



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΝΟΝΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΥΔΡΟΔΟΤΙΚΟ
ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΜΕ ΣΥΝΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ
ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟΥ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωτσαλάς Βασίλειος

Επιβλέπων : Χρήστος Μακρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2015

Περίληψη

Η επιδείνωση των υποδομών νερού στα συστήματα διανομής νερού έχει εξελιχθεί σε μια σημαντική ανησυχία για τους διαχειριστές νερού τα τελευταία χρόνια. Για να αναπτυχθεί μια αποτελεσματική προληπτική πολιτική επιδιόρθωσης και αντικατάστασης των υποδομών, οι διαχειριστές νερού συχνά βασίζονται σε μοντέλα πρόβλεψης των αστοχιών των υποδομών των δικτύων ύδρευσης. Η αστοχία των υποδομών αυτών και κυρίως η θραύση των αγωγών του συστήματος, που αποτελεί την πιο σημαντική αστοχία αυτού, έχει όχι μόνο οικονομική επίπτωση (επισκευή, αντικατάσταση και άλλα κόστη), αλλά και σημαντικό κοινωνικό αντίκτυπο (μη κάλυψη ζήτησης, διακοπή υπηρεσιών, δυσαρέσκεια των πολιτών), καθώς επίσης και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (διαφυγόν νερό και ενέργεια). Εκτός από τα μοντέλα αστοχιών όμως, σε ένα σύστημα διανομής νερού πρέπει να γνωρίζουμε και την εξελικτική διαδικασία των υδατικών πόρων μέσα στον χρόνο, δηλαδή τη μελλοντική συμπεριφορά αυτών, ώστε ο αρχικός σχεδιασμός να γίνει με τέτοιο τρόπο που να βελτιστοποιεί και να προλαμβάνει την εμφάνιση τυχούσας έλλειψης διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, όπως είναι η λειψυδρία. Τα μοντέλα αυτά περιγράφονται από παραμέτρους, οι οποίες εκτιμώνται με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών υδρολογικών χρονοσειρών και ονομάζονται στοχαστικά μοντέλα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, διάφορα εργαλεία και μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος διανομής νερού, σε μια προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος της αστοχίας να καλυφθεί η ζήτηση, είτε λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων, είτε λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας των στοιχείων μεταφοράς του συστήματος εξαιτίας της αστοχίας των υποδομών αυτού. Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια σύνδεσης αυτών των δύο ειδών αστοχίας με τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας και των κανόνων λειτουργίας αυτού, σε συνθήκες πολύ χαμηλών αποθεμάτων νερού των ταμιευτήρων του συστήματος, με ταυτόχρονη βλάβη συγκεκριμένων δομικών στοιχείων αυτού. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο UWOT, το οποίο υιοθετεί μια προσέγγιση μοντελοποίησης και είναι ικανό να προσομοιώσει ολόκληρο τον κύκλο του αστικού νερού από την πηγή μέχρι τα νοικοκυριά και πάλι πίσω. Γίνεται τέλος αναφορά σε διάφορα μοντέλα πρόβλεψης αστοχιών των υποδομών και κυρίως σε θραύσεις αγωγών και των διαφόρων προσεγγίσεων που ακολουθήθηκαν, ενώ ταυτόχρονα περιγράφεται και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εύρεση των κανόνων λειτουργίας του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας και της αξιοπιστίας αυτού, που αποτελεί και το σημαντικότερο κριτήριο προτεραιότητας στην προληπτική συντήρηση των δικτύων ύδρευσης, μιας και αποτελεί ένα μέτρο εκτίμησης του βαθμού επιτυχίας και αποδοτικότητας ενός συστήματος, που έχει συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και διάρκεια αποστολής.

Abstract

The deterioration of water infrastructure in water distribution systems has grown into a major concern for water managers in recent years. To develop an effective preventive repair and replacement policy of infrastructure, water managers often rely on predictive models of failures of water supply systems infrastructure. The failure of such infrastructures, especially the breaking of system of pipelines, which is the most important failure, has not only economic impact (repair, replacement and other costs), but also a significant social impact (not demand coverage, service interruption, dissatisfied citizens), as well as environmental effects (loss of water and energy). Besides the failure models, in a water distribution system must be known the evolutionary process of water resources through the time, namely their future behavior, so that the initial design be done in such a manner that optimizes and prevents the appearance of any lack of availability of water resources, such as water scarcity. These models are described by parameters, which are estimated based on statistical characteristics of historic hydrological time series and are called stochastic models. To address this, various tools and models are used to optimize the operation of the water distribution system in an effort to minimize the risk of failure to cover the demand either due to limited availability of water resources or because of the limited capacity of the system transmission components, due to the failure of this infrastructure. In this study, an attempt was made to connect these two types of failure to determine the reliability of the water supply system of Athens and its operating rules, in conditions of very low water storage in the system reservoirs, with simultaneous failure of specific components thereof. For this purpose was used UWOT tool, which adopts a modeling approach and is able to simulate the whole cycle of urban water from source to household and back again. Reference finally is made to various predictive infrastructure failure models, especially in pipe breaks and the different approaches followed, while described and the procedure followed for estimating the operating rules of the water supply system of Athens and its reliability, which is the most important criterion of priority of preventive maintenance of water supply systems, as it constitutes a measure to assess the degree of success and effectiveness of a system that has specific operating conditions and mission.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, πρωτίστως τους γονείς μου, για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια και όχι μόνο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, οι οποίοι δεν έπαψαν ποτέ να με στηρίζουν και να με καθοδηγούν, καθώς επίσης και τα αδέρφια μου Αντρέα και Έλενα.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	11
Κατάλογος Σχημάτων	12
Κατάλογος Εικόνων	12
Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 1.....	14
Αξιοπιστία	14
1.1 Ορισμοί.....	14
1.2 Προληπτική συντήρηση.....	14
1.3 Κριτήριο προτεραιότητας προληπτικής συντήρησης	15
1.3.1 Δείκτες απόδοσης.....	15
1.4 Αξιοπιστία ή Ευπάθεια	16
1.5 Παράμετροι αξιοπιστίας.....	16
1.5.1 Τρόποι αύξησης της αξιοπιστίας	17
Κεφάλαιο 2.....	20
Διαχείριση περιουσιακών στοιχείων.....	20
2.1 Ορισμοί.....	20
2.1.1 Γενικά	20
2.1.2 Στη μηχανική	20
2.1.3 Διαχείριση περιουσιακών στοιχείων-υποδομών	20
2.2 Αστοχία περιουσιακών στοιχείων	21
2.3 Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού με βάση το κόστος	21
2.4 Επιδείνωση των αγωγών	22
2.4.1 Είδη της επιδείνωσης των αγωγών	22
2.5 Στρατηγική διαχείριση περιουσιακών στοιχείων	22
2.6 Bayesian approach.....	23
2.6.1 Ορισμός	23
2.6.2 Η μέθοδος.....	23
2.7 Βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης.....	24
Κεφάλαιο 3.....	25
Αστοχίες στα υδροδοτικά συστήματα.....	25
3.1 Είδη αστοχιών	25
3.2 Μοντέλα αστοχιών	25
3.2.1 Εφαρμογές μοντέλων αστοχιών	25
3.3 Ανάλυση επιβίωσης.....	26
3.4 Ανάλυση παλινδρόμησης	27

3.5 Λογοκρισία	27
3.6 Τρία σενάρια με διαφορετικές διαθεσιμότητες δεδομένων	28
3.6.1 Right censoring - Left truncation- selective survival bias	28
3.7 Μοντέλο αστοχίας αγωγών – Μοντέλο αντικατάστασης	29
3.8 Λειτουργία των δικτύων διανομής νερού	30
3.9 Δείκτες αξιοπιστίας	30
3.10 Μηχανική αστοχία	31
3.11 Data-Driven Methods (DDM)	31
3.12 Ποσοστό αποτυχίας	31
3.12.1 Μοντέλα του ποσοστού αποτυχίας	32
3.13 Στατιστικές μέθοδοι για την πρόβλεψη των θραύσεων των δικτύων ύδρευσης	33
3.13.1 Bathhtubcurve	33
3.13.2 Στατιστικές μέθοδοι	35
3.13.3 Ντετερμινιστικά Μοντέλα	35
Κεφάλαιο 4	38
Η Ύδρευση της Αθήνας	38
4.1 Ιστορική αναδρομή ύδρευσης Αθήνας	38
4.1.1 Από την αρχαιότητα έως την τουρκοκρατία	38
4.1.2 1833 - 1925	38
4.1.3 1925 – Σήμερα	39
4.2 Γενικά για το υδrosύστημα της Αθήνας	40
4.2.1 Ταμειυτήρας Μόρνου	40
4.2.2 Ταμειυτήρας Ευήνου	41
4.2.3 Ταμειυτήρας Μαραθώνα	42
4.2.4 Ταμειυτήρας Υλίκης	43
4.3 Μονάδες Επεξεργασίας Νερού (ΜΕΝ)	44
4.3.1 ΜΕΝ Γαλασίου	45
4.3.2 ΜΕΝ Αχαρνών	45
4.3.3 ΜΕΝ Πολυδενδρίου	45
4.3.4 ΜΕΝ Ασπρόπυργου	45
4.4 Τα δύο κύρια συστήματα	46
4.4.1 Βόρειο σύστημα	46
4.4.2 Νότιο σύστημα	46
4.5 Οι διαρροές νερού του συστήματος	46
Κεφάλαιο 5	47
UWOT	47

5.1 Γενικά	47
5.2 Πιο αναλυτικά	47
5.3 Στόχος	49
5.4 Περιγραφή δικτύου ύδρευσης μέσω UWOT	49
5.5 Προσομοίωση	51
5.5.1 Η έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης.....	51
5.5.2 Όρια στοχαστικής προσομοίωσης	51
5.6 Αξιοπιστία συστήματος ως προς τη διαθεσιμότητα πόρων	52
5.7 Σενάρια αστοχίας	56
5.8 Μελέτη απομείωσης αξιοπιστίας λόγω αστοχιών στα εξωτερικά υδραγωγεία.....	61
5.9 Excel-UWOT.....	64
5.10 Οι μέρες που επήλθε αστοχία στο Μόρνο.	74
5.10.1 Για το Evinos-Mornos tunnel	74
5.10.2 Για το Marathon-Helidonou.....	75
Περιγραφή των αποτελεσμάτων του UWOT-Συμπεράσματα	77
Σενάρια αστοχίας	77
Μελέτη απομείωσης αξιοπιστίας λόγω αστοχιών στα εξωτερικά υδραγωγεία.....	83
Παράρτημα Α	84
Συνοπτικοί πίνακες.....	84
Ορισμοί - Προσεγγίσεις	84
Επιδείνωση αγωγών	85
Bathtub curve	85
Είδη αστοχίας	86
Ποσοστό αποτυχίας	86
Ντετερμινιστικά μοντέλα	87
Παράρτημα Β	88
Φωτογραφικό Υλικό	88
Βιβλιογραφία	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.Ενδεικτικές τιμές των αποθεμάτων νερού των τριών ταμιευτήρων από την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης.....	53
Πίνακας 2. Τιμές των αποθεμάτων των τριών ταμιευτήρων για τιμές αποθέματος του Μόρνου μετά τις μηδενικές.....	62
Πίνακας 3. Οι μέρες κατά τις οποίες ο ταμιευτήρας του Μόρνου έχει μηδενικές τιμές αποθέματος νερού.....	72
Πίνακας 4. Οι χαμηλότερες τιμές των 100 χρόνων (αμέσως μετά τις μηδενικές) του αποθέματος του ταμιευτήρα του Μόρνου.....	73
Πίνακας 5. Οι συνολικές μέρες που επήλθε αστοχία στον ταμιευτήρα του Μόρνου, για κάθε μια μέρα στην οποία παρατηρήθηκε χαμηλή τιμή αποθέματος αυτού-Βλάβη στο Evinos-Mornos tunnel.....	74
Πίνακας 6. Οι συνολικές μέρες που επήλθε αστοχία στον ταμιευτήρα του Μόρνου, για κάθε μια μέρα στην οποία παρατηρήθηκε χαμηλή τιμή αποθέματος αυτού-Βλάβη στο Marathon-Helidonou.....	75
Πίνακας. Αστοχία στο στοιχείο του συστήματος Μάνδρα-Μενίδι για βλάβη του στοιχείου Marathon-Helidonou.....	65
Πίνακας. Αστοχία στο στοιχείο του συστήματος Μόρνος για βλάβη του στοιχείου Marathon-Helidonou.....	66
Πίνακας. Αστοχία στο στοιχείο του συστήματος Μόρνος για βλάβη του στοιχείου Marathon-connecting 2.....	67
Πίνακας. Αστοχία στο στοιχείο του συστήματος Μόρνος για βλάβη του στοιχείου Manrosounala.....	68
Πίνακας. Αστοχία στο στοιχείο του συστήματος Μόρνος για βλάβη του στοιχείου Yliki-Ougra.....	69
Πίνακας. Αστοχία στο στοιχείο του συστήματος Μόρνος για βλάβη του στοιχείου Distomo connecting.....	70

Πίνακας. Αστοχία στο στοιχείο του συστήματος Μόρνος για βλάβη του στοιχείου Evinos-Mornos tunnel.....	71
---	----

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Η καμπύλη “bathtubcurve” του κύκλου ζωής ενός θαμμένου αγωγού.....	34
Σχήμα 2. Στοιχείο του UWOT :Marathon-Helidonου.....	58
Σχήμα 3. Στοιχείο του UWOT :Marathon-connecting 2.....	58
Σχήμα 4. Στοιχείο του UWOT :Mavrosouvala.....	59
Σχήμα 5. Στοιχείο του UWOT :Yliki-Ougra.....	59
Σχήμα 6. Στοιχείο του UWOT :Distomo connecting.....	60
Σχήμα 7. Στοιχείο του UWOT :Evinos-Mornos tunnel.....	60

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Ο ταμιευτήρας του Μόρνου.....	40
Εικόνα 2. Το φράγμα του Μόρνου.....	40
Εικόνα 3. Η Σήραγγα Ευήνου-Μόρνου.....	42
Εικόνα 4. Ο ταμιευτήρας του Ευήνου.....	42
Εικόνα 5. Ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα.....	43
Εικόνα 6. Ο ταμιευτήρας της Υλίκης.....	43
Εικόνα 7. Το πλωτό αντλιοστάσιο της Υλίκης.....	44
Εικόνα 8. Οι 4 Μονάδες Επεξεργασίας Νερού στο Λεκανοπέδιο της Αττικής.....	46
Εικόνα 9. Το υδραγωγείο του Μόρνου, στο ύψος του χωριού Πρόδρομος, στη Βοιωτία.....	50
Εικόνα 10. Το υδραγωγείο του Μόρνου.....	50

Εισαγωγή

Η ευαισθητοποίηση σχετικά με την ανάγκη για μακροπρόθεσμο σχεδιασμό αποκατάστασης της γήρανσης των υποδομών νερού, έχει αυξηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών. Το δίκτυο υποδομών νερού τα τελευταία χρόνια έχει αυξήσει την ενασχόληση και την πρόκληση από πλευράς των διαχειριστών χρήσης νερού ως προς την αξιολόγηση και αντιμετώπιση του μακροπρόθεσμου σχεδιασμού αποκατάστασης και ανάπτυξης του δικτύου αποκατάστασης της ζήτησης. Επομένως, η διαχείριση των υδάτινων υποδομών έχει δει ιδιαίτερη αύξηση στην ανάπτυξη, δοκιμή και εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων στον σχεδιασμό αποκατάστασης και εκτίμησης αστοχιών του δικτύου ύδρευσης. Καθώς τα δίκτυα διανομής νερού επιδεινώνονται τόσο δομικά όσο και λειτουργικά, τα ποσοστά θραύσης τους αυξάνονται, η υδραυλική ικανότητα του δικτύου μειώνεται, ενώ και η ποιότητα του νερού στο σύστημα διανομής μπορεί να φθίνει. Για τον σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια προτεραιότητας προληπτικής συντήρησης, τα οποία εξαρτώνται από το επίπεδο απόδοσης του συστήματος. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κριτήριο προτεραιότητας στην προληπτική συντήρηση είναι αυτό της αξιοπιστίας, το οποίο αναφέρεται στην πιθανότητα καμία αστοχία του συστήματος να μη συμβεί μέσα σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Η εξασφάλιση της καλής αξιοπιστίας βασίζεται στην αρχική σχεδίαση, η οποία στην συνέχεια μπορεί να βελτιωθεί με κατάλληλες τροποποιήσεις και ελέγχεται με τους κατάλληλους δείκτες αξιοπιστίας, που χρησιμοποιούνται για να αξιολογούν την αποδοτικότητα των δικτύων διανομής νερού στο να παρέχουν νερό με την καθορισμένη ποιότητα, επαρκή ποσότητα και μέσα στο κατάλληλο εύρος πίεσης στους καταναλωτές κάτω από διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις (κανονικές ή αντικανονικές), όπως είναι η αστοχία των εξαρτημάτων ή και οι υδραυλικές μεταβολές.

Έτσι λοιπόν, ώστε να διατηρηθεί αυτή η επιθυμητή αξιοπιστία στο σύστημα, είναι απαραίτητη η καλή γνώση για την αναμενόμενη ωφέλιμη ζωή και κατάσταση των αγωγών που απαρτίζουν το σύστημα, γι' αυτό και γίνεται αναφορά σε διάφορα μοντέλα πρόβλεψης αστοχιών των υποδομών και κυρίως σε θραύσεις αγωγών, που μπορούν να προβλέψουν το μελλοντικό ποσοστό θραύσης των αγωγών και την πιθανότητα θραύσης αυτών.

Στην παρούσα εργασία, ο στόχος ήταν ο υπολογισμός του επιπέδου αξιοπιστίας του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας και των κανόνων λειτουργίας αυτού, συνεκτιμώντας ταυτόχρονα την πιθανότητα αστοχίας βασικών στοιχείων του υδραγωγείου. Έτσι, αφού με στοχαστική προσομοίωση και εισαγωγή συνθετικών χρονοσειρών στο UWOT - το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των αποτελεσμάτων - βρήκαμε για 100 χρόνια σε καθημερινή βάση τα αποθέματα νερού στους ταμιευτήρες που υδροδοτούν την Αθήνα, θεωρώντας στην συνέχεια βλάβη σε συγκεκριμένα δομικά στοιχεία του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, υπολογίσαμε αν επέρχεται αστοχία σε κάποια από τα άλλα στοιχεία του συστήματος, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει αποτυχία κάλυψης της ζήτησης, καθώς επίσης και πόσες μέρες παρατηρείται αυτή η αστοχία ή και ποιες μέρες παρατηρείται, καθώς και το έλλειμμα νερού την κάθε μια από αυτές, που δημιουργεί πρόβλημα στην κάλυψη της ζήτησης.

Κεφάλαιο 1

Αξιοπιστία

1.1 Ορισμοί

Ο προσδιορισμός της αξιοπιστίας ενός δικτύου ύδρευσης αποτελεί ένα σημαντικό και χρήσιμο εργαλείο, που εξασφαλίζει ότι το σύστημα είναι οικονομικά αποδοτικό και συγχρόνως αξιόπιστο και προς ικανοποίηση των άμεσα ενδιαφερόμενων. Δηλαδή η αξιοπιστία αποτελεί ένα μέτρο εκτίμησης του βαθμού επιτυχίας και αποδοτικότητας ενός συστήματος, που έχει συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και διάρκεια αποστολής. Σύμφωνα με τον Goutler (1995) αξιοπιστία ενός δικτύου ύδρευσης είναι η ικανότητα του δικτύου να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε νερό για τις οποίες μελετήθηκε, τόσο ως προς την ποσότητα νερού, παροχές και συνολικός όγκος, όσο και προς το εύρος των πιέσεων στις οποίες αυτό πρέπει να λειτουργεί. Σαν επέκταση του ορισμού αυτού μπορεί να θεωρηθεί αυτός που διατυπώθηκε το 1992 από τους Cullinane *et al.*, σύμφωνα με τον οποίο αξιοπιστία ενός δικτύου ύδρευσης είναι η ικανότητα του δικτύου να παρέχει τις υπηρεσίες του σε ένα αποδεκτό επίπεδο διακοπών, παρά τις μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας του.

1.2 Προληπτική συντήρηση

Η αξιοπιστία μεταξύ των δικτύων ύδρευσης είναι διαφορετική και οφείλεται στους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους κάθε ένα σχεδιάζεται. Η εξασφάλιση της καλής αξιοπιστίας βασίζεται στην αρχική σχεδίαση, η οποία στην συνέχεια μπορεί να βελτιωθεί με κατάλληλες τροποποιήσεις. Αφού λοιπόν γίνουν όλες οι δυνατές προσπάθειες ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη αξιοπιστία στο στάδιο της αρχικής σχεδίασης, αν στην συνέχεια κριθεί αναγκαίο, εισάγεται στο σύστημα κατάλληλο πλεόνασμα ώστε παρά τις όποιες βλάβες προκύψουν, αυτό να συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά και να διατηρεί την αξιοπιστία στο επιθυμητό επίπεδο.

