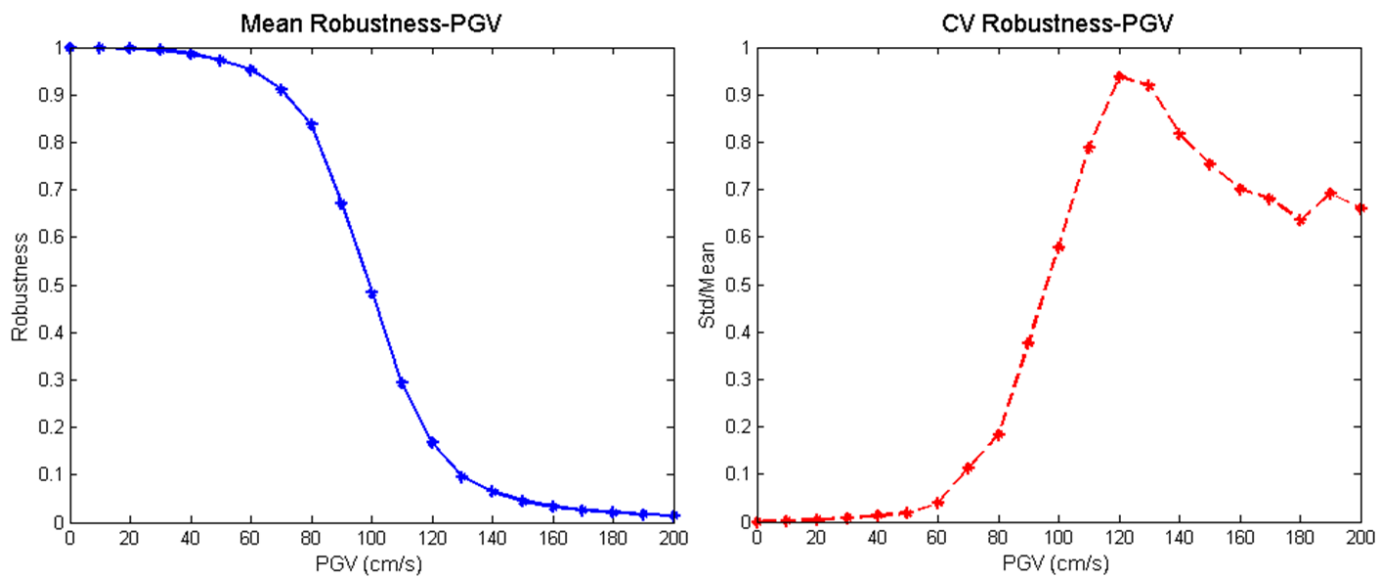


Εικόνα 38: Υπολογισμός δείκτη ικανότητας εξυπηρέτησης για $PGV=100\text{ cm/s}$ και σταθερό αριθμό επισκευής αγωγών ανά ημέρα



Εικόνα 39: Υπολογισμός προσαρμοστικότητας-PGV για σταθερό αριθμό επισκευής αγωγών ανά ημέρα

Στο αριστερό γράφημα της Εικόνας 36 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής της στιβαρότητας (ή ευρωστίας), δηλαδή στην περίπτωση μας του δείκτη SR του δικτύου της Λευκάδας, αμέσως μετά το σεισμό, ως προς τη σεισμική παράμετρο PGV, ενώ στο δεξιό γράφημα ο συντελεστής μεταβολής ή συντελεστής μεταβλητότητας (Coefficient of Variation) της στιβαρότητας επίσης ως προς την PGV. Οι δείκτες στιβαρότητα και συντελεστής μεταβλητότητας της στιβαρότητας περιγράφηκαν στην ενότητα 6.2.4.



Εικόνα 40: Απεικόνιση μέσης στιβαρότητας (αριστερά) και συντελεστή μεταβολής στιβαρότητας (δεξιά) ως προς PGV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΝΕΑΣ ΑΡΤΑΚΗΣ