Στα δίκτυα ύδρευσης λοιπόν και κυρίως σε αυτά που αναφέρονται στα μεγάλα αστικά κέντρα, όπου η συνεχής και αδιάκοπη λειτουργία τους είναι αδιαπραγμάτευτη, είναι επιτακτικό να γίνονται συνεχείς έλεγχοι και να παρέχονται

εναλλακτικές εφεδρικές λύσεις, που μπορούν να διασφαλίσουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου για όση ώρα γίνεται η αντικατάσταση ή οι εργασίες συντήρησης. Επομένως ο σωστός σχεδιασμός και η προληπτική συντήρηση του δικτύου έχουν σαν στόχο την ευστάθεια και τη μακροζωία αυτού. Ωστόσο, η υπερβολική συντήρηση συνήθως μειώνει την αξιοπιστία, ενώ αντίθετα η έλλειψη αυτής, εκτός του ότι μειώνει την αξιοπιστία, μειώνει ταυτόχρονα και τη διάρκεια ζωής του έργου.

1.3 Κριτήριοπροτεραιότητας προληπτικής συντήρησης

Ένα από τα πιο κρίσιμα καθήκοντα για κάθε εταιρεία ύδρευσης είναι να σχεδιάσει την κατάλληλη προληπτική πολιτική συντήρησης για το σύστημα παροχής νερού που είναι υπεύθυνη. Οι σημαντικότερες δράσεις κατά τη διάρκεια της συντήρησης του συστήματος είναι οι περιοδικές επιθεωρήσεις των αγωγών ύδρευσης και άλλων συσκευών δικτύου, προκειμένου να διαπιστωθούν τυχόν πιθανά προβλήματα που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την ομαλή λειτουργία του. Δυστυχώς, οι οικονομικές περικοπές κάνουν συνήθως αυτό το είδος των ελέγχων έναν αδύνατο στόχο να επιτευχθεί. Επιπλέον, οι περιορισμοί του χρόνου, λόγω της ανεπαρκούς χωρητικότητας των δεξαμενών νερού, δεν επιτρέπουν προσωρινές διακοπές του εφοδιασμού, που είναι απαραίτητες για τις επισκευές. Αν και αυτά τα εμπόδια μπορεί να οδηγήσουν σε μη ευέλικτες συνθήκες λειτουργίας, ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει ιεραρχικά να αναλύσει όλες τις πιθανές θέσεις συντήρησης του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα και τις μελλοντικές συνθήκες λειτουργίας του.

1.3.1 Δείκτες απόδοσης

Για τον σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια προτεραιότητας προληπτικής συντήρησης, τα οποία εξαρτώνται από το επίπεδο απόδοσης του συστήματος. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να ποσοτικοποιηθούν με τη χρήση κατάλληλων δεικτών απόδοσης, όπως το ποσοστό της χρήσης, ο βαθμός και η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών, η ταχύτητα της αντίδρασης (response), η αξιοπιστία, η διαθεσιμότητα, οι επιδιορθώσεις, η ανθεκτικότητα, η ευπάθεια, η βιωσιμότητα και ο κίνδυνος μηχανικής (engineering risk) (Κανακούδης, 1998).

1.3.1.1 Αξιοπιστία

Από όλους τους παραπάνω δείκτες απόδοσης, η αξιοπιστία είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κριτήριο προτεραιότητας στην προληπτική συντήρηση, το οποίο αναφέρεται στην πιθανότητα καμία αστοχία του συστήματος να μη συμβεί μέσα σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Ο κύριος στόχος οποιασδήποτε προληπτικής συντήρησης συστήματος ύδρευσης είναι να αποφευχθεί κάθε κατάρρευση συστήματος μείζονος σημασίας και να αναβληθεί η ανάγκη για αντικατάσταση του κεντρικού δικτύου ή άλλων συσκευών. Δυστυχώς, η εμπειρία έχει δείξει ότι όταν ο υπεύθυνος (decision maker) υιοθετεί την ανάλυση του συστήματος παροχής νερού με βάση την αξιοπιστία, ένας μεγάλος κίνδυνος караδοκεί, αφού κάθε φορά που ένα σύστημα είναι εξαιρετικά αξιόπιστο, την ίδια στιγμή είναι εξαιρετικά ευάλωτο. Αυτό προκύπτει από το γεγονός, ότι εφόσον η πιθανότητα τυχόν εμφάνισης αστοχίας ελαχιστοποιείται, το μέγεθος των αστοχιών που μπορεί να συμβούν είναι εξαιρετικά αυξημένο (Κανακούδης, 1998).

1.4 Αξιοπιστία ή Ευπάθεια

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών οι διαχειριστές του συστήματος νερού, προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το εξαιρετικά κρίσιμο δίλημμα (αξιόπιστα έναντι ευάλωτων συστημάτων) επικέντρωσαν τις προσπάθειές τους στο να διατηρήσουν τυχόν συνέπειες της βλάβης του συστήματος σε αποδεκτά επίπεδα, αντί να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα εμφάνισης οποιασδήποτε βλάβης. Αυτή είναι η βασική αρχή σήμερα, η επικρατούσα δηλαδή τάση των υδατικών συστημάτων διαχείρισης, όπου σύμφωνα με τον Κανακούδη(1998), ο κύριος στόχος του κάθε διαχειριστή του συστήματος νερού πρέπει να είναι, να το διατηρεί ασφαλές κατά τη διάρκεια της αστοχίας (safe-fail), παρά να προσπαθεί να επιτύχει ένα σύστημα χωρίς βλάβες (fail-safe).

1.5 Παράμετροι αξιοπιστίας

Σύμφωνα με τους Riham Ezzeldin *et al.*, (2008) η εξέλιξη της αξιοπιστίας των συστημάτων διανομής νερού είναι ιδιαίτερα περίπλοκη καθώς η αξιοπιστία εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως οι αστοχίες των στοιχείων των υποδομών του συστήματος, όπως είναι τα ποσοστά αποτυχίας των αντλιών τροφοδοσίας, η χωρητικότητα των αγωγών μεταφοράς της ροής, οι θραύσεις των

σωλήνων και οι αστοχίες των βαλβίδων, τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας που επηρεάζουν την ικανότητα ροής των διαφόρων συνδέσεων του δικτύου διανομής, καθώς και οι διακοπές ρεύματος, αλλά και παράμετροι που δεν σχετίζονται με τις υποδομές, όπως είναι η ποιότητα και η ποσότητα του διαθέσιμου στην πηγή νερού, η διακύμανση σε ημερήσιες, εβδομαδιαίες και εποχιακές ανάγκες, καθώς και η αύξηση της ζήτησης κατά τη διάρκεια των ετών.

1.5.1 Τρόποι αύξησης της αξιοπιστίας

Οι τρόποι για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος ύδρευσης, με όποιον τρόπο και αν επέρχεται αστοχία σε αυτό, είναι παρόμοιοι. Προφανώς, τα μεγαλύτερα σε μέγεθος εξαρτήματα θα παρέχουν μεγαλύτερη ικανότητα ροής στο δίκτυο και επομένως μειώνουν την πιθανότητα ότι η ζήτηση θα υπερβεί την παροχή σχεδιασμού. Επιπλέον, τα ποσοστά θραύσης σωλήνων στα υπάρχοντα δίκτυα ύδρευσης σχετίζονται άμεσα με τη διάμετρο (η θραύση των σωλήνων μεγάλης διαμέτρου δεν είναι τόσο συχνή όσο των σωλήνων μικρής διαμέτρου)(Walski, 1993). Κατά συνέπεια, η επιλογή σωλήνων με μεγάλη διάμετρο μπορεί να μειώσει την πιθανότητα της αστοχίας των εξαρτημάτων, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται το μέτρο αξιοπιστίας, που βασίζεται στην απαιτούμενη ροή.

1.5.1.1 Μέτρα βελτίωσης

1.5.1.1.1 Υλικά αγωγών

Ο μεγάλος αριθμός διαθέσιμων υλικών που υπάρχει στο εμπόριο και οι διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες στις κατά τόπους περιοχές μπορούν να περιπλέξουν την επιλογή του υλικού των αγωγών. Συγκεκριμένα, το υλικό των αγωγών πρέπει να είναι κατάλληλο για τις συνθήκες του χώρου τοποθέτησης και ανθεκτικό στα εσωτερικά και εξωτερικά φορτία, τα οποία αυτό δέχεται. Τα περισσότερα υλικά αγωγών μπορούν να αποδώσουν κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες και συνεπώς, το κόστος είναι αυτό που καθορίζει την επιλογή τους σε συνδυασμό με την ευκολία συντήρησης και την ιστορική καταγραφή της απόδοσης τους στην συγκεκριμένη χρήση.

Η πίεση λειτουργίας του αγωγού είναι εκείνη που καθορίζει το πάχος του και συνεπώς, επέκταση της αντοχής του στις θραύσεις. Σε περιοχές, λοιπόν, που ο αγωγός θα υποβληθεί σε εξαιρετικά μεγάλα φορτία και ο αντίκτυπος μιας αποτυχίας θα είναι μεγάλος, όπως π.χ. δίπλα στους υπόγειους σταθμούς του μετρό, το πρόσθετο κόστος ενός σωλήνα με μεγαλύτερο πάχος τοιχωμάτων μπορεί να δικαιολογηθεί σχετικά με ευκολία.

Η αποφυγή βλάβης σε ένα αγωγό από τυχαία επαφή κατά τη διάρκεια μιας εκσκαφής καθιστά τους μεταλλικούς σωλήνες πιο κατάλληλους. Σημειώνεται ότι είναι δυσκολότερο να επισκευαστούν σε περίπτωση βλάβης οι σύνθετοι σωλήνες, όπως οι αγωγοί από σκυρόδεμα ή fiberglass, από ότι οι σωλήνες που γίνονται από ένα ομοιογενές υλικό, όπως π.χ. είναι ο χυτοσίδηρος ή το PVC(Walski,1993).

1.5.1.1.2 Διατομή αγωγών

Έχει διαπιστωθεί ότι η διατομή των αγωγών έχει επιπτώσεις στην αξιοπιστία ενός δικτύου ύδρευσης. Συγκεκριμένα, οι αγωγοί με μεγαλύτερη διάμετρο από την ελάχιστη απαιτούμενη παρέχουν επιπλέον αξιοπιστία, επειδή έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν περισσότερο νερό για να ικανοποιηθεί η ζήτηση σε περίπτωση που κάποιος άλλος γειτονικός αγωγός έχει υποστεί βλάβη. Επιπλέον, επειδή οι βλάβες στους περισσότερους αγωγούς οφείλονται σε θραύση, είναι προτιμότεροι οι αγωγοί μεγάλης διαμέτρου, γιατί παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από ότι οι αγωγοί μικρότερης διαμέτρου (Walski,1993). Όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις η αύξηση του κόστους δεν μπορεί να δικαιολογηθεί, εάν ήδη έχει γίνει η επιλογή διαμέτρου, αποκλειστικά και μόνο για την αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου. Γι' αυτό το λόγο ο μηχανικός που κάνει τον σχεδιασμό πρέπει να ελέγξει και σοφά να αποφανθεί αν πρέπει να τοποθετηθεί πιο παχύς αγωγός ,δηλαδή αν πρέπει να μπει πχ αγωγός από χυτοσίδηρο κλάσης 54 και όχι κλάσης 50, ώστε να αυξηθεί ουσιαστικά η αντίσταση του αγωγού και παρά το μικρό επιπλέον αρχικό κόστος να εξασφαλισθεί η αρτιότητα του αγωγού με τη μείωση της πιθανότητας θραύσης του. Βέβαια, δεν είναι δυνατόν στην παρούσα κατάσταση να εντοπισθεί η μείωση των ποσοστών αστοχιών με την αύξηση του πάχους των αγωγών, καθώς οι διαχειριστές των υδατικών συστημάτων δεν διατηρούν τέτοιο ιστορικό.

1.5.1.1.3 Κλειστό δίκτυο ύδρευσης

Σε κάθε δίκτυο ύδρευσης συχνά απαιτείται η διακοπή της λειτουργίας του, καθώς παρατηρούνται αστοχίες στους αγωγούς από θραύσεις ή για λόγους συντήρησης του. Ο αριθμός των καταναλωτών που θα επηρεάζονται από τις διακοπές αυτές και η δυνατότητα παροχής νερού σε κάποιους χρήστες παρά την απομόνωση ενός τμήματος του δικτύου εξαρτάται από την ύπαρξη βρόχων και εναλλακτικών παράλληλων διαδρομών, καθώς και από τις θέσεις και τον αριθμό των εγκατεστημένων βανών λειτουργίας στο δίκτυο. Έτσι λοιπόν, εάν το δίκτυο είναι σχεδιασμένο σωστά, με αγωγούς ικανοποιητικής διαμέτρου και ικανοποιητικό αριθμό βανών, η αστοχία ενός τμήματος του δικτύου δεν θα έχει σοβαρές επιπτώσεις για τους περισσότερους καταναλωτές.

1.5.1.1.4 Βάνες λειτουργίας (έλεγχου)

Οι βάνες λειτουργίας επιτρέπουν στο προσωπικό της εταιρείας ύδρευσης να απομονώνει επιμέρους τμήματα του δικτύου, τα οποία παρουσιάζουν πρόβλημα. Πρέπει λοιπόν, να τοποθετούνται αυτές κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μη χρειάζονται παραπάνω βάνες για την απομόνωση ενός τμήματος του δικτύου.

Στην περίπτωση που ένας αγωγός μεγάλης διαμέτρου διασταυρώνεται με έναν αγωγό μικρής διαμέτρου, θεωρείται πιο αποτελεσματικό να τοποθετηθούν δύο βάνες στον αγωγό μικρής διαμέτρου και καμία βάνα στον αγωγό μεγάλης διαμέτρου στα κατάντη της διασταύρωσης. Βάνες πρέπει να τοποθετούνται επίσης, σε κάθε πυροσβεστικό κρουνό και σε κάθε σημαντική υπηρεσία του δικτύου. Οι βάνες αυτές πρέπει να τοποθετούνται όσο πιο κοντά γίνεται στον κύριο αγωγό.

Οι βάνες λειτουργίας σε ένα δίκτυο ύδρευσης πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση μικρότερη των 150m η μία από την άλλη σε βιομηχανικές περιοχές και 250m στο υπόλοιπο δίκτυο. Επίσης, ενδείκνυται η τοποθέτηση βανών στα άκρα κάθε οικοδομικού τετραγώνου, ώστε σε περίπτωση επισκευής ενός αγωγού να μην παρέχεται νερό μόνο σε ένα οικοδομικό τετράγωνο. Στην περίπτωση αυτή είναι προφανές ότι αυξάνεται σημαντικά το κόστος του δικτύου. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερο να τοποθετούνται βάνες ανά 2 – 4 οικοδομικά τετράγωνα, ώστε η κατασκευή ενός δικτύου ύδρευσης να είναι οικονομικότερη.

Κεφάλαιο 2

Διαχείριση περιουσιακών στοιχείων

2.1 Ορισμοί

2.1.1 Γενικά

Ο όρος διαχείριση περιουσιακών στοιχείων (asset management), με την ευρεία έννοια, αναφέρεται σε οποιοδήποτε σύστημα που παρακολουθεί και διατηρεί τα πράγματα που έχουν αξία για μια οντότητα ή ομάδα. Αυτό μπορεί να ισχύει τόσο για υλικά περιουσιακά στοιχεία, όπως κτίρια όσο και για τα άυλα περιουσιακά στοιχεία, όπως το ανθρώπινο κεφάλαιο, την πνευματική ιδιοκτησία και την υπεραξία και τα χρηματοοικονομικά περιουσιακά στοιχεία. Η διαχείριση περιουσιακών στοιχείων είναι μια συστηματική διαδικασία της ανάπτυξης, λειτουργίας, συντήρησης, αναβάθμισης και οικονομικά αποδοτικού τρόπου διάθεσης των περιουσιακών στοιχείων.

2.1.2 Στη μηχανική

Πιο συγκεκριμένα στον τομέα της μηχανικής, σαν asset management θεωρείται η πρακτική της διαχείρισης των περιουσιακών στοιχείων για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, ιδιαίτερα χρήσιμο για στοιχεία όπως είναι οι εγκαταστάσεις και εξοπλισμός, καθώς και η διαδικασία των συστημάτων παρακολούθησης και συντήρησης εγκαταστάσεων, με στόχο την παροχή της καλύτερης δυνατής εξυπηρέτησης των χρηστών, κατάλληλη για δημόσιες υποδομές, όπως είναι τα δίκτυα διανομής νερού στους καταναλωτές.

2.1.3 Διαχείριση περιουσιακών στοιχείων-υποδομών

Η διαχείριση περιουσιακών στοιχείων-υποδομών (infrastructure asset management) αποτελεί την από κοινού συμμετοχή της διαχείρισης, της οικονομίας, της μηχανικής και άλλων τομέων που εφαρμόζονται σε περιουσιακά στοιχεία με στόχο την παροχή του απαιτούμενου επιπέδου της υπηρεσίας με τον πιο αποδοτικό τρόπο. Περιλαμβάνει τη διαχείριση ολόκληρου του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένων του σχεδιασμού, της κατασκευής, της θέσης σε λειτουργία, της λειτουργίας, της

συντήρησης, της επισκευής, της τροποποίησης, της αντικατάστασης και της λήξης της λειτουργίας-διάθεσης των περιουσιακών στοιχείων.

2.2 Αστοχία περιουσιακών στοιχείων

Οι αστοχίες των υποδομών του συστήματος και κυρίως οι θραύσεις των αγωγών, θεωρούνται ως ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που οδηγούν σε απώλειες νερού. Οι αστοχίες των αγωγών επιβάλλουν τεράστιες άμεσες και έμμεσες οικονομικές απώλειες και απαιτείται ανθρώπινο κεφάλαιο για την αποκατάσταση και επισκευή του δικτύου. Η γήρανση των υποδομών του συστήματος διανομής νερού μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες των στοιχείων που το αποτελούν, δηλαδή σε αύξηση των διαρροών και των θραύσεων, αλλά και σε υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και μείωση της υδραυλικής παραγωγικής ικανότητας. Τα προβλήματα αυτά προκαλούν πολλές αρχές του νερού να αναλάβουν δαπανηρά κεφαλαιακά προγράμματα βελτίωσης, που θα οδηγήσουν σε αποδοτικούς μηχανισμούς αποκατάστασης και αντικατάστασης για τα συστήματα διανομής νερού, ώστε να ανταποκριθούν στην ανάπτυξη και τις κανονιστικές απαιτήσεις.

2.3 Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού με βάση το κόστος

Ωστόσο, μέσα στα κεφαλαιακά έξοδα (*capitalexpenditure*) – μην ξεχνάμε ότι τα δίκτυα ύδρευσης συνήθως σχεδιάζονται με βάση το κόστος κεφαλαίου (*capitalcost*), που είναι το συνολικό κόστος που απαιτείται για να έρθει ένα project σε κατάσταση λειτουργίας - μπορεί να υπάρξει κάποια βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, σε μια προσπάθεια να μειωθεί το κόστος λειτουργίας ή να απαιτηθεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ώστε να αποκατασταθεί κάποια ζημιά στο δίκτυο, κάτι που θα έχει εξοικονόμηση κόστους. Ακόμα και μικρή αύξηση του αρχικού κόστους για σκοπούς βελτιστοποίησης του σχεδιασμού θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση των δαπανών λειτουργίας αλλά και βελτίωση των παροχών. Μια τέτοια μελέτη θα αποτελούσε ένα περίπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης, καθώς οι βελτιώσεις που δύνανται να γίνουν περιλαμβάνουν πολλαπλές μετρήσεις των επιδόσεων και το πιο σημαντικό, ότι οι στόχοι θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα. Ωστόσο, η βέλτιστη απόδοση σύμφωνα με έναν στόχο, συνήθως υποδηλώνει χαμηλή απόδοση σε άλλους στόχους (R. Farmani *et al.*, 2006).

2.4 Επιδείνωση των αγωγών

Η επιδείνωση (deterioration) των υποδομών ύδρευσης στα συστήματα διανομής νερού αποτελεί μια σημαντική ανησυχία για τους χρήστες νερού ανά τον κόσμο. Οι αστοχίες των υποδομών των δικτύων ύδρευσης, επηρεάζουν άλλες κοντινές υφιστάμενες υποδομές, όπως τα πεζοδρόμια, τους δρόμους, τα δίκτυα ομβρίων και αποχέτευσης και φυσικού αερίου, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικές αποτυχίες.

Καθώς τα δίκτυα ύδρευσης επιδεινώνονται τόσο δομικά όσο και λειτουργικά, τα ποσοστά θραύσης τους αυξάνονται, η υδραυλική ικανότητα του δικτύου μειώνεται, ενώ και η ποιότητα του νερού στο σύστημα διανομής μπορεί να φθίνει. Οι ανεπαρκείς πόροι κεφαλαίου καθιστούν απαραίτητη για τους σχεδιαστές και τους λήπτες αποφάσεων να αναζητήσουν την καλύτερη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας για την στρατηγική της αποκατάστασης και της ανανέωσης (rehabilitation and renewal strategy). Η ιδανική στρατηγική θα πρέπει να αξιοποιεί το πλήρες εύρος της ωφέλιμης ζωής του κάθε σωλήνα, ενώ ταυτόχρονα να αντιμετωπίζει τα ζητήματα της ασφάλειας, της αξιοπιστίας, της ποιότητας του νερού και της οικονομικής αποτελεσματικότητας.

2.4.1 Είδη της επιδείνωσης των αγωγών

Η επιδείνωση των σωλήνων μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι η δομική επιδείνωση, η οποία μειώνει στους σωλήνες τη δομική ανθεκτικότητα και την ικανότητά τους να αντέχουν τα διάφορα είδη των τάσεων που τους επιβάλλονται. Η δεύτερη είναι η επιδείνωση της εσωτερικής επιφάνειας των σωλήνων, με αποτέλεσμα τη μειωμένη υδραυλική ικανότητα, την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και τη μείωση της δομικής ανθεκτικότητας σε περιπτώσεις σοβαρής εσωτερικής διάβρωσης. Και οι δύο κατηγορίες επιδείνωσης συμβάλλουν, ώστε να μειώνεται η αξιοπιστία του δικτύου διανομής.

2.5 Στρατηγική διαχείριση περιουσιακών στοιχείων

Το δίκτυο υποδομών νερού τα τελευταία χρόνια έχει αυξήσει την ενασχόληση και την πρόκληση από πλευράς των διαχειριστών χρήσης νερού και κυρίως έχει πέσει το βάρος στην αξιολόγηση και αντιμετώπιση του μακροπρόθεσμου σχεδιασμού αποκατάστασης και ανάπτυξης του δικτύου αποκατάστασης της ζήτησης.

Επομένως, η διαχείριση των υδάτινων υποδομών έχει δει ιδιαίτερη αύξηση στην ανάπτυξη, δοκιμή και εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων στον σχεδιασμό αποκατάστασης και εκτίμησης αστοχιών του δικτύου ύδρευσης. Για να συγκρίνουμε τις επιλογές αποκατάστασης των δικτύων νερού, απαιτείται καλή γνώση για την αναμενόμενη ωφέλιμη ζωή και κατάσταση των αγωγών. Τα πιθανοτικά μοντέλα εκτίμησης των αστοχιών των αγωγών που εξαρτώνται από την ηλικία του αγωγού ποικίλουν, ενώ αντίθετα δεν υπάρχουν πολλές μελέτες που να βασίζονται σε άλλες παραμέτρους, όπως το μήκος και η διάμετρος του αγωγού.

Ενώ υπάρχει καλή εφαρμογή σε μεγάλα δίκτυα νερού, η βαθμονόμηση στις τοπικές συνθήκες είναι πολλές φορές ανέφικτη στα μικρομεσαία δίκτυα, εξαιτίας της υψηλής ζήτησης σε δεδομένα. Το πρόβλημα στα μικρομεσαία αυτά δίκτυα και οι περιορισμένες καταγραφές αστοχιών στη βαθμονόμηση των μοντέλων αστοχίας αγωγών, μπορεί να ξεπεραστεί με την Μπαγιεσιανή συμπερασματολογία (Bayesian inference).

2.6 Bayesian approach

2.6.1 Ορισμός

Η Μπαγιεσιανή συμπερασματολογία (Bayesian inference) είναι μια μέθοδος στατιστικής συμπερασματολογίας (inference) στην οποία το θεώρημα του Baye's χρησιμοποιείται για να αναβαθμίσει την πιθανότητα για μια υπόθεση που έχει γίνει αρχικά, καθώς η απόδειξη αποκτάται.

2.6.2 Η μέθοδος

Στην ουσία, η Μπαγιεσιανή προσέγγιση για την εκτίμηση των παραμέτρων δουλεύει ως εξής:

1. Διαμορφώνουμε τη γνώση μας για μια κατάσταση.
2. Συλλέγουμε στοιχεία.
3. Αποκτούμε μεταγενέστερη γνώση, που δυναμώνει τα αρχικά μας πιστεύω.

Πως όμως διαμορφώνουμε τη γνώση μας για μια κατάσταση?

Ορίζουμε ένα μοντέλο κατανομής το οποίο εκφράζει ποιοτικές πτυχές της γνώσης μας πάνω σε μια κατάσταση. Αυτό το μοντέλο θα έχει κάποιες άγνωστες παραμέτρους, οι οποίες θα αντιμετωπιστούν σαν τυχαίες μεταβλητές.

Προσδιορίζουμε μια αρχική κατανομή πιθανότητας, η οποία εκφράζει τις υποκειμενικές μας πεποιθήσεις και την υποκειμενική αβεβαιότητα για τις άγνωστες παραμέτρους, πριν δούμε τα δεδομένα.

Αφού συλλέξουμε τα στοιχεία, μετά πρέπει να αποκτήσουμε μεταγενέστερη γνώση. Για να το πετύχουμε αυτό, υπολογίζουμε μια μεταγενέστερη κατανομή πιθανότητας, που εκτιμάει τις άγνωστες παραμέτρους χρησιμοποιώντας τους κανόνες της πιθανότητας και δεδομένων των παρατηρούμενων δεδομένων, μας παρουσιάζει ενισχυμένες τις πεποιθήσεις μας.

2.7 Βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αξιοπιστία ενός δικτύου διανομής νερού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αστοχίες των στοιχείων των υποδομών και κατά κύριο λόγο στις αστοχίες των αγωγών. Οι προβλέψεις για τον αναμενόμενο αριθμό αστοχιών των αγωγών που απαρτίζουν ένα τέτοιο δίκτυο είναι σημαντικές για να αναπτυχθεί μια βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης. Η βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης εξισορροπεί θέματα ασφάλειας νερού, αξιοπιστίας, ποιότητας και ποσότητας, ενώ εκμεταλλεύεται όλο το εύρος της ωφέλιμης ζωής των αγωγών για να πετύχει οικονομική επάρκεια (Kleiner and Rajani, 2001). Τα μοντέλα αστοχίας αγωγών λοιπόν αποτελούν ένα από τα εργαλεία κλειδιά πάνω στα οποία μπορεί να στηριχθεί αυτή η διαδικασία διαχείρισης.

Κεφάλαιο 3

Αστοχίες στα υδροδοτικά συστήματα

3.1 Είδη αστοχιών

Για τον υπολογισμό όμως της αξιοπιστίας ενός δικτύου ύδρευσης πρέπει να είναι γνωστοί οι τρόποι με τους οποίους αυτό αστοχεί. Σύμφωνα με τους Xu και Goulter (1991) στα δίκτυα ύδρευσης υπάρχουν τρεις σημαντικές αστοχίες που μπορούν να συμβούν.

- Υδραυλική αστοχία ή αστοχία απόδοσης, η οποία οφείλεται στην ανικανότητα του δικτύου να παρέχει τη ζήτηση σχεδιασμού.
- Μηχανική αστοχία ή αστοχία εξαρτημάτων, η οποία οφείλεται στην αστοχία των αντλιών, των βαλβίδων, των αγωγών κλπ. ή σε διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Αστοχία λόγω μεταβολής της ζήτησης, η οποία προκαλείται όταν η πραγματική ζήτηση μαζί με την παροχή πυρκαγιάς υπερβαίνει την παροχή σχεδιασμού.

3.2 Μοντέλα αστοχιών

3.2.1 Εφαρμογές μοντέλων αστοχιών

Διακρίνονται δυο κύριες εφαρμογές των μοντέλων αστοχίας των αγωγών (Scheidegger *et al.*, 2011):

1. Οι πιθανότητες αστοχίας των μεμονομένων αγωγών χρειάζονται για τις μεσοπρόθεσμες στρατηγικές συντήρησης και αντικατάστασης του δικτύου των αγωγών και
2. Για μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, δεν είναι μείζονος σημασίας η ακριβής αιτία των αστοχιών, αλλά ο αναμενόμενος αριθμός των αστοχιών σε ολόκληρο το σύστημα.

Οι δυο αυτές εφαρμογές δεν απαιτούν διαφορετικές δομές μοντέλων, καθώς τα μοντέλα για τη δεύτερη μπορούν να επεκταθούν και στην πρώτη εισάγοντας ιδιότητες των αγωγών, όπως το υλικό και η διάμετρος. Το μοντέλο ωστόσο πρέπει να βαθμονομηθεί στη βάση των καταγραφών αστοχίας του τοπικού συστήματος εξαιτίας των διαφορών παραγόντων επιρροής, όπως είναι οι ιδιότητες του εδάφους. Η σωστή βαθμονόμηση μπορεί να γίνει μια πραγματική πρόκληση, καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα δεν είναι πάντα όλα γνωστά. Στα μοντέλα και συγκεκριμένα στην ανάλυση επιβίωσης (survival analysis), σε αντίθεση με άλλες στατιστικές αναλύσεις υπεισέρχεται η έννοια της λογοκρισίας (censoring) και των μοντέλων λογοκρισίας (censoring models), όπου η μεταβλητή που είναι προς ενδιαφέρον είναι παρατηρήσιμη μόνο υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Εδώ θα πρέπει να γίνει αναφορά στις έννοιες survival analysis και censoring.

3.3 Ανάλυση επιβίωσης

Η ανάλυση επιβίωσης (survival analysis) είναι ένας κλάδος της στατιστικής που ασχολείται με την ανάλυση της χρονικής διάρκειας μέχρι ένα ή περισσότερα γεγονότα συμβούν, όπως η αστοχία σε μηχανικά συστήματα, όπως είναι το asset failure στα δίκτυα διανομής νερού. Το θέμα αυτό ονομάζεται ανάλυση της αξιοπιστίας (reliability analysis) στον τομέα της μηχανικής. Η ανάλυση επιβίωσης μπορεί να οριστεί αλλιώς, ως μια σειρά από μεθόδους για την ανάλυση των δεδομένων, όπου η μεταβλητή έκβασης (outcome variable) είναι ο χρόνος μέχρι την επέλευση (occurrence) ενός γεγονότος που μας ενδιαφέρει. Ο χρόνος μέχρι την εκδήλωση ή χρόνος επιβίωσης μπορεί να μετρηθεί σε ημέρες, εβδομάδες, χρόνια ή κάποια άλλη μονάδα μέτρησης χρόνου. Για παράδειγμα, αν το γεγονός που μας ενδιαφέρει είναι το σπάσιμο ενός σωλήνα (pipe break), τότε ως χρόνος επιβίωσης μπορεί να θεωρηθεί ο χρόνος σε χρόνια, μέχρι ένας σωλήνας σπάσει.

Στην ανάλυση επιβίωσης, τα θέματα συνήθως ακολουθούν κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου και η εστίαση είναι το χρονικό σημείο κατά το οποίο λαμβάνει χώρα το γεγονός που μας ενδιαφέρει. Μια ερώτηση που θα μπορούσε να τεθεί εδώ είναι, γιατί να μην χρησιμοποιήσουμε μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης για τη μοντελοποίηση του χρόνου επιβίωσης (survival time) ως

συνάρτηση του συνόλου των μεταβλητών πρόβλεψης. Εδώ θα ήταν σκόπιμο να γίνει μια μικρή αναφορά για την ανάλυση παλινδρόμησης.

3.4 Ανάλυση παλινδρόμησης

Στη στατιστική, ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) είναι μια στατιστική διαδικασία για την εκτίμηση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών. Περιλαμβάνει πολλές τεχνικές για τη μοντελοποίηση και ανάλυση διαφόρων μεταβλητών, όταν η εστίαση είναι στην σχέση μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής και μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών (ή predictors). Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση παλινδρόμησης βοηθά κάποιον να κατανοήσει πώς η χαρακτηριστική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής (ή μεταβλητή κριτήριο) μεταβάλλεται, όταν οποιαδήποτε από τις ανεξάρτητες μεταβλητές αλλάζει, ενώ οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές παραμένουν σταθερές.

Οι λόγοι λοιπόν, που δεν προτιμάμε γραμμική παλινδρόμηση είναι πρώτον, ότι οι χρόνοι επιβίωσης είναι συνήθως θετικοί αριθμοί και η συνήθης γραμμική παλινδρόμηση μπορεί να μην είναι η καλύτερη επιλογή, εκτός εάν αυτοί οι χρόνοι πρώτα μετασχηματιστούν με έναν τρόπο που καταργεί αυτόν τον περιορισμό. Και δεύτερον και πιο σημαντικό, ότι η απλή γραμμική παλινδρόμηση δεν μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά την λογοκρισία (censoring) των παρατηρήσεων.

3.5 Λογοκρισία

Λογοκρισία (censoring) συμβαίνει όταν οι παρατηρήσεις έχουν ορισμένες πληροφορίες που διατίθενται για μια μεταβλητή, αλλά οι πληροφορίες δεν είναι πλήρεις. Αυτή η έλλειψη πληροφοριών προκύπτει όταν μια μεταβλητή μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μόνο εντός συγκεκριμένων ορίων. Έξω από αυτή την περιοχή, οι μόνες διαθέσιμες πληροφορίες είναι ότι είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από μία συγκεκριμένη τιμή ή ότι βρίσκεται μεταξύ δύο τιμών.

3.6 Τρία σενάρια με διαφορετικές διαθεσιμότητες δεδομένων

3.6.1 Right censoring- Left truncation- selective survival bias

Right censoring συμβαίνει όταν ένα αντικείμενο/άτομο εγκαταλείπει τη μελέτη πριν συμβεί ένα γεγονός, ή η μελέτη ολοκληρώνεται πριν από την παρέλευση του συμβάντος. Για κάθε αγωγό σε λειτουργία μια right censored παρατήρηση είναι πιθανή: ο χρόνος από την τελευταία αστοχία ή κατασκευή μέχρι τον χρόνο της παρατήρησης. Αυτό παρέχει σημαντική πληροφορία και οι αγωγοί χωρίς καταγεγραμμένες αστοχίες μέχρι το τέλος της περιόδου παρατήρησης δεν πρέπει να αποκλειστούν από τη διαδικασία βαθμονόμησης. Δηλαδή, όλες οι αστοχίες των αγωγών καταγράφονται και τα δεδομένα των αγωγών που αντικαταστάθηκαν παραμένουν στο αρχείο δεδομένων. Εκτός από το censoring υπάρχει και το truncation, δυο έννοιες που δεν πρέπει να συγχέονται. Τα truncated models χρησιμοποιούνται για δεδομένα όπου όλες οι παρατηρήσεις απουσιάζουν, έτσι ώστε τόσο οι τιμές για τις εξαρτημένες αλλά και για τις ανεξάρτητες μεταβλητές είναι άγνωστες. Left truncation συμβαίνει, εάν ένας αγωγός έχει εγκατασταθεί πριν οι αστοχίες αρχίσουν συστηματικά να καταγράφονται λόγω της χρήσης. Ως συνέπεια, δεν είναι γνωστό πόσες αστοχίες συνέβησαν πριν την περίοδο καταγραφής και άρα ο αριθμός των αστοχιών ανά αγωγό είναι άγνωστος. Συνήθως γίνεται χρήση του right censoring και πολύ λίγες φορές του left truncation. Εκτός αυτών όμως υπάρχει και το σενάριο που θέλει την απουσία των δεδομένων των αγωγών που έχουν αντικατασταθεί. Συχνά, οι αγωγοί που έχουν αντικατασταθεί διαγράφονται από τη βάση δεδομένων μαζί με τα αντίστοιχα δεδομένα των αστοχιών των αγωγών, επειδή η βάση δεδομένων έχει σχεδιαστεί με στόχο να αντανakλά την παρούσα κατάσταση. Αυτό οδηγεί σε μια επιλεκτική μεροληψία επιβίωσης (selective survival bias, Renaud *et al.*, 2011), επειδή στο δίκτυο δεδομένων θα βρίσκονται αγωγοί με χαμηλά ιστορικά αστοχιών. Επομένως, μη λαμβάνοντας υπόψη αυτό στην εκτίμηση των παραμέτρων, προκαλούνται συστηματικά σφάλματα στις προβλέψεις, τα οποία δεν είναι εύκολο απλά να μειωθούν αυξάνοντας το μέγεθος των δεδομένων (Scheidegger *et al.*, 2011).

3.7 Μοντέλο αστοχίας αγωγών – Μοντέλο αντικατάστασης

Επομένως, οι Scheidegger *et al.*, θεώρησαν ότι απαιτείται η ενσωμάτωση ενός μοντέλου αντικατάστασης που χαρακτηρίζει την πιθανότητα ο αγωγός να μην έχει αντικατασταθεί, να είναι δηλαδή στη διάθεση του δικτύου. Γενικά, αυτό μπορεί να είναι μια συνάρτηση της κατάστασης, της ηλικίας και του αριθμού των αστοχιών που έχει ήδη βιώσει. Τότε, οι παράμετροι του μοντέλου αυτού συνεκτιμώνται μαζί με αυτές του μοντέλου αστοχίας.

Όσον αφορά το μοντέλο αστοχίας των αγωγών, από την στιγμή που ένας αγωγός είναι σε λειτουργία υπάρχει η περίπτωση αυτός να αστοχήσει. Οι Scheidegger *et al.*, ορίζουν ως αστοχία ένα παρατηρήσιμο συμβάν το οποίο χαίρει άμεσων μέτρων, όπως είναι η θραύση του αγωγού. Υποτίθεται ότι οι αστοχίες επισκευάζονται αμέσως χωρίς να αντικατασταθούν οι αγωγοί. Ο χρόνος οπότε και αστοχεί κάποιος αγωγός είναι τυχαίος και ως εκ τούτου περιγράφεται από μια συνάρτηση συχνότητας πιθανότητας ή από μια πιθανότητα επιβίωσης. Προφανώς, το χρονικό σημείο της αστοχίας ενός αγωγού i και ο αγωγός i δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, καθώς ο αγωγός i μπορεί να αστοχήσει πριν την αστοχία του αγωγού $i-1$.

Ο Scheidegger (2013) περιγράφει το χρησιμοποιούμενο πιθανοτικό Weibull-εκθετικό μοντέλο αστοχίας αγωγών και συγκεκριμένα, μοντελοποιεί το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην πρώτη αστοχία και στην ημερομηνία κατασκευής (σε χρόνια) με την κατανομή Weibull και τους χρόνους ανάμεσα στις ακόλουθες αστοχίες σαν εκθετικές κατανομές.

Όσον αφορά το μοντέλο αντικατάστασης, εκφράζει την πιθανότητα ο αγωγός να μην έχει αντικατασταθεί μέχρι τον χρόνο που λήγει η περίοδος καταγραφής, δεδομένου της ιστορίας αστοχιών του. Συνήθως, βoleύει να διαμορφώνεται το μοντέλο αντικατάστασης, αρχικά εξαρτώμενο από τον αριθμό των μη καταγεγραμμένων αστοχιών, δηλαδή την πιθανότητα ο αγωγός να μην έχει αντικατασταθεί και μετά να προκύπτει αυτή η πιθανότητα, ως το άθροισμα αυτών των πιθανοτήτων για n αστοχίες, πολλαπλασιαζόμενο με την πιθανότητα των n αστοχιών πριν την έναρξη της περιόδου καταγραφής.

3.8 Λειτουργία των δικτύων διανομής νερού

Η AWWA (American Water Works Association, 1974) ορίζει το δίκτυο ύδρευσης ως ένα σύστημα, που περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία (αγωγοί, αντλίες, βαλβίδες, ρυθμιστές πίεσης, κλπ) για τη διανομή του πόσιμου νερού με βαρύτητα από δεξαμενή ή με κατάθλιψη απευθείας στο δίκτυο διανομής – κατάθλιψης, στους καταναλωτές, συμπεριλαμβανομένων και των δεξαμενών εξισορρόπησης.

Οι βασικές λειτουργίες ενός δικτύου ύδρευσης είναι:

- η επεξεργασία του νερού που παραλαμβάνεται από μια υδροληψία, έτσι ώστε η ποιότητά του να είναι αποδεκτή
- η μεταφορά του
- η διανομή του στους καταναλωτές στη ζητούμενη ποσότητα, στην κατάλληλη πίεση και στην επιθυμητή χρονική στιγμή

Στην ουσία, το κύριο μέλημα των δικτύων διανομής νερού είναι να παρέχουν νερό στους καταναλωτές, για οικιακή αλλά και για εμπορική και βιομηχανική χρήση, στην απαιτούμενη ποσότητα, ποιότητα και πίεση.

3.9 Δείκτες αξιοπιστίας

Οι δείκτες αξιοπιστίας χρησιμοποιούνται για να αξιολογούν την αποδοτικότητα των δικτύων διανομής νερού στο να παρέχουν νερό με την καθορισμένη ποιότητα, επαρκή ποσότητα και μέσα στο κατάλληλο εύρος πίεσης στους καταναλωτές κάτω από διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις (κανονικές ή αντικανονικές), όπως είναι η αστοχία των εξαρτημάτων ή και οι υδραυλικές μεταβολές. Η αξιοπιστία των δικτύων διανομής νερού συνδέεται με τους δύο τύπους αστοχιών, δηλαδή της μηχανικής βλάβης των συνιστωσών του συστήματος και της υδραυλικής βλάβης, που προκαλείται από τις αλλαγές στη ζήτηση και την πίεση κεφαλής (Tabesh, 1998). Οι αστοχίες μειώνουν την αξιοπιστία του δικτύου, λόγω της μείωσης της πίεσης ή λόγω διακοπής της παροχής νερού σε τμήματα του δικτύου διανομής, το οποίο τελικά οδηγεί σε δυσαρέσκεια των πελατών. Ευαίσθητοι πελάτες, όπως βιομηχανικά κέντρα, αστικά κέντρα, νοσοκομεία και άλλα είναι πιο πιθανό να επηρεαστούν.