Στην αριθμητική εφαρμογή του τμήματος του δικτύου ύδρευσης της Νέας Αρτάκης που επιλέχθηκε, επιχειρήθηκε να γίνει μια διερεύνηση της επιρροής της ομοιόμορφης σεισμικής φόρτισης με παράμετρο μόνο την PGV και αμελώντας τις υπόλοιπες PGD, PGS, στην κατανομή των πιθανοτήτων αστοχίας των κόμβων. Το δίκτυο φαίνεται να λειτουργεί ικανοποιητικά με μέτριας έντασης σεισμό ($PGV=70$ cm/s) και με τη χρήση αγωγών μονής κατεύθυνσης, που προσομοιάζουν με τους αγωγούς βαρύτητας, που η ροή τους εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά των κόμβων που ενώνουν. Για λόγους συγκρίσεων πραγματοποιήθηκε ανάλυση με το ίδιο PGV και με αγωγούς διπλής κατεύθυνσης και φάνηκε ότι το δίκτυο παρουσιάζει πολύ καλή απόκριση με τις πιθανότητες αστοχίας να μην υπερβαίνουν το 15%. Επιπλέον οι πιθανότητες αστοχίας των αγωγών για σεισμό με $PGV=100$ cm/s και αγωγούς διπλής κατεύθυνσης προκύπτουν περίπου ίδιας τάξης μ' αυτές της περίπτωσης με $PGV=70$ cm/s και αγωγούς μονής κατεύθυνσης.

Το δίκτυο της Νέας Αρτάκης χαρακτηρίζεται βρογχωτό, διότι αποτελείται από κλειστές διαδρομές και ο αριθμός των ανοιχτών στοιχείων του είναι μικρός, σ' αυτό οφείλεται και η καλή συμπεριφορά του αμέσως μετά το σεισμό με τους αγωγούς μονής κατεύθυνσης. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι έχει σημαντική επιρροή στην κατανομή της πιθανότητας αστοχίας η τοπολογία (συνδεσιμότητα) του δικτύου, αριθμός αγωγών και κόμβων και η ύπαρξη ή μη ανοιχτών στοιχείων στο δίκτυο.

Στο πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης ικανότητας εξυπηρέτησης (SR) για να δείξει το επίπεδο λειτουργικότητας του δικτύου. Επιχειρήθηκε με διάφορους ρυθμούς επισκευής αγωγών (σταθερός αριθμός, αύξων-φθίνων γραμμικός κ.α.) να διαπιστωθεί το αντίκτυπο που έχουν στην αύξηση του δείκτη SR. Παρατηρήθηκε ότι για εντατικό ρυθμό επιδιόρθωσης αγωγών επιτυγχάνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα (χρόνος αποκατάστασης) αποκατάσταση και επαναφορά της λειτουργικότητας, ωστόσο η

προσαρμοστικότητα κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, γιατί υπολογίζει το εμβαδόν που περικλείεται από το γράφημα SR-Χρόνος και σε κάθε περίπτωση επισκευής βγαίνει περίπου ίδιο, όπως φαίνεται από τα αντίστοιχα γραφήματα της ενότητας 6.2.3. Επειδή οι επισκευές των σωλήνων αφορούν το δίκτυο σε όλη του την έκταση, δηλαδή επιλέγονται αρχικά προς επισκευή οι σωλήνες με τη μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας, οι οποίοι μπορούν να βρισκονται οπουδήποτε μέσα στην έκταση του δικτύου και σταδιακά επισκευάζονται οι υπόλοιποι με φθίνουσα σειρά, προτείνεται να χωριστεί το δίκτυο ύδρευσης σε επιμέρους ζώνες, οι οποίες ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους και τα συνεργεία επισκευής να αποκαθίστανται πιο άμεσα και χωρίς ιδιαίτερες τεχνικές δυσκολίες. Η κάθε ζώνη μάλιστα, ανάλογα με τον αριθμό των καταναλωτών που εξυπηρετεί και ανάλογα με το αν περιλαμβάνει κρίσιμες υποδομές (νοσοκομεία, σχολεία κλπ) εμφανίζει διαφορετική βαρύνουσα σημασία και οι αρμόδιες αρχές οφείλουν να κατανείμουν τους διαθέσιμους πόρους και να αποφασίσουν για την άμεση ή μη αποκατάσταση της.

7.2 ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ

Στο πλαίσιο της αριθμητικής εφαρμογής του δικτύου ύδρευσης της Λευκάδας χρησιμοποιήθηκαν αγωγοί διπλής κατεύθυνσης και απεικονίστηκαν οι πιθανότητες αστοχίας των κόμβων του δικτύου. Παρατηρείται ότι σημαντικής κλίμακας βλάβες παρουσιάζονται για $PGV \geq 100$ cm/s και αυτές οι πιθανότητες αστοχίας αυξάνονται καθώς απομακρυνόμαστε από τον μοναδικό κόμβο εισόδου του δικτύου. Θα πρέπει να επισημανθεί, ότι έγινε προσπάθεια ανάλυσης του δικτύου με αγωγούς μονής κατεύθυνσης (από κόμβο αρχής σε κόμβο τέλους βάσει αρίθμησης), ωστόσο το άθικτο, πριν το σεισμό, δίκτυο δεν παρουσίαζε καλή απόκριση, λόγω του ότι υπάρχουν πολλά ανοιχτά στοιχεία και η τοπολογία δεν εμφανίζει βρόχους που επιτρέπουν την αναδιανομή του νερού.