3.10 Μηχανική αστοχία

Για να αξιολογηθεί η μηχανική αξιοπιστία του συστήματος διανομής νερού, πρέπει να καθιερωθεί μια σχέση μεταξύ αστοχίας του αγωγού και άλλων παραμέτρων του συστήματος. Σε γενικές γραμμές, πολλοί παράγοντες, όπως η ηλικία, η διάμετρος, το υλικό, η διάβρωση, η ποιότητα του υλικού του σωλήνα, οι συνθήκες εγκατάστασης και οι συνθήκες λειτουργίας και κυκλοφορίας, συμβάλλουν στα ατυχήματα και στη μηχανική βλάβη των αγωγών. Μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν την αστοχία του σωλήνα, μόνο μερικά από αυτά είναι μετρήσιμα, όπως η ηλικία, το μήκος, η διάμετρος, το βάθος και η πίεση. Τα πιο συχνά εφαρμόσιμα μοντέλα για την εκτίμηση του ποσοστού των αστοχιών των αγωγών χρησιμοποιούν απλά μοντέλα παλινδρόμησης πάνω στα διαθέσιμα δεδομένα αστοχιών αγωγών από ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα. Οι σχέσεις αυτές όμως, περιλαμβάνουν μόνο μια σειρά από σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την αποτυχία του σωλήνα, όπως είναι η ηλικία, η διάμετρος, οι κλιματικές συνθήκες.

3.11 Data-Driven Methods (DDM)

Το να ληφθούν υπόψη όμως όλες οι διαθέσιμες παράμετροι θα οδηγούσε σε πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις του ποσοστού αποτυχίας. Εδώ υπεισέρχονται λοιπόν οι λεγόμενες Data-Driven Methods (DDM). Εξαιτίας των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων των μεθόδων που βασίζονται σε δεδομένα (data-driven methods) και την ικανότητά τους να περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων που εμπλέκονται στα πολύπλοκα φαινόμενα, υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον μεταξύ των ερευνητών και των επαγγελματιών να χρησιμοποιούν αυτόν τον τύπο μοντέλου. Τα Artificial Neural Network (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) είναι μεταξύ των τεχνικών DDM που έχουν την ικανότητα να συλλάβουν την πολύπλοκη και μη γραμμική σχέση μεταξύ των διαφόρων μεταβλητών του συστήματος μαθαίνοντας από τα δεδομένα (Demuth & Beale 2002).

3.12 Ποσοστό αποτυχίας

Υπάρχουν πολύ λίγες δημοσιεύσεις σχετικά με τις εφαρμογές των μοντέλων που βασίζονται σε δεδομένα για την πρόβλεψη αστοχίας αγωγού, αλλά επειδή έχουν υπάρξει εφαρμογές των τεχνικών αυτών σε διάφορους τομείς της μηχανικής, η χρήση των DDM, όπως ANN και ANFIS, θα ήταν χρήσιμη για την πρόβλεψη του

ποσοστού αστοχίας των αγωγών. Για το λόγο αυτό έχουν γραφτεί ορισμένα άρθρα, στα οποία γίνεται προσπάθεια αξιοποίησης αυτών των μοντέλων, χρησιμοποιώντας μια σειρά μετρήσιμων παραμέτρων του συστήματος, όπως η ηλικία του σωλήνα, η διάμετρος, το βάθος, το μήκος και η πίεση. Ένα πολυπαραγοντικό μοντέλο παλινδρόμησης είναι επίσης κατασκευασμένο με αυτές τις παραμέτρους. Για να αξιολογήσουμε τις διαφορετικές σχέσεις μηχανικής αστοχίας, τα αποτελέσματα των άνω μοντέλων για την πρόβλεψη του ποσοστού αστοχίας των αγωγών εισάγονται σε συνήθεις σχέσεις μηχανικής αστοχίας και τα αποτελέσματα συγκρίνονται. Τα τελικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την ιεράρχηση και την ταξινόμηση των μέτρων αξιοπιστίας και θεσπίζεται ένα κριτήριο ώστε να χρησιμοποιούνται αυτοί οι δείκτες πιο σωστά.

3.12.1 Μοντέλα του ποσοστού αποτυχίας

Σύμφωνα με τους Tabesh and Abedini (2005), το ποσοστό αστοχίας (failure rate) , το οποίο είναι ο αριθμός των ατυχημάτων ανά έτος και ανά μονάδα μήκους του αγωγού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης απόδοσης. Διάφοροι ερευνητές έχουν διεξάγει έρευνες για την ανάλυση της μηχανικής αστοχίας και την πρόβλεψη του ποσοστού αστοχίας των αγωγών (pipefailure rate) που βασίζονται σε έναν περιορισμένο αριθμό παραμέτρων που εμπλέκονται.

Οι Samir and Howard (1979) παρουσίασαν ένα εκθετικό μοντέλο για την πρόβλεψη του ποσοστού αστοχίας των αγωγών βασισμένη στον χρόνο.

$\lambda(t) = \lambda(t_0)e^{\alpha(t-t_0)}$, όπου $\lambda(t)$ το είναι το ποσοστό αστοχίας ανά έτος t (βασισμένο στον αριθμό αστοχιών/ γρ/ km (ή mile), t_0 είναι ο χρόνος της ανάλυσης, $\lambda(t_0)$ είναι το ποσοστό αστοχίας σε χρόνο t_0 και α είναι ο ρυθμός ανάπτυξης (1/γρ). Οι συγγραφείς πρότειναν, ότι η τιμή του συντελεστή α κυμαίνεται μεταξύ 0,05 και 0,15, εξαρτώμενος από το υλικό και τη διάμετρο του αγωγού.

Οι Kettler and Goulter (1985) διεξήγαγαν μελέτες για να εκφράσουν τις μεταβολές στον αριθμό των ετήσιων θραύσεων των αγωγών, ως συνάρτηση της ηλικίας και της διαμέτρου των σωλήνων χυτοσιδήρου και αμιάντου στο Γουίνιπεγκ του Καναδά. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα, η τάση των μεταβολών της ηλικίας και στις δύο

περιπτώσεις είναι γραμμική και δείχνει την ίδια αύξηση του αριθμού των αποτυχιών σε κάθε χρόνο.

Οι *Suetal.*, (1987), πρότειναν την ακόλουθη σχέση για το ποσοστό αστοχίας των αγωγών (αριθμός των ετήσιων αστοχιών ανά μίλι) :

$\lambda = 0.6858/D_i^{3.28} + 2.7158/D_i^{1.3131} + 2.7658/D_i^{3.5792} + 0.42$, για κάθε i από 1 έως N , όπου λ είναι το ποσοστό αστοχίας του αγωγού, D είναι η διάμετρος του αγωγού σε ίντσες και N είναι ο αριθμός των αγωγών που υπάρχουν στο δίκτυο.

Οι *Ahn et al.*, (2005) παρουσίασαν μια διαδικασία που βασίζεται στο ANN για να προβλέψουν το ποσοστό αποτυχίας των σωλήνων στο δίκτυο διανομής νερού στη Σεούλ στη Νότια Κορέα, θεωρώντας τη διακύμανση των αποτυχιών σε σωλήνες, απέναντι στις θερμοκρασίες του εδάφους, του νερού και του αέρα. Σύμφωνα με το μοντέλο τους, το φθινόπωρο και την άνοιξη, όταν η θερμοκρασία του νερού και του εδάφους άλλαζε, ο αριθμός των αποτυχιών σε σωλήνες αυξανόταν.

3.13 Στατιστικές μέθοδοι για την πρόβλεψη των θραύσεων των δικτύων ύδρευσης

Θα γίνει αρχικά μια αναφορά στον κύκλο ζωής των αγωγών ενός δικτύου ύδρευσης με το λεγόμενο “bathtub curve”, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στο reliability engineering και στην συνέχεια θα αναφερθούν στατιστικές μέθοδοι και τα αντίστοιχα μοντέλα τους για την πρόβλεψη των θραύσεων των αγωγών.

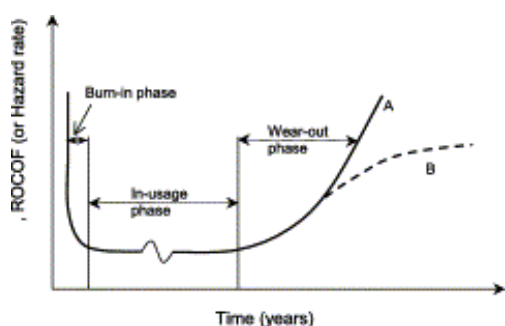
3.13.1 Bathtubcurve

Ο κύκλος ζωής ενός τυπικού θαμμένου σωλήνα συχνά περιγράφεται από το λεγόμενο “bathtub curve”. Το όνομα του προέρχεται από το σχήμα της διατομής της μπανιέρας, που έχει απότομες πλευρές και επίπεδη βάση. (Το σχήμα του φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο τύποι bathtub curve, ένας που περιγράφει την στιγμιαία πιθανότητα αστοχίας (hazard function) μιας μη επιδιορθώσιμης μονάδας και ένας που περιγράφει το ποσοστό εμφάνισης της αστοχίας μιας επιδιορθώσιμης μονάδας (rate of occurrence of failure, ROCOF) (Ascher & Feingold, 1984). Ένας σωλήνας είναι συνήθως μια

μονάδα επιδιορθώσιμη, έτσι η ROCOF bathtub curve είναι αυτή που συνήθως συνδέεται με τον κύκλο ζωής του.

3.13.1.1 Οι τρεις φάσεις του κύκλου ζωής της καμπύλης - μπανιέρα

Η bathtub curve διακρίνεται συχνά σε τρεις φάσεις του κύκλου ζωής ενός σωλήνα. Η πρώτη φάση, επίσης γνωστή ως "burn-in phase", περιγράφει την περίοδο αμέσως μετά την εγκατάσταση, στην οποία οι θραύσεις συμβαίνουν κυρίως ως αποτέλεσμα της ελαττωματικής εγκατάστασης ή των ελαττωματικών σωλήνων. Μόλις το σύστημα απαλλαγεί από αυτά τα απευκταία προβλήματα, ο σωλήνας μπαίνει στη δεύτερη φάση, επίσης γνωστή ως "in-usage phase", στην οποία λειτουργεί σχετικά χωρίς προβλήματα, με κάποια χαμηλή συχνότητα αστοχίας, που προκύπτει από κάποια τυχαία φαινόμενα, όπως είναι τυχαία βαριά φορτία, παρεμβάσεις τρίτων και λοιπά. Η τρίτη φάση, που ονομάζεται επίσης και "wear-out phase", αποτελεί μια περίοδο αυξανόμενης συχνότητας αστοχίας, εξαιτίας της επιδείνωσης (deterioration) του σωλήνα και τη γήρανσης αυτού. Είναι στην ουσία ένας συνδυασμός ενός φθίνοντος κινδύνου πρόωρης αστοχίας ("burn-in phase") και ενός αυξανόμενου κινδύνου τελικής αστοχίας, όπου πια ο αγωγός γηράσκει ("wear-out phase"), συν κάποιον σταθερό κίνδυνο τυχαίων σφαλμάτων στη μέση φάση ("in-usage phase"). Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται αυτές οι τρεις φάσεις. Δεν σημαίνει ότι ο κάθε σωλήνας θα βιώνει κάθε μια από τις φάσεις, ενώ και η διάρκεια των φάσεων μπορεί να ποικίλει σημαντικά για τους διάφορους σωλήνες και κάτω από διάφορες συνθήκες. Μερικά από τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί εξετάζουν ρητά και τις τρεις φάσεις της bathtub curve, ενώ κάποια άλλα θεωρούν έμμεσα μόνο μία ή δύο φάσεις.



Σχήμα 1. The bathtub curve of the life cycle of a buried pipe.

3.13.2 Στατιστικές μέθοδοι

Οι στατιστικές μέθοδοι για την πρόβλεψη των θραύσεων των δικτύων ύδρευσης χρησιμοποιούν τα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία για τις αστοχίες του παρελθόντος για να εντοπίσουν πρότυπα θραύσεων σωλήνων. Τα πρότυπα αυτά (patterns) συνοψίζονται για να συνεχιστούν και στο μέλλον και τελικά να μπορούν να προβλέψουν το μελλοντικό ποσοστό θραύσης των αγωγών (ripe break rate) και την πιθανότητα θραύσης αυτών. Μια τέτοιου είδους στατιστική μέθοδος είναι τα ντετερμινιστικά μοντέλα. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα προβλέπουν το breakagerate χρησιμοποιώντας δύο ή τρεις παραμέτρους, που βασίζονται στην ηλικία του αγωγού και στο ιστορικό θραύσης του. Πολλοί παράγοντες, όπως λειτουργικοί, περιβαλλοντικοί και εξαρτώμενοι από το είδος του αγωγού, επηρεάζουν από κοινού το ποσοστό θραύσης ενός δικτύου ύδρευσης. Ακολουθεί αμέσως παρακάτω ο ορισμός του ντετερμινιστικού μοντέλου.

3.13.3 Ντετερμινιστικά Μοντέλα

Το Ντετερμινιστικό Μοντέλο ορίζεται ως ένα μαθηματικό μοντέλο στο οποίο οι εκβάσεις προσδιορίζονται επακριβώς από τις γνωστές σχέσεις μεταξύ των μελών και των γεγονότων, χωρίς κανένα περιθώριο για τυχαία μεταβολή. Το Ντετερμινιστικό Σύστημα δηλαδή, είναι ένα σύστημα στο οποίο δεν εμπλέκεται καμία τυχειότητα στην ανάπτυξη των μελλοντικών καταστάσεων του συστήματος. Σε τέτοια μοντέλα, ένα δεδομένο εισόδου θα παράγει πάντα την ίδια έξοδο, δηλαδή θα παράγει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα από μια δεδομένη κατάσταση εκκίνησης ή αρχική κατάσταση.

Στην συνέχεια γίνεται παράθεση κάποιων ντετερμινιστικών μοντέλων μέσω διαφορετικών αναλύσεων και προσεγγίσεων από διάφορους μελετητές. Τα μοντέλα αυτά χωρίζονται σε μοντέλα εκθετικά και γραμμικά με τον χρόνο.

3.13.3.1 Μοντέλα εκθετικά με τον χρόνο

Οι Shamir and Howard (1979) χρησιμοποίησαν ανάλυση παλινδρόμησης για να δημιουργήσουν ένα μοντέλο εκτίμησης της θραύσης των αγωγών, που συσχετίζει την θραύση ενός αγωγού με τον εκθέτη της ηλικίας του,

$$N(t) = N(t_0)e^{A(t + g)},$$

όπου t είναι ο χρόνος που παρήλθε (από σήμερα) σε έτη, $N(t)$ είναι ο αριθμός των θραύσεων ανά μονάδα μήκους ανά έτος (/km/yr), $N(t_0) = N(t)$ κατά το έτος εγκατάστασης του σωλήνα (δηλαδή, όταν ο σωλήνας είναι καινούριος), g είναι η ηλικία του σωλήνα στον χρόνο t , και το A είναι ο συντελεστής του ρυθμού αύξησης της θραύσης(/yr). Σημειώνεται ότι $N(t_0) \neq 0$, που σημαίνει ότι κατά μέσο όρο ένας σωλήνας υποτίθεται να έχει πάντα μια συχνότητα θραύσης, αν και πολύ μικρή στην αρχή της ζωής του.

Οι Shamir and Howard (1979) δεν έδωσαν λεπτομέρειες σχετικά με τη θέρση μελέτης, την ποιότητα και την ποσότητα των διαθέσιμων στοιχείων ή με τη μέθοδο της ανάλυσης. Πρότειναν η ανάλυση παλινδρόμησης να εφαρμοστεί σε ομάδες των αγωγών που ήταν ομοιογενείς σε σχέση με τους παράγοντες που επηρεάζουν τις θραύσεις τους.

Οι Walski and Pellissia (1982) πρότειναν να ενισχυθεί το άνω εκθετικό μοντέλο, με την ενσωμάτωση δύο επιπλέον παραγόντων για την ανάλυση, με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν από τις US Army Corps of Engineers στο Binghamton της Νέας Υόρκης. Ο πρώτος παράγοντας είχε να κάνει με τις γνωστές προηγούμενες θραύσεις στους σωλήνες, με βάση την παρατήρηση, ότι αν κάποτε ένας αγωγός έσπασε είναι πιο πιθανό να σπάσει και πάλι. Ο δεύτερος παράγοντας είχε να κάνει με τις παρατηρούμενες διαφορές στα ποσοστά θραύσης σε μεγαλύτερες διαμέτρου σωλήνες από χυτοσίδηρο.

$N(t) = C_1 C_2 N(t_0) e^{A(t+g)}$, όπου C_1 είναι ο λόγος μεταξύ (της συχνότητας θραύσης για σωλήνα από χυτοσίδηρο με καμία, μία ή περισσότερες προηγούμενες θραύσεις) και (της συνολικής συχνότητας θραύσης για σωλήνες από χυτοσίδηρο) και C_2 ο λόγος μεταξύ (της συχνότητας θραύσης για σωλήνες από χυτοσίδηρο διαμέτρου 500 χιλιοστών) και της (συνολικής συχνότητας θραύσης για σωλήνες από χυτοσίδηρο).

Οι Clark *et al.*, πρότειναν μια περαιτέρω ενίσχυση του εκθετικού μοντέλου. Παρατήρησαν ότι υπάρχει μια καθυστέρηση μεταξύ του έτους που εγκαθίσταται ο αγωγός και της πρώτης θραύσης αυτού και ως εκ τούτου πρότειναν ένα μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει μια γραμμική εξίσωση για να προβλέψουν τον χρόνο που παρήλθε για την πρώτη θραύση και η εξίσωση είναι η εξής:

$NY = x_1 + x_2D + x_3P + x_4I + x_5RES + x_6LH + x_7T$, όπου NY = αριθμός των χρόνων από την εγκατάσταση μέχρι την πρώτη επισκευή, D=διάμετρος του σωλήνα, P=απόλυτη πίεση στο εσωτερικό ενός σωλήνα, I=% των σωληνώσεων που υπερκαλύφθηκαν από τη βιομηχανική ανάπτυξη, RES=% των σωλήνων που υπερκαλύφθηκαν από την οικιστική ανάπτυξη, LH=μήκος του σωλήνα σε εξαιρετικά διαβρωτικά εδάφη, T = ο τύπος σωλήνα (1 = μεταλλικό, 0 = οπλισμένο σκυρόδεμα) και x_i , οι παράμετροι παλινδρόμησης.

3.13.3.2 Μοντέλα γραμμικά με τον χρόνο

Οι Kettler και Goulter (1985) πρότειναν μια γραμμική σχέση μεταξύ θραύσεων σωλήνα και ηλικίας:

$N = k_0 \text{Age}$, όπου N = αριθμός των θραύσεων ανά έτος, k_0 = παράμετρος παλινδρόμησης και Age = ηλικία του σωλήνα στην πρώτη θραύση (έτη).

Ο McMullen (1982) πρότεινε ένα μοντέλο παλινδρόμησης που εφαρμόστηκε στο σύστημα διανομής νερού της Des Moines στην Αϊόβα. Ηρευνητική ομάδα κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι η διάβρωση ήταν ένας σημαντικός παράγοντας των αστοχιών του δικτύου ύδρευσης, δεδομένου ότι παρατηρήθηκε ότι το 94% των αστοχιών των αγωγών συνέβη σε κορεσμένα εδάφη με αντιστάσεις μικρότερες από 2000 Ωcm . Εξέτασαν διάφορα μοντέλα και εκείνο που λειτουργήσε καλύτερα είναι το εξής:

$$\text{Age} = 65.78 = 0.028 \text{ SR} - 6.33 \text{ pH} - 0.049 r_d$$

, όπου Age = ηλικία του σωλήνα στην πρώτη θραύση (έτη), SR= αντίσταση κορεσμένου εδάφους (Ωcm), pH= pH του εδάφους και r_d =οξειδοαναγωγικό δυναμικό (millivolts).

Κεφάλαιο 4

Η Ύδρευση της Αθήνας

4.1 Ιστορική αναδρομή ύδρευσης Αθήνας

4.1.1 Από την αρχαιότητα έως την τουρκοκρατία

Η Αθήνα αντιμετώπιζε έντονα προβλήματα λειψυδρίας από την αρχαιότητα. Τα επιφανειακά νερά ήταν πάντα λιγοστά και η υδροδότηση της πόλης γινόταν συνήθως από πηγές και πηγάδια. Παράλληλα, υπήρχαν πολλές κρήνες διάσπαρτες μέσα στην πόλη, όπως και πλήθος δεξαμενών, στις οποίες συγκεντρωνόταν βρόχινο νερό. Από τα γνωστότερα αρχαία υδραγωγεία ήταν το Πεισιστράτειο, που κατασκευάστηκε από τον τύραννο Πεισίστρατο το 530 π.Χ., είχε μήκος 2800m και αντλούσε νερό από τις πηγές του Υμηττού. Όμως, το σημαντικότερο έργο για την υδροδότηση της Αθήνας ήταν το Αδριάνειο Υδραγωγείο, που κατασκευάστηκε από το 134 μ.Χ. έως και το 140 μ.Χ. από τον Ρωμαίο Αυτοκράτορα Ανδριανό, για να καλυφθεί η ανάγκη να υδροδοτηθεί η ρωμαϊκή συνοικία της Αθήνας, η οποία περιελάμβανε τον χώρο που καταλαμβάνει σήμερα το πάρκο του Ζαπτείου από τον Βουλή έως και το Καλλιμάρμαρο. Το Αδριάνειο Υδραγωγείο ξεκινούσε από τους πρόποδες της Πάρνηθας και κατέληγε στο Λυκαβηττό, όπου και αποθηκευόταν σε λιθόκτιστη δεξαμενή χωρητικότητας 500 περίπου m³, η οποία ονομάστηκε Αδριάνειος Δεξαμενή. Το υδραγωγείο συνέχισε να λειτουργεί μέχρι και στα χρόνια της τουρκοκρατίας, οπότε και καταστράφηκε.