Η χρήση ανομοιόμορφης χωρικά σεισμικής φόρτισης μεταβάλλει σε κάποιο βαθμό την κατανομή των πιθανοτήτων αστοχίας και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί αντί της ομοιόμορφης φόρτισης, εφόσον αποτελεί πιο ρεαλιστική προσομοίωση φόρτισης. Στην παρούσα εργασία όμως, αποφασίστηκε να αξιοποιηθεί η ομοιόμορφη φόρτιση, αφενός για να

διαπιστωθεί η εξάρτηση των μεγεθών PGV με τις πιθανότητες αστοχίας και τους δείκτες SR και στιβαρότητα (Robustness) και αφετέρου λόγω έλλειψης διαθέσιμων σεισμικών και γεωτεχνικών δεδομένων και του πολύπλευρου κόστους αναλύσεων σεισμικής απόκρισης εδάφους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ALA. (2001). Seismic Fragility Formulations for Water Systems: Part 1 - Guideline.

Christodoulou S.E., Fragiadakis M., Agathokleous A., & Xanthos S. (2017). Urban Water Distribution Networks: Assessing Systems Vulnerabilities, Failures, and Risks. *Butterworth-Heinemann 2018*.

Cimellaro G. (2015). From Performance to Resilience-Based Design of Structures – Keynote Lecture. In: XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica, Santiago del Chile, March 18th to 20th, 2015.

Cimellaro G.P. (2016). Urban Resilience for Emergency Response and Recovery. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 41(1), 31-48.

Cimellaro G.P., Reinhorn A.M., Bruneau M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 32(11), 3639-3649.

Cimellaro G.P., Reinhorn A.M., Bruneau M. (2010). Seismic resilience of a hospital system. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2): *Vulnerability Assessment of Structures and Infrastructures*. 127-144

Cimellaro G.P., Tinebra A., Renschler C., Fragiadakis M. (2016). New Resilience Index for Urban Water Distribution Networks. *Journal of Structural Engineering*, 142(8), C4015014-1-C4015014-13.

Davis C.A. (2014). Water System Service Categories, Post-Earthquake Interaction, and Restoration Strategies. *Earthquake Spectra*, 30(4), 1487-1509.

Fragiadakis M., Christodoulou S.E. (2013). Seismic reliability assessment of urban water networks. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 43(3) 357-374.

Fragiadakis M., Christodoulou S.E., Vamvatsikos D. (2013). Reliability Assessment of Urban Water Distribution Networks Under Seismic Loads. *Water Resources Management*, 27(10), 3739-3764.

Gunawan I., Schultmann F., & Zarghami S.A. (2017). The four Rs performance indicators of water distribution networks: A review of research literature. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(5), 720-732.

Hanselman D.C., Littlefield B.L. (2011). *Mastering Matlab*: 1st edition.

Matthews J.C. (2016). Disaster Resilience of Critical Infrastructure Systems. *Journal of Structural Engineering*, 142(8), C6015001-1- C6015001-4.

Michel Bruneau, Stephanie E. Chang, Ronald T. Eguchi, George C. Lee, Thomas D. O'Rourke, Andrei M. Reinhorn, Masanobu Shinozuka, Kathleen Tierney, William A. Wallace, and Detlof von Winterfeldt. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.

Paolucci R., Pitilakis K. (2007). Seismic Risk Assessment of Underground Structures under Transient Ground Deformations. *Earthquake Geotechnical Engineering, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol 6. Springer, Dordrecht*, 433-459

Peng W., Mayorga R.V. (2016). Hydraulic Reliability Assessment and Optimal Rehabilitation/Upgrading Schedule for Water Distribution Systems. *Applied Mathematics*, 7(18), 2336-2353.

Pitilakis K., Alexoudi M., Argyroudis S., Monge O., Martin C. (2006). Earthquake risk assessment of lifelines. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 365-390.

Weatherill G., Esposito S., Iervolino I., Franchin P., Cavalieri F. (2014). Framework for Seismic Hazard Analysis of Spatially Distributed Systems. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 31, 57-88.

Σκάνδαλος Κωνσταντίνος (2015). Εκτίμηση σεισμικού κινδύνου για αστικά δίκτυα διανομής νερού με συνυπολογισμό της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης. *Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*.