4.1.2 1833 - 1925

Κατά τη διάρκεια του εθνικοαπελευθερωτικού αγώνα σημειώθηκαν πολλές καταστροφές στην υδροδοτική υποδομή της πόλης. Συνεπώς, μετά την απελευθέρωση, το υδροδοτικό πρόβλημα της Αθήνας ήταν οξύτατο. Με πρωτοβουλία της εκάστοτε δημοτικής αρχής έγιναν σημαντικά έργα, όπως επισκευές και καθαρισμοί του Αδριάνειου Υδραγωγείου, το οποίο τέθηκε και πάλι σε λειτουργία το 1840. Το 1870 ανακαλύφτηκε και η Αδριάνειος Δεξαμενή, η οποία ανακατασκευάστηκε και λειτούργησε μέχρι το 1940. Σημαντική ήταν και η κατασκευή άλλων μικρών υδραγωγείων, χωρίς ωστόσο τα έργα αυτά να έχουν

κάποιο ουσιαστικό αποτέλεσμα στην αντιμετώπιση της λειψυδρίας. Εντελώς ανεπαρκείς ήταν και οι 55 περίπου δημοτικές βρύσες που υπήρχαν στην Αθήνα, οι οποίες συνεισέφεραν ελάχιστα, έως και καθόλου, στις καθημερινές ανάγκες της κατανάλωσης νερού. Για αυτό έκαναν χρυσές δουλειές οι νερουλάδες, που μετέφεραν και πουλούσαν νερό στην Αθήνα από τις πηγές γειτονικών χωριών, όπως της Κηφισιάς και του Αμαρουσίου.

4.1.3 1925 - Σήμερα

Η αύξηση του πληθυσμού της Αθήνας, κυρίως μετά τη μικρασιατική καταστροφή, δημιούργησε νέες ανάγκες. Το 1925 ξεκίνησε η κατασκευή των πρώτων σύγχρονων έργων ύδρευσης στην περιοχή της Πρωτεύουσας, με την υπογραφή της σύμβασης μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου, της Αμερικανικής Εταιρίας ULEN και της Τράπεζας Αθηνών. Το πρώτο μεγάλο έργο ήταν η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα. Για την κατασκευή του φράγματος (1926 – 1929) εργάστηκαν περίπου 900 άνθρωποι. Το φράγμα είναι επενδεδυμένο με πεντελικό μάρμαρο, ιδιαιτερότητα που το καθιστά μοναδικό σε παγκόσμιο επίπεδο. Για τη μεταφορά του νερού στην Αθήνα, κατασκευάστηκε η σήραγγα Μπογιατίου, μήκους 13.4 km. Το 1956 λόγω της συνεχιζόμενης αύξησης του πληθυσμού της Αθήνας, χρησιμοποιήθηκαν τα νερά της φυσικής λίμνης Υλίκης, στη Βοιωτία. Η Υλίκη έχει την ιδιαιτερότητα να βρίσκεται σε περιοχή χαμηλού υψομέτρου. Έτσι, για να γίνει εφικτή η άντληση του νερού, λειτουργούν πλωτά και χερσαία αντλιοστάσια. Το κεντρικό αντλιοστάσιο της Υλίκης είναι σήμερα το μεγαλύτερο στην Ευρώπη.

Μείζονος σημασίας για την υδροδότηση της Αθήνας είναι το τεχνικό έργο που έγινε στον ποταμό Μόρνο το 1981. Το φράγμα που βρίσκεται επί του ποταμού Μόρνου, είναι το ψηλότερο χωμάτινο φράγμα της Ευρώπης, ύψους 126m. Το νερό φτάνει στην Αθήνα διαμέσου του υδραγωγείου του Μόρνου, του δεύτερου μεγαλύτερου υδραγωγείου στην Ευρώπη.

Ένα άλλο μεγάλο έργο που ενισχύει την υδροδότηση της Αθήνας είναι η εκτροπή του ποταμού Ευήνου προς τον ταμιευτήρα του Μόρνου με την κατασκευή φράγματος και σήραγγας, έργο που ολοκληρώθηκε το 2001. Η ενωτική σήραγγα προσαγωγής που μεταφέρει τα νερά του Ευήνου στον ταμιευτήρα του Μόρνου,

μήκους 29.4 km, ολοκληρώθηκε σε διάστημα λιγότερο των δύο ετών, γεγονός που αποτελεί παγκόσμιο επίτευγμα για την ολοκλήρωση σήραγγας μεγάλου μήκους.

Για τη μεταφορά του ακατέργαστου νερού από τους ταμιευτήρες στην Αττική κατασκευάστηκαν δύο μεγάλα υδραγωγεία, του Μόρνου και της Υλίκης, καθώς και ενωτικά υδραγωγεία, μέσω των οποίων επικοινωνούν μεταξύ τους τα δύο κύρια υδραγωγεία. Μέσω των υδραγωγείων του Μόρνου και της Υλίκης το ακατέργαστο νερό μεταφέρεται στις τέσσερις Μονάδες Επεξεργασίας Νερού (MEN) του Γαλασιού, του Πολυδενδρίου, των Αχαρνών και του Ασπροπύργου.

4.2 Γενικά για το υδροσύστημα της Αθήνας

Το εξωτερικό υδραγωγείο της Αθήνας είναι ένα εκτενές και πολύπλοκο υδροσύστημα το οποίο εκτείνεται σε μια έκταση περίπου 4000km² και περιλαμβάνει τόσο επιφανειακές όσο και υπόγειες πηγές. Η συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης του υδροσυστήματος προσεγγίζει τα 1400hm³, αλλά μόνο δυο από τους ταμιευτήρες και συγκεκριμένα ο ταμιευτήρας του Μόρνου και η φυσική λίμνη Υλίκη, κατέχουν μαζί το 88,5% αυτής. Αν και ο ταμιευτήρας του Ευήνου, ο οποίος είναι σε λειτουργία από το καλοκαίρι του 2001, έχει μικρή χωρητικότητα σε σχέση με τους προαναφερθέντες, λαμβάνει τις περισσότερες εισροές συγκριτικά. Γι' αυτό, το νερό από τον ταμιευτήρα του Ευήνου εκτρέπεται μέσω μιας σήραγγας στο γειτονικό ταμιευτήρα του Μόρνου, ο οποίος θεωρείται ως το κύριο έργο αποθήκευσης για τη ροή του ποταμού Ευήνου. Η μικρότερη δεξαμενή απ' όλες, αυτή του Μαραθώνα, είναι η παλαιότερη και η πλησιέστερη προς την πόλη της Αθήνας. Σήμερα η στάθμη του νερού της δεξαμενής του Μαραθώνα διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και χρησιμοποιείται μόνο ως εφεδρεία ασφαλείας για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και ως συμπλήρωμα για την περίπτωση μέγιστης ζήτησης του νερού κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. (D. Koutsoyiannis *et al.*, 2003)

4.2.1 Ταμιευτήρας Μόρνου

Στην κοίτη του ποταμού Μόρνου, 7 km δυτικά του Λιδορικού στο Νομό Φωκίδος, δημιουργήθηκε με την κατασκευή χωμάτινου φράγματος ο ταμιευτήρας του Μόρνου. Το έργο άρχισε τον Μάιο του 1969 και ολοκληρώθηκε το 1979, αλλά η κανονική λειτουργία του άρχισε το 1981. Το φράγμα του Μόρνου, ύψους 126

μέτρων είναι το ψηλότερο χωμάτινο φράγμα της Ευρώπης και ένα από τα μεγαλύτερα της Ευρώπης και αποτελείται από αδιαπερατό αργιλικό πυρήνα.



Εικόνα 1. Ταμιευτήρας Μόρνου (Πηγή: www.mama365.gr)



Εικόνα 2. Το φράγμα του Μόρνου, Φωτογραφία: Θεodorής Αθανασιάδης
(Πηγή: www.viewsofgreece.gr)

4.2.2 Ταμιευτήρας Ευήνου

Στον ποταμό Ευήνο, στην περιοχή Αγίου Δημητρίου του νομού Αιτωλοακαρνανίας (Ορεινή Ναυπακτία), κατασκευάστηκε το έργο του Ευήνου που περιελάμβανε την κατασκευή φράγματος, τη δημιουργία ταμιευτήρα και την κατασκευή της σήραγγας Ευήνου - Μόρνου. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του έργου προέβλεπε την ενίσχυση του βασικού ταμιευτήρα του Μόρνου από τη γειτονική λεκάνη του ποταμού Ευήνου. Μέσω της σήραγγας Ευήνου - Μόρνου, τα νερά του ταμιευτήρα του Ευήνου μεταφέρονται και διοχετεύονται στον ταμιευτήρα του Μόρνου. Η λειτουργία της σήραγγας γίνεται υπό πίεση με παροχή 27m^3 νερού ανά δευτερόλεπτο. Η σήραγγα Ευήνου - Μόρνου έχει συνολικό μήκος 29.393m και

εσωτερική διάμετρο 3,5m. Η διάνοιξη της σήραγγας ξεκίνησε το 1992 και ολοκληρώθηκε σε διάστημα 2 ετών, γεγονός που συνιστά μεγάλη επιτυχία για την ολοκλήρωση σήραγγας τόσο μεγάλου μήκους. Η έναρξη των εργασιών στον Εύηνο έγινε το 1992 με την κατασκευή χωμάτινου φράγματος, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2001.



Εικόνα 3. Η Σήραγγα Ευήνου-Μόρνου (Πηγή: www.dimosplatanou.gr)



Εικόνα 4. Ταμιευτήρας Ευήνου (Πηγή: www.mama365.gr)

4.2.3 Ταμιευτήρας Μαραθώνα

Ο Ταμιευτήρας του Μαραθώνα δημιουργήθηκε με την κατασκευή φράγματος που βρίσκεται στο νομό Αττικής, στη συμβολή των ρεμάτων του Χάραδρου και του Βαρνάβα. Λόγω της εγγύτητάς του με την Αθήνα, ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα λειτουργεί ως βοηθητική πηγή υδροληψίας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η τροφοδότησή του γίνεται από τους ταμιευτήρες της Υλίκης και του Μόρνου μέσω του Υδραγωγείου Υλίκης και του Ενωτικού Υδραγωγείου Μόρνου - Υλίκης.



Εικόνα5. Ταμειυτήρας Μαραθώνα (Πηγή: www.mama365.gr)

4.2.4 Ταμειυτήρας Υλίκης

Η φυσική λίμνη Υλίκη βρίσκεται στο νομό Βοιωτίας. Εντάχθηκε το 1956 στο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, προκειμένου να καλυφθούν οι μεγάλες ανάγκες κατανάλωσης νερού λόγω της πληθυσμιακής αύξησης του Λεκανοπεδίου. Από τους ταμειυτήρες της ΕΥΔΑΠ, μόνο αυτός της Υλίκης είναι φυσικά σχηματισμένη λίμνη.



Εικόνα6. Ταμειυτήρας Υλίκης (Πηγή:www.mama365.gr)

Λόγω της χαμηλής υψομετρικής της θέσης, χρησιμοποιούνται αντλιοστάσια για την άντληση του νερού που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα η μεταφορά νερού από την Υλίκη να έχει υψηλό λειτουργικό κόστος. Το υπέδαφος της Υλίκης είναι καρστικό, κάτι που οδηγεί σε σημαντικές διαρροές, οι οποίες μειώνουν την στάθμη του νερού της λίμνης. Εκτιμάται ότι περίπου 50% των συνολικών εισροών στη λίμνη καταλήγουν στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και τελικά από εκεί προς τη θάλασσα. Επομένως, ακόμα και αν από

οικονομικής απόψεως δεν αποτελεί μια ελκυστική λύση, σε περιόδους έντονης έλλειψης νερού, είναι επιτακτικό να αντλούμε όσο το δυνατόν περισσότερο νερό από κει, γιατί με αυτόν τον τρόπο μειώνουμε την στάθμη της λίμνης και ως εκ τούτου και τις διαρροές. Όπως και ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα, η Υλίκη λειτουργεί ως βοηθητική πηγή υδροληψίας για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.



Εικόνα 7. Πλωτό αντλιοστάσιο της ΕΥΔΑΠ στην Υλίκη Βοιωτίας.
(Πηγή: www.orchomenos.gr)

4.3 Μονάδες Επεξεργασίας Νερού (ΜΕΝ)

Το νερό, αφού συλλεχθεί στους ταμιευτήρες φτάνει μέσω των υδραγωγείων στις Μονάδες Επεξεργασίας Νερού. Το νερό που φτάνει στις ΜΕΝ είναι ακατέργαστο. Περιέχει διάφορα στερεά (κλαδιά, χώμα, λάσπη) που έχει παρασύρει κατά το πέρασμά του, όπως επίσης μικρόβια και μικροοργανισμούς που δεν είναι ορατά με γυμνό μάτι. Εκεί υποβάλλεται σε επεξεργασία που το καθιστά πόσιμο. Το νερό με την επεξεργασία στην οποία υποβάλλεται (κροκίδωση, καθίζηση, διύλιση, απολύμανση), απαλλάσσεται από τα παραπάνω στοιχεία.

Το Λεκανοπέδιο Αττικής αποτελείται από 4 ΜΕΝ και συγκεκριμένα αυτές του Γαλασίου, των Αχαρνών (Μενίδι), των Κιούρκων (Πολυδένδρι) και της Μάνδρας (Ασπρόπυγος).

4.3.1 ΜΕΝ Γαλατσίου

Η εγκατάσταση άρχισε να λειτουργεί το Δεκέμβριο του 1931 με δύο βασικούς για την εποχή νεωτερισμούς: την απολύμανση του νερού με χλώριο και τη χρησιμοποίηση θειικού αργιλίου για την επιτάχυνση της διαύγασης του νερού. Η μονάδα επεκτάθηκε διαδοχικά το 1952 και το 1964 και βρίσκεται σε υψόμετρο 159m. Η διυλιστική της ικανότητα είναι περίπου 540.000m³νερού ημερησίως και τροφοδοτεί το κέντρο της Αθήνας και το Δήμο του Πειραιά.

4.3.2 ΜΕΝ Αχαρνών

Η κατασκευή της ΜΕΝ Αχαρνών βοήθησε σημαντικά στην αντιμετώπιση της αυξανόμενης κατανάλωσης νερού μετά το 1970. Άρχισε να λειτουργεί το 1978 και επεκτάθηκε το 1989 και το 1992. Βρίσκεται σε υψόμετρο 232m και η διυλιστική της ικανότητα είναι περίπου 850.000m³ νερού ημερησίως. Τροφοδοτεί το 60% των περιοχών του Λεκανοπεδίου και ειδικά τις περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο.

4.3.3 ΜΕΝ Πολυδενδρίου

Η ΜΕΝ Πολυδενδρίου άρχισε να λειτουργεί το 1986 και η διυλιστική της ικανότητα είναι 200.000m³ (σε περιπτώσεις αιχμής 300.000m³) νερού ημερησίως. Βρίσκεται σε υψόμετρο 237m και τροφοδοτεί τα ανατολικά και βόρεια προάστια της Αθήνας.

4.3.4 ΜΕΝ Ασπρόπυργου

Η ΜΕΝ Ασπρόπυργου είναι γειτονική με το κανάλι του Μόρνου και άρχισε να λειτουργεί το 1997. Έχει διυλιστική ικανότητα περίπου 200.000m³νερού ημερησίως και το υψόμετρό της είναι 232m. Τροφοδοτεί το Θριάσιο Πεδίο, τη Σαλαμίνα και τα δυτικά προάστια της Αθήνας.



Εικόνα8. Οι 4 Μονάδες Επεξεργασίας Νερού στο λεκανοπέδιο Αττικής.
(Πηγή:www.SlideShare.net)

4.4 Τα δύο κύρια συστήματα

4.4.1 Βόρειο σύστημα

Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας έχει δύο κύρια συστήματα, τα οποία μπορούν να χωριστούν σε βόρειο και νότιο. Το βόρειο σύστημα μεταφέρει νερό από την Υλίκη (Βοιωτία), τις γεωτρήσεις της Υλίκης στην περιοχή Ούγγρα (Εύβοια) και τις γεωτρήσεις στη περιοχή Μαυροσουβάλα και τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Κάποια μέρη από αυτό το σύστημα απαιτούν ενέργεια για την άντληση του νερού.

4.4.2 Νότιο σύστημα

Το νότιο σύστημα μεταφέρει νερό από τον ταμιευτήρα τον Μόρνου και τις γεωτρήσεις στην περιοχή Βασιλικά. Το νερό αυτό μεταφέρεται με βαρύτητα στα υδραγωγεία αυτού του συστήματος και επομένως δεν απαιτείται ενεργειακό κόστος.

4.5 Οι διαρροές νερού του συστήματος

Οι σημαντικότερες διαρροές νερού του συστήματος παρατηρούνται στην Υλίκη. Το υπέδαφος της Υλίκης είναι καρστικό, κάτι που οδηγεί σε σημαντικές διαρροές, οι οποίες μειώνουν την στάθμη του νερού της λίμνης. Εκτιμάται ότι περίπου 50% των συνολικών εισροών στη λίμνη καταλήγουν στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και τελικά από εκεί προς τη θάλασσα. Μερικές μικρές διαρροές έχουν επίσης παρατηρηθεί από τον ταμιευτήρα του Μόρνου. Επιπλέον, απώλειες νερού εμφανίζονται και κατά μήκος μερικών εκ των κύριων υδραγωγείων του συστήματος. Τέλος, σημαντικές διαρροές παρατηρούνται και από τις υπερχειλίσεις των ταμιευτήρων. Εξαιτίας λοιπόν όλων αυτών των απωλειών νερού, λιγότερο από 500hm³ ανά έτος μπορούν να είναι διαθέσιμα για την πόλη της Αθήνας, αν και οι μέσες ετήσιες εισροές είναι της τάξης των 840 hm³ και οι υπόγειοι υδατικοί πόροι μπορούν στη θεωρία να συνεισφέρουν άλλα 90 hm³ (D. Koutsoyiannis *et al.*, 2003).

Κεφάλαιο 5

UWOT

5.1 Γενικά

Έχουμε προσομοιώσει το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας και συγκεκριμένα το εξωτερικό υδραγωγείο αυτής σε ένα πρόγραμμα το οποίο ονομάζεται UWOT, δηλαδή UrbanWaterOptimizationTool, που σημαίνει Εργαλείο Βελτιστοποίησης του Αστικού Νερού σε επακριβή μετάφραση. Το UWOT αποτελεί ένα εργαλείο, το οποίο υιοθετεί μια προσέγγιση μοντελοποίησης και είναι ικανό να προσομοιώσει ένα ολόκληρο αστικό δίκτυο ύδρευσης, όπως αυτό της Αθήνας, από την πηγή μέχρι τα νοικοκυριά (households) και πάλι πίσω. Το εργαλείο αυτό προσομοιώνει ολόκληρο το δίκτυο ύδρευσης από τη δημιουργία της ζήτησης στα νοικοκυριά μέσω των δεξαμενών νερού, στις πηγές της υδροληψίας δηλαδή, αλλά και από την παραγωγή των λυμάτων (wastewater) των νοικοκυριών μέσω των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων.

5.2 Πιο αναλυτικά

Το πρόβλημα της διαχείρισης της παροχής (supply management problem) συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως «βέλτιστος έλεγχος συστημάτων ταμιευτήρων» (optimalcontrolofreservoirsystems). Αποτελείται από τη λήψη αποφάσεων σε κάθε χρονικό βήμα για το πώς να καλυφθούν πολλαπλές απαιτήσεις με τη χρήση πολλαπλών πηγών νερού. Μια μέθοδος για τη μελέτη αυτού του είδους του προβλήματος προτάθηκε από τους Nalbantis and Koutsoyiannis (1997), η παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση (parameterisation-simulation-optimisation approach, PSO). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί έναν αριθμό των μεταβλητών ελέγχου, οι οποίες είναι παράμετροι ενός απλού κανόνα. Ο κανόνας αυτός, που αναφέρεται και ως παραμετρικός κανόνας, θεωρείται έγκυρος για το σύνολο της περιόδου ελέγχου και προσδιορίζει τις κυκλοφορίες από διάφορες δεξαμενές σε κάθε χρονικό βήμα. Στο UWOT λοιπόν, η PSO προσέγγιση, με μια διατύπωση κατάλληλη στον προσανατολισμένο προς τη ζήτηση (demand-oriented) σχεδιασμό του, χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του

εξωτερικού συστήματος παροχής νερού, δηλαδή του εξωτερικού υδραγωγείου. Για να εξηγήσουμε αυτή τη διατύπωση, η λειτουργία ενός σημαντικού συστατικού στοιχείου του UWOT του εξωτερικού συστήματος νερού, ο «splitter», δηλαδή διαχωριστής, πρέπει να περιγραφθεί πρώτα. Ας θεωρήσουμε ένα παράδειγμα όπου η ζήτηση νερού σε μια περιοχή καλύπτεται χρησιμοποιώντας τις κυκλοφορίες νερού από δύο ταμιευτήρες. Τα σήματα ζήτησης που εκπέμπονται από την περιοχή αυτή περνάνε μέσα από τον splitter, ο οποίος διανέμει το εισερχόμενο σήμα ζήτησης σε δύο εξόδους (outputs). Αυτή η διανομή ρυθμίζεται από μια παράμετρο που δίνει το ποσοστό της εισερχόμενης ζήτησης που κατευθύνεται στην πρώτη έξοδο του splitter (με την υπόλοιπη εισερχόμενη ζήτηση να κατευθύνεται προς την άλλη έξοδο).

Ένα σύστημα ύδρευσης με N πηγές νερού (εκ των οποίων N' είναι δεξαμενές και τα υπόλοιπα είναι για παράδειγμα γεωτρήσεις ή εγκαταστάσεις αφαλάτωσης) που συνδέονται με τον απλούστερο δυνατό τρόπο (δηλαδή με μόνο ένα δρόμο που συνδέει κάθε στοιχείο του συστήματος σε κάθε άλλο) απαιτεί $N - 1$ splitters. Σε κάθε δεδομένο χρονικό βήμα, $N - 1$ παράμετροι είναι επομένως όσοι απαιτούνται για να περιγράψουν τη λειτουργία του συστήματος. Δυστυχώς, αυτές οι παράμετροι (που καθορίζουν τον τρόπο που η ζήτηση κατανέμεται στους διάφορους υδάτινους πόρους) δεν είναι σταθερές αλλά θα πρέπει κατ' αρχήν να αλλάζουν ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του νερού στις πηγές νερού. Μια προσπάθεια για τη βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων άμεσα θα οδηγήσει σε ένα υψηλών διαστάσεων πρόβλημα. Για να αποφευχθεί αυτό, οι παράμετροι των splitters εκτιμώνται έμμεσα από το απόθεμα του νερού των δεξαμενών N' που βασίζεται σε ένα μητρώο $(N - 1) * N'$ που συμβολίζεται με CM και ένα διάνυσμα a με $N - 1$ στοιχεία. Εάν p είναι το διάνυσμα με τις παραμέτρους των splitters p_j στο χρονικό βήμα t της προσομοίωσης, όπου $j = \{1 \dots N - 1\}$, s είναι το διάνυσμα με τα αποθέματα S_i των ταμιευτήρων στο χρονικό βήμα t της προσομοίωσης, όπου $i = \{1 \dots N'\}$ και K ο διαγώνιος πίνακας $N' * N'$ του οποίου τα στοιχεία είναι οι χωρητικότητες των ταμιευτήρων, τότε σε κάθε χρονικό βήμα οι παράμετροι των splitters υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$p^T = CM(S/K)^T + a^T$$

Στο παράδειγμα, όπου η ζήτηση νερού σε μια περιοχή καλύπτεται χρησιμοποιώντας τις κυκλοφορίες νερού από δύο ταμιευτήρες, το μητρώο CM θα ήταν [c1 c2] (ένας πίνακας με μία σειρά για τον ενιαίο splitter και δύο στήλες για τους δύο ταμιευτήρες). Το διάνυσμα a θα ήταν [a] (ένα στοιχείο για τον ενιαίο splitter). Αν S1 και S2 ήταν τα αποθέματα των δεξαμενών 1 και 2 σε κάθε χρονικό βήμα και K1 και K2 οι χωρητικότητες τους, με αντικατάσταση στην πάνω σχέση, σε κάθε χρόνο βήμα ο συντελεστή του splitter θα υπολογιζόταν από τον τύπο: $c1S1 / K1 + c2S2 / K2 + a$. Εάν στο παράδειγμα με τους δύο ταμιευτήρες, προσθέταμε ακόμα έναν, τότε θα απαιτούσαν και ένας δεύτερος splitter και τότε το μητρώο CM θα γινόταν $2 * 3$ και το διάνυσμα a θα είχε δύο στοιχεία. Με αντικατάσταση τώρα στην πάνω σχέση θα είχαμε δύο στοιχεία αντί για ένα, δηλαδή $[c11S1/K1+c12S2/K2+c13S3/K3+a1, c21S1/K1+c22S2/K2+c23S3/K3+a2]$, όπου αυτά τα δύο στοιχεία είναι οι συντελεστές των δύο splitters σε κάθε χρονικό βήμα.

5.3 Στόχος

Με εφαρμογή του εργαλείου αυτού πάνω στο δίκτυο ύδρευσης της Αθήνας, έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης της λειτουργίας του και συγκεκριμένα, ο στόχος της βελτιστοποίησης ήταν να βρεθεί ο βέλτιστος κανόνας λειτουργίας για το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας με συνεκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας βασικών στοιχείων του υδραγωγείου.

5.4 Περιγραφή δικτύου ύδρευσης μέσω UWOT

Στο πρόγραμμα λοιπόν αυτό, έχουμε αναπαραστήσει όλα εκείνα τα στοιχεία (components) του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας από την υδροληψία μέχρι την Αθήνα. Αποτελείται από τους τέσσερις μεγάλους ταμιευτήρες από τους οποίους λαμβάνει νερό η Αθήνα και είναι αυτοί του Μόρνου, του Εύηνου, της Υλικής και του Μαραθώνα. Αποτελείται από τις γεωτρήσεις υπόγειου νερού στις περιοχές Υλική-Ούγγρα, Μαυροσουβάλα και του Βοιωτικού Κηφισού στις περιοχές Βασιλικά-Παρόρι, με αριθμό εγκατεστημένων γεωτρήσεων ίσο με ένα για κάθε περιοχή. Υπάρχουν επίσης οι τέσσερις μονάδες επεξεργασίας νερού κοντά στην Αθήνα, αυτές του Μενιδίου, του Γαλασίου, των Κιούρκων και της Μάνδρας. Φυσικά, όλα τα στοιχεία του δικτύου συνδέονται μεταξύ τους με διάφορα υδραγωγεία με διάφορα μήκη το καθένα και τα οποία δύνανται να αστοχήσουν. Αυτό θα προσπαθήσουμε να

διερευνήσουμε κάνοντας προσομοιώσεις στο δίκτυο και να δούμε αν τις δυσμενέστερες μέρες των επόμενων χρόνων, δηλαδή μέρες όπου οι ταμιευτήρες θα έχουν χαμηλό απόθεμα (όγκος νερού) ή αν προκύψει κάποια βλάβη σε κάποιο υδραγωγείο και αναγκαστούμε να διακόψουμε τη λειτουργία αυτού του υδραγωγείου, θα υπάρξει κάποιο πρόβλημα με τη λειτουργία του συνολικού δικτύου και παρουσιαστεί αδυναμία υδροδότησης των κατοίκων της Αθήνας.



Εικόνα 9. Το υδραγωγείο του Μόρνου (που βλέπουμε εδώ στο ύψος του χωριού Πρόδρομος, στη Βοιωτία) είναι το δεύτερο μεγαλύτερο υδραγωγείο στην Ευρώπη, με μήκος 192 km., Φωτ.: Νίκος Λουπάκης) (Πηγή:www.pemptousia.gr)



Εικόνα 10.Υδραγωγείο Μόρνου (Πηγή:www.wikimapia.org)

5.5 Προσομοίωση

5.5.1 Η έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης

Αρχικά θα πρέπει να γίνει αναφορά στην έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης και στα όρια αυτής. Όπως έχει αναφερθεί, η μελλοντική συμπεριφορά των υδρολογικών φαινομένων δεν είναι εύκολο να προβλεφτεί. Επομένως, η υδρολογική αβεβαιότητα, η οποία αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων υδατικών πόρων, καθιστά τη διαχείριση τους ιδιαίτερα δύσκολη. Η αδυναμία περιγραφής λοιπόν των υδρολογικών διεργασιών με χρήση συμβατικών μεθόδων υδρολογικής ανάλυσης έχει οδηγήσει στη θεώρηση τους ως τυχαίων μεταβλητών και την αντιμετώπιση τους με τη θεωρία των πιθανοτήτων. Η πιθανοτική αυτή θεώρηση, ή αλλιώς στοχαστική θεώρηση, δίνει απαντήσεις ως προς την χρονική πρόγνωση των φαινομένων, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξη τους.

Τα στοχαστικά μοντέλα προσομοιώνουν την χωρική και χρονική αλληλοεξάρτηση των υδρολογικών μεταβλητών. Τα μοντέλα αυτά περιγράφονται από παραμέτρους, οι οποίες εκτιμώνται με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών υδρολογικών χρονοσειρών.

Τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη γέννηση μεγάλου μήκους συνθετικών χρονοσειρών, οι οποίες αναπαράγουν την στατιστική δομή και τα χαρακτηριστικά των ιστορικών δεδομένων. Η χρήση συνθετικών χρονοσειρών σε προγράμματα διαχείρισης υδατικών συστημάτων επιτρέπει τη διερεύνηση της λειτουργίας τους για μεγάλο πλήθος υδρολογικών φαινομένων. Έτσι επιτυγχάνεται η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη της διαθεσιμότητας των υδάτινων πόρων και εξάγεται το συμπέρασμα για την επίδοση και την αξιοπιστία του υπό μελέτη υδροσυστήματος.

5.5.2 Όρια στοχαστικής προσομοίωσης

Ωστόσο, θα πρέπει να γίνει και μια μικρή αναφορά στους περιορισμούς και τα όρια της στοχαστικής προσομοίωσης. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου στοχαστικού μοντέλου και η εκτίμηση των παραμέτρων του βασίζεται πάντα στο διαθέσιμο ιστορικό δείγμα, το οποίο αποτελεί τη μόνη πρωτογενή πηγή πληροφορίας. Τα

προσομοιωμένα (συνθετικά) δείγματα υδρολογικών μεταβλητών σε καμία περίπτωση δεν υποκαθιστούν τα ιστορικά δείγματα υδρολογικών μετρήσεων. Η προσομοίωση δεν έχει νόημα για απλά προβλήματα στα οποία είναι δυνατή η αναλυτική λύση. Ωστόσο, η χρήση συνθετικών χρονοσειρών αποκτά νόημα όταν εξετάζονται αλληλοεξαρτώμενα μεγέθη που συνδυάζονται σε ένα αρκετά πολύπλοκο σύστημα, των οποίων η συνάρτηση κατανομής δεν μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα περίπτωση συστήματος ταμιευτήρων(ή ακόμη και ενός μεμονωμένου ταμιευτήρα), όπου ενδιαφέρει η στατιστική κατανομή των απολήψεων, οι οποίες εξαρτώνται με πολύπλοκο τρόπο από τις εισροές, τις καταναλώσεις, τους κανόνες λειτουργίας κ.ο.κ.

5.6 Αξιοπιστία συστήματος ως προς τη διαθεσιμότητα πόρων

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε την αξιοπιστία του ταμιευτήρα του Μόρνου, μιας και αποτελεί τον πιο σημαντικό τροφοδότη νερού για την Αθήνα. Η αξιοπιστία που θα υπολογισθεί θα υπόκειται στην απλή έννοια του όρου αξιοπιστία, ότι δηλαδή η αξιοπιστία αποτελεί το συμπλήρωμα της αστοχίας. Επίσης όμως, θα υπολογιστεί και πιο περίπλοκα, εφαρμόζοντας και κάποια αστοχία στο σύστημα για να δούμε κατά πόσο επηρεάζεται η αξιοπιστία του Μόρνου και σε αυτή την περίπτωση.

Στην πρώτη περίπτωση, από τις 36524 που προέκυψαν από την προσομοίωση των 100 χρόνων, κοιτάξαμε ποιες από αυτές είναι μηδενικές, δηλαδή οι τιμές κατά τις οποίες ο ταμιευτήρας του Μόρνου “πατώνει”, τις αθροίσαμε και στην ουσία αυτός ο αριθμός είναι ο συνολικός αριθμός των αστοχιών του ταμιευτήρα του Μόρνου και είναι ίσος με 91. Δηλαδή, η αστοχία του Μόρνου ισούται με $91/36524=0,25\%$. Επομένως η αξιοπιστία του Μόρνου ισούται με $1-91/36524=99,75\%$.

Time stamp	Hylike (454), Component - Surface water (L or mm)	Time stamp	Mornos (455), Component - Surface water (L or mm)	Time stamp	Evinos (366), Component - Surface water (L or mm)
1/10/2008	2.09E+11	1/10/2008	9.44E+10	1/10/2008	8.07E+10
2/10/2008	2.09E+11	2/10/2008	9.52E+10	2/10/2008	7.97E+10
3/10/2008	2.09E+11	3/10/2008	9.61E+10	3/10/2008	7.88E+10
4/10/2008	2.10E+11	4/10/2008	9.70E+10	4/10/2008	7.79E+10
5/10/2008	2.10E+11	5/10/2008	9.78E+10	5/10/2008	7.69E+10
6/10/2008	2.10E+11	6/10/2008	9.87E+10	6/10/2008	7.60E+10
7/10/2008	2.11E+11	7/10/2008	9.95E+10	7/10/2008	7.51E+10
8/10/2008	2.11E+11	8/10/2008	1.00E+11	8/10/2008	7.41E+10
9/10/2008	2.11E+11	9/10/2008	1.01E+11	9/10/2008	7.32E+10
10/10/2008	2.12E+11	10/10/2008	1.02E+11	10/10/2008	7.23E+10
11/10/2008	2.12E+11	11/10/2008	1.03E+11	11/10/2008	7.14E+10
12/10/2008	2.12E+11	12/10/2008	1.03E+11	12/10/2008	7.05E+10
13/10/2008	2.13E+11	13/10/2008	1.04E+11	13/10/2008	6.96E+10
14/10/2008	2.13E+11	14/10/2008	1.05E+11	14/10/2008	6.87E+10
15/10/2008	2.13E+11	15/10/2008	1.06E+11	15/10/2008	6.78E+10
16/10/2008	2.14E+11	16/10/2008	1.07E+11	16/10/2008	6.69E+10
17/10/2008	2.14E+11	17/10/2008	1.08E+11	17/10/2008	6.60E+10
18/10/2008	2.14E+11	18/10/2008	1.08E+11	18/10/2008	6.51E+10
19/10/2008	2.15E+11	19/10/2008	1.09E+11	19/10/2008	6.43E+10
20/10/2008	2.15E+11	20/10/2008	1.10E+11	20/10/2008	6.34E+10
21/10/2008	2.15E+11	21/10/2008	1.11E+11	21/10/2008	6.25E+10
22/10/2008	2.16E+11	22/10/2008	1.12E+11	22/10/2008	6.17E+10
23/10/2008	2.16E+11	23/10/2008	1.12E+11	23/10/2008	6.08E+10
24/10/2008	2.16E+11	24/10/2008	1.13E+11	24/10/2008	5.99E+10
25/10/2008	2.17E+11	25/10/2008	1.14E+11	25/10/2008	5.91E+10
26/10/2008	2.17E+11	26/10/2008	1.15E+11	26/10/2008	5.82E+10
27/10/2008	2.18E+11	27/10/2008	1.16E+11	27/10/2008	5.74E+10
28/10/2008	2.18E+11	28/10/2008	1.17E+11	28/10/2008	5.65E+10
29/10/2008	2.18E+11	29/10/2008	1.17E+11	29/10/2008	5.57E+10
30/10/2008	2.19E+11	30/10/2008	1.18E+11	30/10/2008	5.49E+10
31/10/2008	2.19E+11	31/10/2008	1.19E+11	31/10/2008	5.40E+10
1/11/2008	2.20E+11	1/11/2008	1.21E+11	1/11/2008	5.41E+10
2/11/2008	2.20E+11	2/11/2008	1.22E+11	2/11/2008	5.41E+10
3/11/2008	2.20E+11	3/11/2008	1.23E+11	3/11/2008	5.41E+10
4/11/2008	2.21E+11	4/11/2008	1.25E+11	4/11/2008	5.42E+10
5/11/2008	2.21E+11	5/11/2008	1.26E+11	5/11/2008	5.42E+10
6/11/2008	2.22E+11	6/11/2008	1.28E+11	6/11/2008	5.42E+10
7/11/2008	2.22E+11	7/11/2008	1.29E+11	7/11/2008	5.43E+10
8/11/2008	2.23E+11	8/11/2008	1.31E+11	8/11/2008	5.43E+10

9/11/2008	2.23E+11	9/11/2008	1.32E+11	9/11/2008	5.43E+10
10/11/2008	2.24E+11	10/11/2008	1.34E+11	10/11/2008	5.43E+10
11/11/2008	2.24E+11	11/11/2008	1.35E+11	11/11/2008	5.44E+10
12/11/2008	2.25E+11	12/11/2008	1.37E+11	12/11/2008	5.44E+10
13/11/2008	2.25E+11	13/11/2008	1.38E+11	13/11/2008	5.44E+10
14/11/2008	2.26E+11	14/11/2008	1.40E+11	14/11/2008	5.45E+10
15/11/2008	2.26E+11	15/11/2008	1.41E+11	15/11/2008	5.45E+10
16/11/2008	2.26E+11	16/11/2008	1.42E+11	16/11/2008	5.45E+10
17/11/2008	2.27E+11	17/11/2008	1.44E+11	17/11/2008	5.46E+10
18/11/2008	2.27E+11	18/11/2008	1.45E+11	18/11/2008	5.46E+10
19/11/2008	2.27E+11	19/11/2008	1.47E+11	19/11/2008	5.46E+10
20/11/2008	2.28E+11	20/11/2008	1.48E+11	20/11/2008	5.47E+10
21/11/2008	2.28E+11	21/11/2008	1.50E+11	21/11/2008	5.47E+10
22/11/2008	2.28E+11	22/11/2008	1.51E+11	22/11/2008	5.47E+10
23/11/2008	2.29E+11	23/11/2008	1.53E+11	23/11/2008	5.47E+10
24/11/2008	2.29E+11	24/11/2008	1.54E+11	24/11/2008	5.48E+10
25/11/2008	2.29E+11	25/11/2008	1.55E+11	25/11/2008	5.48E+10
26/11/2008	2.30E+11	26/11/2008	1.57E+11	26/11/2008	5.48E+10
27/11/2008	2.30E+11	27/11/2008	1.58E+11	27/11/2008	5.49E+10
28/11/2008	2.30E+11	28/11/2008	1.60E+11	28/11/2008	5.49E+10
29/11/2008	2.31E+11	29/11/2008	1.61E+11	29/11/2008	5.49E+10
30/11/2008	2.31E+11	30/11/2008	1.62E+11	30/11/2008	5.50E+10
1/12/2008	2.32E+11	1/12/2008	1.63E+11	1/12/2008	5.40E+10
2/12/2008	2.33E+11	2/12/2008	1.63E+11	2/12/2008	5.30E+10
3/12/2008	2.34E+11	3/12/2008	1.63E+11	3/12/2008	5.20E+10
4/12/2008	2.35E+11	4/12/2008	1.63E+11	4/12/2008	5.10E+10
5/12/2008	2.35E+11	5/12/2008	1.64E+11	5/12/2008	5.00E+10
6/12/2008	2.36E+11	6/12/2008	1.64E+11	6/12/2008	4.90E+10
7/12/2008	2.37E+11	7/12/2008	1.64E+11	7/12/2008	4.81E+10
8/12/2008	2.38E+11	8/12/2008	1.64E+11	8/12/2008	4.71E+10
9/12/2008	2.39E+11	9/12/2008	1.64E+11	9/12/2008	4.62E+10
10/12/2008	2.40E+11	10/12/2008	1.65E+11	10/12/2008	4.52E+10
11/12/2008	2.41E+11	11/12/2008	1.65E+11	11/12/2008	4.42E+10
12/12/2008	2.42E+11	12/12/2008	1.65E+11	12/12/2008	4.33E+10
13/12/2008	2.43E+11	13/12/2008	1.65E+11	13/12/2008	4.24E+10
14/12/2008	2.43E+11	14/12/2008	1.65E+11	14/12/2008	4.14E+10
15/12/2008	2.44E+11	15/12/2008	1.66E+11	15/12/2008	4.05E+10
16/12/2008	2.45E+11	16/12/2008	1.66E+11	16/12/2008	3.96E+10
17/12/2008	2.46E+11	17/12/2008	1.66E+11	17/12/2008	3.86E+10
18/12/2008	2.47E+11	18/12/2008	1.66E+11	18/12/2008	3.77E+10
19/12/2008	2.48E+11	19/12/2008	1.66E+11	19/12/2008	3.68E+10
20/12/2008	2.49E+11	20/12/2008	1.66E+11	20/12/2008	3.59E+10
21/12/2008	2.50E+11	21/12/2008	1.67E+11	21/12/2008	3.50E+10
22/12/2008	2.51E+11	22/12/2008	1.67E+11	22/12/2008	3.41E+10

23/12/2008	2.51E+11	23/12/2008	1.67E+11	23/12/2008	3.32E+10
24/12/2008	2.52E+11	24/12/2008	1.67E+11	24/12/2008	3.23E+10
25/12/2008	2.53E+11	25/12/2008	1.67E+11	25/12/2008	3.14E+10
26/12/2008	2.54E+11	26/12/2008	1.67E+11	26/12/2008	3.05E+10
27/12/2008	2.55E+11	27/12/2008	1.68E+11	27/12/2008	2.96E+10
28/12/2008	2.56E+11	28/12/2008	1.68E+11	28/12/2008	2.87E+10
29/12/2008	2.57E+11	29/12/2008	1.68E+11	29/12/2008	2.78E+10
30/12/2008	2.57E+11	30/12/2008	1.68E+11	30/12/2008	2.70E+10
31/12/2008	2.58E+11	31/12/2008	1.68E+11	31/12/2008	2.61E+10
1/1/2009	2.61E+11	1/1/2009	1.70E+11	1/1/2009	2.65E+10
2/1/2009	2.64E+11	2/1/2009	1.71E+11	2/1/2009	2.69E+10
3/1/2009	2.66E+11	3/1/2009	1.73E+11	3/1/2009	2.72E+10
4/1/2009	2.69E+11	4/1/2009	1.74E+11	4/1/2009	2.76E+10
5/1/2009	2.71E+11	5/1/2009	1.76E+11	5/1/2009	2.80E+10
6/1/2009	2.74E+11	6/1/2009	1.77E+11	6/1/2009	2.84E+10
7/1/2009	2.77E+11	7/1/2009	1.79E+11	7/1/2009	2.88E+10
8/1/2009	2.79E+11	8/1/2009	1.80E+11	8/1/2009	2.91E+10
9/1/2009	2.82E+11	9/1/2009	1.82E+11	9/1/2009	2.95E+10
10/1/2009	2.84E+11	10/1/2009	1.83E+11	10/1/2009	2.99E+10
11/1/2009	2.87E+11	11/1/2009	1.85E+11	11/1/2009	3.02E+10
12/1/2009	2.90E+11	12/1/2009	1.86E+11	12/1/2009	3.06E+10
13/1/2009	2.92E+11	13/1/2009	1.88E+11	13/1/2009	3.10E+10
14/1/2009	2.95E+11	14/1/2009	1.89E+11	14/1/2009	3.13E+10
15/1/2009	2.97E+11	15/1/2009	1.91E+11	15/1/2009	3.17E+10
16/1/2009	3.00E+11	16/1/2009	1.92E+11	16/1/2009	3.21E+10
17/1/2009	3.02E+11	17/1/2009	1.94E+11	17/1/2009	3.24E+10
18/1/2009	3.05E+11	18/1/2009	1.95E+11	18/1/2009	3.28E+10
19/1/2009	3.08E+11	19/1/2009	1.97E+11	19/1/2009	3.31E+10
20/1/2009	3.10E+11	20/1/2009	1.98E+11	20/1/2009	3.35E+10
21/1/2009	3.13E+11	21/1/2009	2.00E+11	21/1/2009	3.39E+10
22/1/2009	3.15E+11	22/1/2009	2.01E+11	22/1/2009	3.42E+10
23/1/2009	3.18E+11	23/1/2009	2.03E+11	23/1/2009	3.46E+10
24/1/2009	3.20E+11	24/1/2009	2.04E+11	24/1/2009	3.49E+10
25/1/2009	3.23E+11	25/1/2009	2.06E+11	25/1/2009	3.53E+10
26/1/2009	3.25E+11	26/1/2009	2.07E+11	26/1/2009	3.56E+10
27/1/2009	3.28E+11	27/1/2009	2.09E+11	27/1/2009	3.59E+10
28/1/2009	3.31E+11	28/1/2009	2.10E+11	28/1/2009	3.63E+10
29/1/2009	3.33E+11	29/1/2009	2.12E+11	29/1/2009	3.66E+10
30/1/2009	3.36E+11	30/1/2009	2.13E+11	30/1/2009	3.70E+10
31/1/2009	3.38E+11	31/1/2009	2.15E+11	31/1/2009	3.73E+10
1/2/2009	3.42E+11	1/2/2009	2.16E+11	1/2/2009	3.81E+10
2/2/2009	3.45E+11	2/2/2009	2.18E+11	2/2/2009	3.89E+10
3/2/2009	3.49E+11	3/2/2009	2.20E+11	3/2/2009	3.98E+10
4/2/2009	3.52E+11	4/2/2009	2.22E+11	4/2/2009	4.06E+10

5/2/2009	3.56E+11	5/2/2009	2.23E+11	5/2/2009	4.14E+10
6/2/2009	3.59E+11	6/2/2009	2.25E+11	6/2/2009	4.22E+10
7/2/2009	3.63E+11	7/2/2009	2.27E+11	7/2/2009	4.30E+10
8/2/2009	3.66E+11	8/2/2009	2.29E+11	8/2/2009	4.37E+10
9/2/2009	3.70E+11	9/2/2009	2.30E+11	9/2/2009	4.45E+10
10/2/2009	3.73E+11	10/2/2009	2.32E+11	10/2/2009	4.53E+10
11/2/2009	3.76E+11	11/2/2009	2.34E+11	11/2/2009	4.61E+10
12/2/2009	3.80E+11	12/2/2009	2.36E+11	12/2/2009	4.69E+10
13/2/2009	3.83E+11	13/2/2009	2.38E+11	13/2/2009	4.77E+10
14/2/2009	3.87E+11	14/2/2009	2.40E+11	14/2/2009	4.84E+10
15/2/2009	3.90E+11	15/2/2009	2.41E+11	15/2/2009	4.92E+10
16/2/2009	3.94E+11	16/2/2009	2.43E+11	16/2/2009	5.00E+10
17/2/2009	3.97E+11	17/2/2009	2.45E+11	17/2/2009	5.07E+10
18/2/2009	4.01E+11	18/2/2009	2.47E+11	18/2/2009	5.15E+10
19/2/2009	4.04E+11	19/2/2009	2.49E+11	19/2/2009	5.22E+10
20/2/2009	4.08E+11	20/2/2009	2.51E+11	20/2/2009	5.30E+10
21/2/2009	4.11E+11	21/2/2009	2.52E+11	21/2/2009	5.37E+10
22/2/2009	4.15E+11	22/2/2009	2.54E+11	22/2/2009	5.45E+10
23/2/2009	4.18E+11	23/2/2009	2.56E+11	23/2/2009	5.52E+10
24/2/2009	4.22E+11	24/2/2009	2.58E+11	24/2/2009	5.60E+10
25/2/2009	4.25E+11	25/2/2009	2.60E+11	25/2/2009	5.67E+10
26/2/2009	4.28E+11	26/2/2009	2.62E+11	26/2/2009	5.74E+10

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές των αποθεμάτων νερού των τριών ταμιευτήρων από την πρώτη ημέρα της προσομοίωσης.

5.7 Σενάρια αστοχίας

Αρχικά κάναμε μια προσομοίωση 100 ετών με ημερήσιο βήμα και αρχή της προσομοίωσης την ημερομηνία 01/10/2008 και τέλος αυτής την 30/09/2108. Προέκυψαν δηλαδή 36524 τιμές για κάθε έναν από τους ταμιευτήρες. Εμείς ασχοληθήκαμε με τους ταμιευτήρες του Μόρνου, του Εύηνου και της Υλικής. Από αυτές τις τιμές αφαιρέθηκαν από τους υπολογισμούς οι μηδενικές τιμές που προέκυψαν στον Μόρνο, οι τιμές δηλαδή κατά τις οποίες ο ταμιευτήρας του Μόρνου “πατώνει”. Από τις υπόλοιπες τιμές, επιλέχθηκαν εκείνες οι τιμές, πέντε στον αριθμό και από τους τρεις ταμιευτήρες, οι οποίες αθροιστικά ήταν οι μικρότερες από όλα τα χρόνια, δηλαδή οι πέντε χαμηλότερες τιμές αθροιστικά από τις 36524, με τη λογική ότι αυτές οι τιμές είναι οι πιο επικίνδυνες στο να προκαλέσουν μη κάλυψη της ζήτησης. Αφού καταλήξαμε σε αυτές τις τιμές, θεωρήσαμε ηθελημένα βλάβη σε κάποια από τα υδραγωγεία του συστήματος στο πρόγραμμα, συγκεκριμένα σε έξι από αυτά, ώστε να δούμε αν με τα χαμηλά

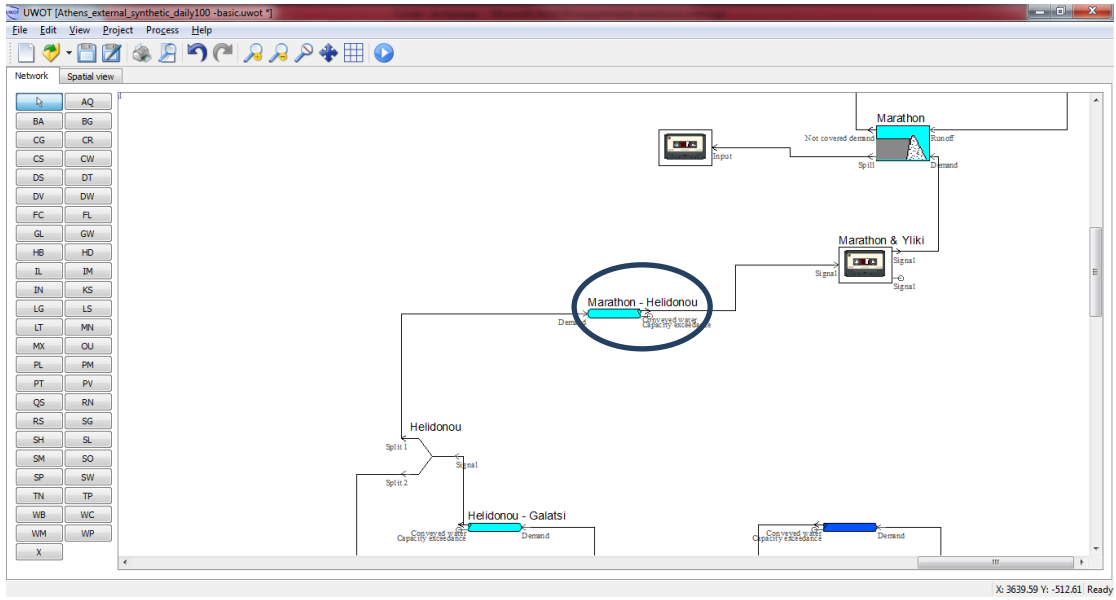
αποθέματα που έχουμε και με τις επιβεβλημένες αστοχίες, αστοχούν κάποια από τα componentstτου δικτύου, κάτι που φυσικά δεν επιθυμούμε.

Τα σενάρια αστοχίας λοιπόν που επιλέξαμε είναι τα εξής:

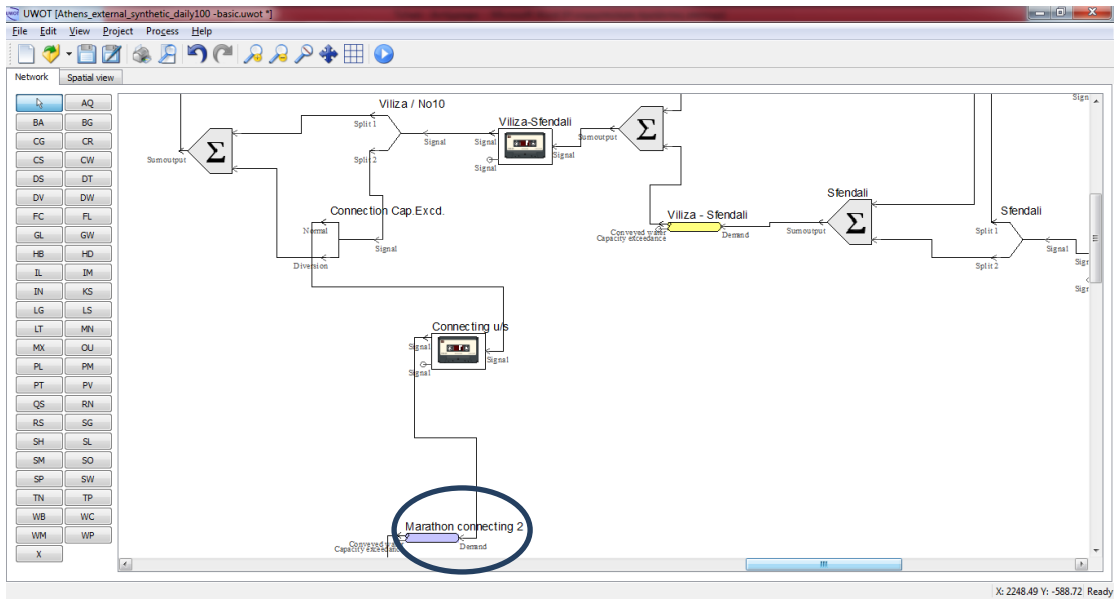
1. Marathon-Helidonou
2. Marathon-connecting 2
3. Mavrosouvala
4. Yliki-Ougra
5. Distomo connecting
6. Evinos-Mornostunnel

Επομένως, για κάθε ένα σενάριο αστοχίας κάναμε πέντε προσομοιώσεις. Για παράδειγμα, για την αστοχία στο Marathon-Helidonou, βάλουμε για τη δυσμενέστερη μέρα (αθροιστικά) που θα παρατηρηθεί στα 100 χρόνια, τις αντίστοιχες τιμές που απαρτίζουν αυτό το άθροισμα σε κάθε έναν από τους τρεις ταμειυτήρες και τρέξαμε το πρόγραμμα με αρχή της προσομοίωσης την ημερομηνία της δυσμενέστερης αυτής μέρας και αριθμό βημάτων 20 ημέρες. Στο τέλος κάθε προσομοίωσης έγιναν έλεγχοι σε κάθε componentτου δικτύου για να διαπιστωθεί αν προέκυψε κάποια αστοχία. Η δεύτερη προσομοίωση, είχε σαν αρχικές συνθήκες τη δεύτερη πιο δυσμενή ημέρα και τα αντίστοιχα αποθέματα στους τρεις ταμειυτήρες και στο τέλος της προσομοίωσης έγινε πάλι ο έλεγχος ενδεχόμενης αστοχίας. Το ίδιο έγινε και για τα υπόλοιπα σενάρια αστοχίας. Συνολικά έγιναν 30 προσομοιώσεις.

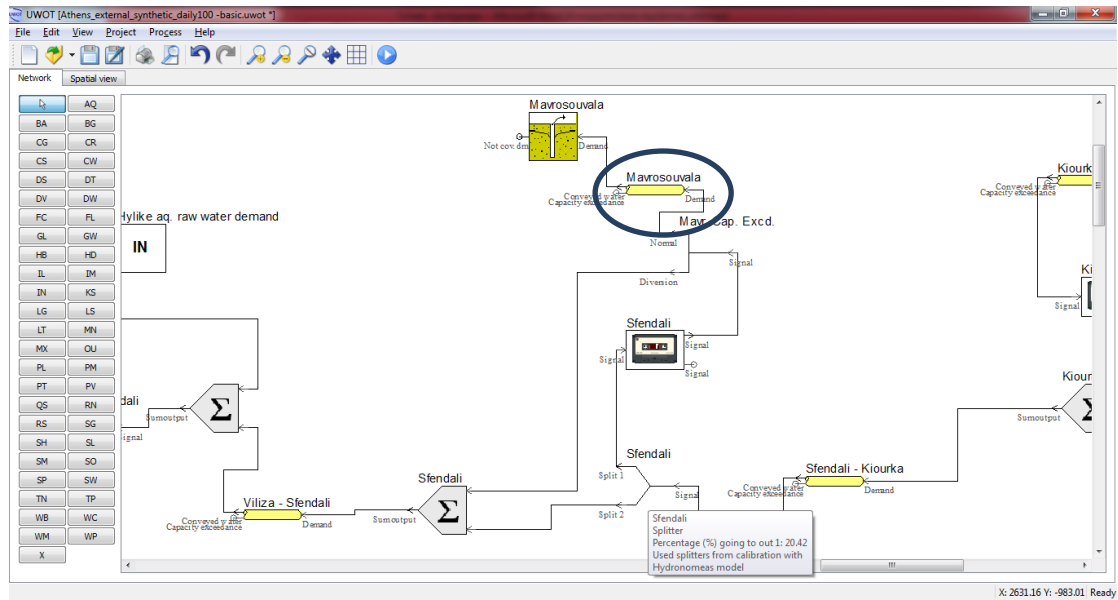
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται μέσω του UWOT τα προαναφερθέντα 6 υδραγωγεία στα οποία επεβλήθη βλάβη.



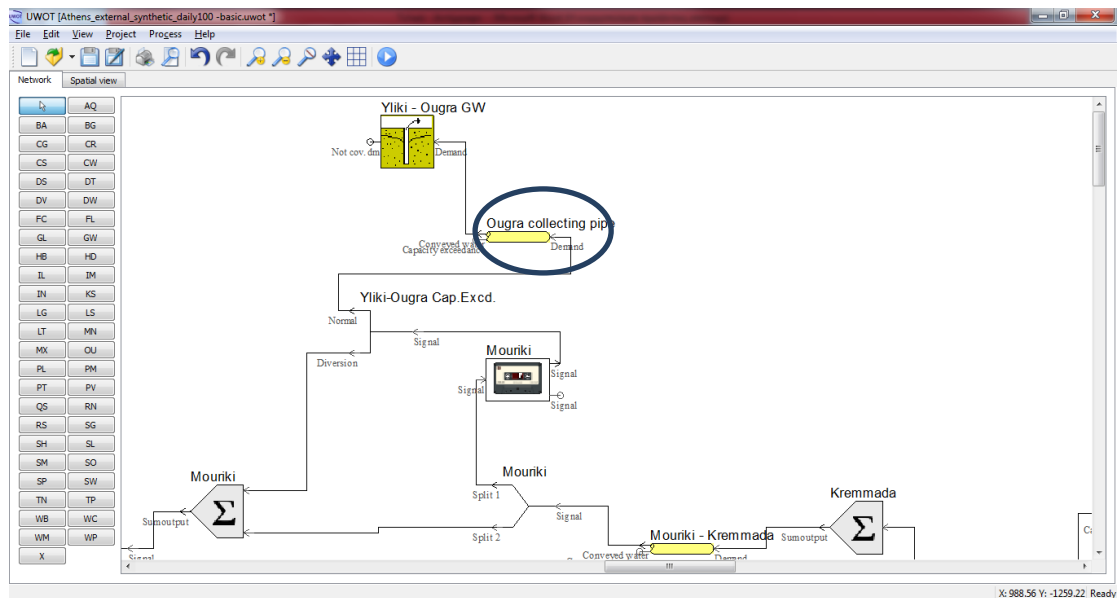
Σχήμα 2 :Marathon-Helidonou



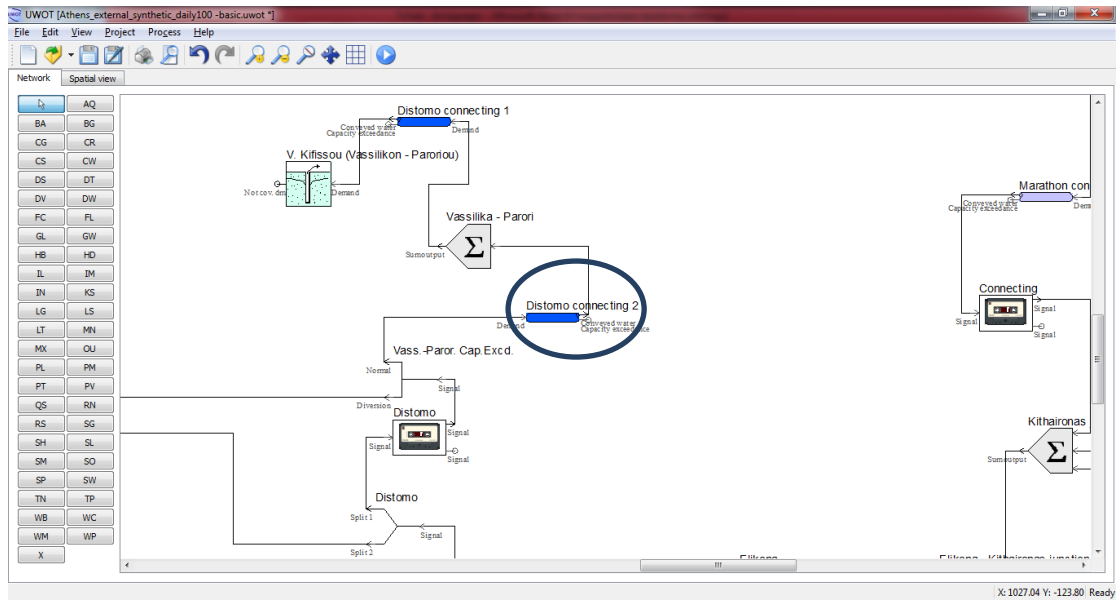
Σχήμα 3 :Marathon-connecting 2



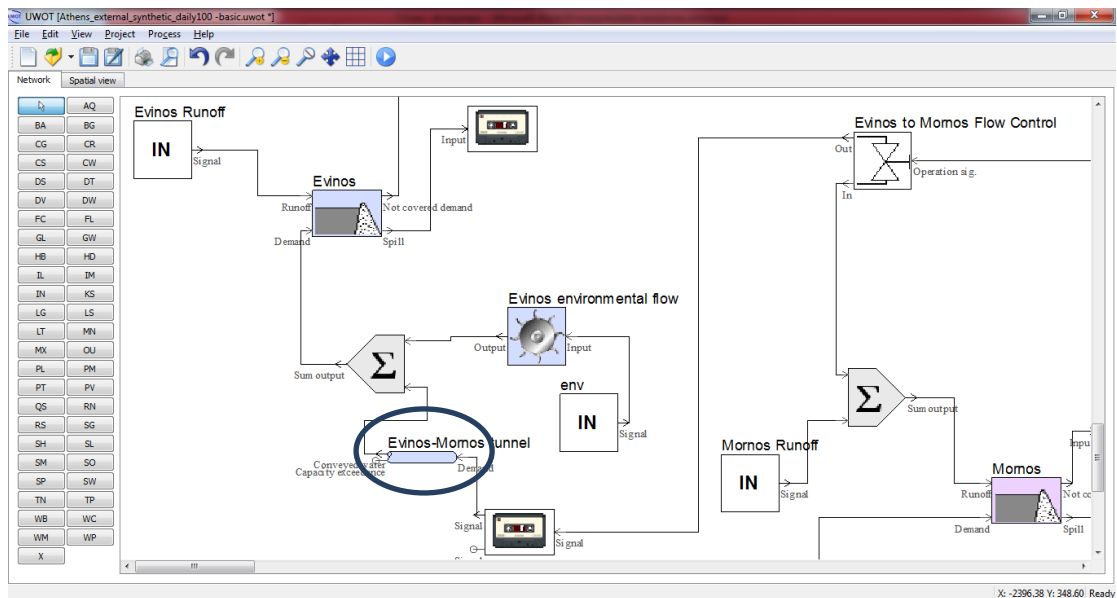
Σχήμα 4 :Mavrosouvala



Σχήμα 5: Yliki-Ougra



Σχήμα 6: Distomo connecting



Σχήμα 7 :Evinos-Mornostunnel

5.8 Μελέτη απομείωσης αξιοπιστίας λόγω αστοχιών στα εξωτερικά υδραγωγεία

Στη δεύτερη περίπτωση, όπου εισάγεται και συγκεκριμένη αστοχία στο δίκτυο, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Κατ' αρχάς, πρέπει πρώτα να αναφερθούν ποια είναι αυτή η συγκεκριμένη αστοχία που εισήχθη στο δίκτυο. Πρόκειται για βλάβη στα υδραγωγεία Marathon-Helidonou και Eninos-Mornos Tunnel. Με βάση αυτές λοιπόν τις αστοχίες, ξεχωριστά κάθε φορά, θέλαμε να ελέγξουμε κατά πόσο επηρεάζεται η αξιοπιστία του Μόρνου και κατά πόσο αποκλίνει από την αρχική αξιοπιστία που υπολογίστηκε. Επομένως η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω, πραγματοποιήθηκε δύο φορές, μια για κάθε σενάριο αστοχίας.

Εξαιρουμένων των μηδενικών τιμών που παρατηρήθηκαν στον ταμιευτήρα του Μόρνου, έγιναν προσομοιώσεις με τιμές αποθέματος του ταμιευτήρα του Μόρνου τις πλέον χαμηλές, αυτές δηλαδή που παρατηρήθηκαν αμέσως μετά τις μηδενικές (βλ. πίνακα 2 και πιο συγκεκριμένα βλ. πίνακα 4). Για κάθε τιμή από αυτές και για τις αντίστοιχες της ίδιας ημερομηνίας τιμές των ταμιευτήρων Εύηνος και Υλίκη, έγιναν προσομοιώσεις με ημερομηνία εκκίνησης την εκάστοτε δυσμενή ημερομηνία και αριθμό βημάτων 20 ημέρες. Στο τέλος κάθε προσομοίωσης γινόταν έλεγχος αν αστοχεί ο Μόρνος, αν δηλαδή "πατώνει" ο ταμιευτήρας του Μόρνου και γινόταν καταγραφή των ημερών που αυτός αστοχεί. Η διαδικασία συνεχίστηκε για αρκετές τιμές του αποθέματος του Μόρνου και διεκόπη, όταν επί μερικές τιμές δεν παρατηρούταν πια ούτε μια μέρα αστοχίας, κάτι που σήμαινε ότι από αυτές τις τιμές και κάτω δεν κινδύνευε πια με αστοχία ο Μόρνος και κατ' επέκταση ούτε και η υδροδότηση της Αθήνας. Στην συνέχεια αθροίστηκαν αυτές οι μέρες κατά τις οποίες παρατηρήθηκε αστοχία. Μετά υπολογίστηκε η πιθανότητα αστοχίας του κάθε υδραγωγείου ως εξής:

Το ποσοστό αστοχιών στα κανάλια υδραγωγείου (rate of failure in the aqueduct channels) του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, εκτός της Υλίκης, ισούται με 0.00154 events/km/yr (Kanakoudis, 2004). Το μήκος του υδραγωγείου Evinos-Mornos Tunnel είναι 30.018km, ενώ ο αριθμός των αστοχιών για αυτό το σενάριο αστοχίας είναι 655 ημέρες. Επομένως το ποσοστό αστοχιών ισούται με $0.00154 \text{ events/km/365d} * 30.018 \text{ km} * 655 \text{ d} = 0.083 \text{ events}$. Αντίστοιχα, το μήκος του υδραγωγείου Marathon-Helidonou είναι 13.02 km, ενώ ο αριθμός των αστοχιών για αυτό το σενάριο αστοχίας είναι 383 ημέρες. Επομένως το ποσοστό αστοχιών ισούται με $0.00154 \text{ events/km/365d} * 13.02 \text{ km} * 383 \text{ d} = 0.021 \text{ events}$.

Επομένως, η αξιοπιστία του Μόρνου με την εφαρμογή των δυο αυτών σεναρίων αστοχίας θα είναι:

Evinos-Mornos Tunnel: $1 - (91 + 0.083) / 36524 = 99.75\%$

Marathon-Helidonou: $1 - (91 + 0.021) / 36524 = 99.75\%$

Time stamp	Hylke (454), Component - Surface water (L or mm)	Time stamp	Mornos (455), Component - Surface water (L or mm)	Time stamp	Evinos (366), Component - Surface water (L or mm)
15/10/2046	8.88E+10	15/10/2046	3174816	15/10/2046	2.38E+10
18/10/2046	8.91E+10	18/10/2046	63567904	18/10/2046	2.38E+10
30/10/2046	9.04E+10	30/10/2046	81245920	30/10/2046	2.39E+10
27/10/2046	9.00E+10	27/10/2046	178953888	27/10/2046	2.39E+10
11/10/2046	8.85E+10	11/10/2046	411056384	11/10/2046	2.34E+10
2/10/2046	8.79E+10	2/10/2046	438761600	2/10/2046	2.35E+10
8/10/2046	8.83E+10	8/10/2046	455561472	8/10/2046	2.35E+10
23/10/2046	8.96E+10	23/10/2046	468855168	23/10/2046	2.35E+10
18/7/2046	1.23E+11	18/7/2046	490090880	18/7/2046	2.32E+10
14/10/2046	8.87E+10	14/10/2046	499097728	14/10/2046	2.34E+10
5/10/2046	8.81E+10	5/10/2046	513107904	5/10/2046	2.35E+10
20/10/2046	8.93E+10	20/10/2046	515276672	20/10/2046	2.35E+10
29/10/2046	9.03E+10	29/10/2046	538797376	29/10/2046	2.35E+10
17/10/2046	8.90E+10	17/10/2046	542779200	17/10/2046	2.35E+10
26/10/2046	8.99E+10	26/10/2046	601694464	26/10/2046	2.35E+10
2/11/2046	9.12E+10	2/11/2046	748833728	2/11/2046	2.39E+10
1/11/2046	9.09E+10	1/11/2046	894759552	1/11/2046	2.35E+10

4/11/2046	9.19E+10	4/11/2046	1.02E+09	4/11/2046	2.43E+10
3/11/2046	9.15E+10	3/11/2046	1.10E+09	3/11/2046	2.39E+10
17/7/2046	1.24E+11	17/7/2046	1.43E+09	17/7/2046	2.32E+10
6/11/2046	9.26E+10	6/11/2046	1.73E+09	6/11/2046	2.40E+10
5/11/2046	9.22E+10	5/11/2046	1.89E+09	5/11/2046	2.36E+10
16/7/2046	1.24E+11	16/7/2046	2.38E+09	16/7/2046	2.31E+10
9/11/2046	9.36E+10	9/11/2046	2.39E+09	9/11/2046	2.42E+10
8/11/2046	9.33E+10	8/11/2046	2.52E+09	8/11/2046	2.38E+10
7/11/2046	9.29E+10	7/11/2046	2.62E+09	7/11/2046	2.34E+10
11/11/2046	9.43E+10	11/11/2046	3.15E+09	11/11/2046	2.40E+10
10/11/2046	9.40E+10	10/11/2046	3.27E+09	10/11/2046	2.36E+10
15/7/2046	1.25E+11	15/7/2046	3.34E+09	15/7/2046	2.31E+10
14/11/2046	9.53E+10	14/11/2046	3.75E+09	14/11/2046	2.42E+10
13/11/2046	9.50E+10	13/11/2046	3.86E+09	13/11/2046	2.38E+10
12/11/2046	9.47E+10	12/11/2046	3.99E+09	12/11/2046	2.34E+10
14/7/2046	1.26E+11	14/7/2046	4.31E+09	14/7/2046	2.30E+10
16/11/2046	9.60E+10	16/11/2046	4.52E+09	16/11/2046	2.40E+10
15/11/2046	9.57E+10	15/11/2046	4.63E+09	15/11/2046	2.36E+10
19/11/2046	9.70E+10	19/11/2046	5.05E+09	19/11/2046	2.42E+10
18/11/2046	9.67E+10	18/11/2046	5.20E+09	18/11/2046	2.39E+10
13/7/2046	1.27E+11	13/7/2046	5.21E+09	13/7/2046	2.30E+10
17/11/2046	9.64E+10	17/11/2046	5.33E+09	17/11/2046	2.35E+10
21/11/2046	9.77E+10	21/11/2046	5.79E+09	21/11/2046	2.40E+10
20/11/2046	9.73E+10	20/11/2046	5.92E+09	20/11/2046	2.36E+10
12/7/2046	1.27E+11	12/7/2046	6.09E+09	12/7/2046	2.30E+10
24/11/2046	9.87E+10	24/11/2046	6.42E+09	24/11/2046	2.42E+10
23/11/2046	9.83E+10	23/11/2046	6.57E+09	23/11/2046	2.38E+10
22/11/2046	9.80E+10	22/11/2046	6.71E+09	22/11/2046	2.34E+10
11/7/2046	1.28E+11	11/7/2046	6.99E+09	11/7/2046	2.29E+10
26/11/2046	9.93E+10	26/11/2046	7.18E+09	26/11/2046	2.40E+10
25/11/2046	9.90E+10	25/11/2046	7.31E+09	25/11/2046	2.36E+10
28/11/2046	1.00E+11	28/11/2046	7.82E+09	28/11/2046	2.39E+10
29/11/2046	1.00E+11	29/11/2046	7.89E+09	29/11/2046	2.41E+10
27/11/2046	9.96E+10	27/11/2046	7.93E+09	27/11/2046	2.35E+10
10/7/2046	1.29E+11	10/7/2046	7.93E+09	10/7/2046	2.29E+10

Πίνακας 2. Τιμές των αποθεμάτων των τριών ταμειυτήρων για τιμές αποθέματος του Μόρνου μετά τις μηδενικές.

5.9 Excel-UWOT

Οι αστοχίες στα υδραγωγεία του συστήματος μετά από προσομοιώσεις στο UWOT και για τα 6 σενάρια αστοχίας, δηλαδή για τις 6 διαφορετικές βλάβες που θεωρήσαμε σε 6 στοιχεία (components) του UWOT. Οι παρακάτω τιμές που εμφανίζονται στους πίνακες δηλώνουν το έλλειμμα που παρατηρήθηκε την εκάστοτε μέρα, δηλαδή ότι έχουν εξαντληθεί τα αποθέματα του ταμιευτήρα ή δεν επαρκούν για να καλύψουν τη ζήτηση. Έτσι για παράδειγμα, παίρνοντας την πρώτη τιμή του πρώτου πίνακα έχουμε ότι, στις 2/10/2046 για να μην υπάρξει κάποιο πρόβλημα όσον αφορά την κάλυψη της ζήτησης θα πρέπει να υπήρχε επιπλέον νερό εκείνη τη μέρα ίσο με 12624256 λίτρα (οι παρακάτω τιμές είναι σε λίτρα νερού). Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι σε κάθε προσομοίωση που έγινε χρησιμοποιήθηκε σαν βήμα προσομοίωσης (simulationstep) οι 20 μέρες, γιατί σύμφωνα με τον Κανακούδη (2004), η διάρκεια επισκευής κάποιας βλάβης στο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας ισούται με 20 μέρες. Γι' αυτό και κάθε προσομοίωση δίνει 20 τιμές.

1) Marathon – Helidonou

2/10/2046	12624256
3/10/2046	0
4/10/2046	0
5/10/2046	0
6/10/2046	0
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	0
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	3853952
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	0
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	0
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	0

5/10/2046	12624256
6/10/2046	0
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	0
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	0
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	3853952
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	0
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	0
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	0

11/10/2046	12624256
12/10/2046	0
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	0
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	0
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	3853952
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	0
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	0
28/10/2046	0
29/10/2046	0
30/10/2046	0

8/10/2046	12624256
9/10/2046	0
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	0
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	0
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	3853952
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	0
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	0
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	0

15/10/2046	12624256
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	0
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	0
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	0
25/10/2046	3853952
26/10/2046	0
27/10/2046	0
28/10/2046	0
29/10/2046	0
30/10/2046	0
31/10/2046	0
1/11/2046	0
2/11/2046	0
3/11/2046	0

Αστοχία στο UWOT component Mandra-Menidi τις μέρες που φαίνονται από τους πάνω πίνακες.

2/10/2046	275694144
3/10/2046	651563200
4/10/2046	0
5/10/2046	127604928
6/10/2046	571668160
7/10/2046	0
8/10/2046	214327104
9/10/2046	640605248
10/10/2046	0
11/10/2046	306233536
12/10/2046	697866304
13/10/2046	0
14/10/2046	204083392
15/10/2046	606002496
16/10/2046	0
17/10/2046	149677888
18/10/2046	537745600
19/10/2046	0
20/10/2046	95443776
21/10/2046	565209280

5/10/2046	201347840
6/10/2046	651563200
7/10/2046	0
8/10/2046	127604928
9/10/2046	571668160
10/10/2046	0
11/10/2046	214327104
12/10/2046	640605248
13/10/2046	0
14/10/2046	306233536
15/10/2046	697866304
16/10/2046	0
17/10/2046	204083392
18/10/2046	606002496
19/10/2046	0
20/10/2046	149677888
21/10/2046	537745600
22/10/2046	0
23/10/2046	95443776
24/10/2046	565209280

11/10/2046	303399360
12/10/2046	651563200
13/10/2046	0
14/10/2046	128050240
15/10/2046	571668160
16/10/2046	0
17/10/2046	214770496
18/10/2046	640605248
19/10/2046	0
20/10/2046	482548928
21/10/2046	697866304
22/10/2046	0
23/10/2046	203739456
24/10/2046	606002496
25/10/2046	0
26/10/2046	55411648
27/10/2046	537745600
28/10/2046	0
29/10/2046	95521344
30/10/2046	565209280

8/10/2046	258894272
9/10/2046	651563200
10/10/2046	0
11/10/2046	127604928
12/10/2046	571668160
13/10/2046	0
14/10/2046	214327104
15/10/2046	640605248
16/10/2046	0
17/10/2046	306233536
18/10/2046	697866304
19/10/2046	0
20/10/2046	204083392
21/10/2046	606002496
22/10/2046	0
23/10/2046	149677888
24/10/2046	537745600
25/10/2046	0
26/10/2046	95443776
27/10/2046	565209280

15/10/2046	711280896
16/10/2046	0
17/10/2046	214734528
18/10/2046	564544576
19/10/2046	0
20/10/2046	149648832
21/10/2046	636456896
22/10/2046	0
23/10/2046	275988672
24/10/2046	670960192
25/10/2046	0
26/10/2046	336881728
27/10/2046	565177280
28/10/2046	0
29/10/2046	475687232
30/10/2046	282193984
31/10/2046	0
1/11/2046	60658368
2/11/2046	572630336
3/11/2046	0

Αστοχία στο UWOT component Mornos τις μέρες που φαίνονται από τους πάνω πίνακες.

2) Marathon – connecting 2

2/10/2046	51917632
3/10/2046	441314112
4/10/2046	0
5/10/2046	0
6/10/2046	79122688
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	208669952
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	341575808
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	167063616
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	89794688
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	37916544

5/10/2046	0
6/10/2046	418852160
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	79058496
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	208603392
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	341507968
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	166998720
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	89734336
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	37854144

11/10/2046	79537088
12/10/2046	441237184
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	79341440
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	208878720
19/10/2046	0
20/10/2046	49418560
21/10/2046	468239680
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	166551552
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	0
28/10/2046	0
29/10/2046	0
30/10/2046	33175232

8/10/2046	35073344
9/10/2046	441270592
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	78994560
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	208537472
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	341440384
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	166933056
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	89674176
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	37791616

15/10/2046	487382944
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	153239808
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	150993856
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	297548672
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	254879552
28/10/2046	0
29/10/2046	32525184
30/10/2046	102709952
31/10/2046	0
1/11/2046	0
2/11/2046	10219264
3/11/2046	0

Αστοχία στο UWOT component Μορνος τις μέρες που φαίνονται από τους πάνω πίνακες.

3) Mavrosouvala

2/10/2046	51917632
3/10/2046	441316416
4/10/2046	0
5/10/2046	0
6/10/2046	79142144
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	208709248
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	341636864
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	167144128
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	89884864
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	38024192

5/10/2046	0
6/10/2046	418854464
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	79078144
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	208642816
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	341569280
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	167078784
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	89824384
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	37961792

11/10/2046	79537088
12/10/2046	441239360
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	79361088
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	208917760
19/10/2046	0
20/10/2046	49455680
21/10/2046	468263488
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	166631744
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	0
28/10/2046	0
29/10/2046	0
30/10/2046	33372608

8/10/2046	35073344
9/10/2046	441272896
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	79014144
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	208576384
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	341501696
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	167013568
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	89764096
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	37899264

15/10/2046	487382944
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	153253248
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	151026368
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	297601024
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	254953664
28/10/2046	0
29/10/2046	32586688
30/10/2046	102736960
31/10/2046	0
1/11/2046	0
2/11/2046	10322560
3/11/2046	0

Αστοχία στο UWOT component Μορνος τις μέρες που φαίνονται από τους πάνω πίνακες.

4) Yliki-Ougra

2/10/2046	51917632
3/10/2046	441316544
4/10/2046	0
5/10/2046	0
6/10/2046	79142976
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	208710784
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	341638656
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	167145664
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	89886272
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	38025600

5/10/2046	0
6/10/2046	418854592
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	79078976
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	208644224
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	341571072
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	167080256
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	89825600
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	37962880

11/10/2046	79537088
12/10/2046	441239488
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	79361856
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	208919168
19/10/2046	0
20/10/2046	49456704
21/10/2046	468264000
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	166632896
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	0
28/10/2046	0
29/10/2046	0
30/10/2046	33374272

8/10/2046	35073344
9/10/2046	441273024
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	79014976
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	208577920
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	341503232
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	167014784
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	89765056
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	37900096

15/10/2046	487382944
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	153253824
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	151027136
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	297602432
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	254954432
28/10/2046	0
29/10/2046	32587136
30/10/2046	102737088
31/10/2046	0
1/11/2046	0
2/11/2046	10323008
3/11/2046	0

Αστοχία στο UWOT component Μορνος τις μέρες που φαίνονται από τους πάνω πίνακες.

5) Distomo connecting

2/10/2046	152141632
3/10/2046	541538112
4/10/2046	0
5/10/2046	0
6/10/2046	379760384
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	509305856
10/10/2046	0
11/10/2046	73695680
12/10/2046	568523968
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	467699904
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	390434560
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	338554240

5/10/2046	77781248
6/10/2046	541516352
7/10/2046	0
8/10/2046	0
9/10/2046	379696512
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	509239296
13/10/2046	0
14/10/2046	73651392
15/10/2046	568500544
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	467634688
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	390373952
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	338491712

11/10/2046	179761088
12/10/2046	541461184
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	379979392
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	509514496
19/10/2046	0
20/10/2046	249854656
21/10/2046	568463680
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	467187648
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	296012672
28/10/2046	0
29/10/2046	0
30/10/2046	338438208

8/10/2046	135297344
9/10/2046	541494592
10/10/2046	0
11/10/2046	0
12/10/2046	379632512
13/10/2046	0
14/10/2046	0
15/10/2046	509173376
16/10/2046	0
17/10/2046	73607232
18/10/2046	568477248
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	467569408
22/10/2046	0
23/10/2046	0
24/10/2046	390313920
25/10/2046	0
26/10/2046	0
27/10/2046	338429248

15/10/2046	587606912
16/10/2046	0
17/10/2046	0
18/10/2046	453877440
19/10/2046	0
20/10/2046	0
21/10/2046	451629888
22/10/2046	0
23/10/2046	41694528
24/10/2046	556495168
25/10/2046	0
26/10/2046	84078784
27/10/2046	471448000
28/10/2046	0
29/10/2046	232961152
30/10/2046	202933952
31/10/2046	0
1/11/2046	0
2/11/2046	310855744
3/11/2046	0

Αστοχία στο UWOT component Μορνος τις μέρες που φαίνονται από τους πάνω πίνακες.

6) Evinos Tunnel

2/10/2008	51917632
3/10/2008	441314112
4/10/2008	371472512
5/10/2008	360963072
6/10/2008	367102272
7/10/2008	386996928
8/10/2008	417553088
9/10/2008	424715840
10/10/2008	436988480
11/10/2008	456697536
12/10/2008	468688832
13/10/2008	435486656
14/10/2008	371717952
15/10/2008	380779712
16/10/2008	355750272
17/10/2008	323764352
18/10/2008	337299328
19/10/2008	339108608
20/10/2008	355435456
21/10/2008	364916352

5/10/2046	0
6/10/2046	418852160
7/10/2046	371450624
8/10/2046	360942016
9/10/2046	367081152
10/10/2046	386975168
11/10/2046	417530688
12/10/2046	424693568
13/10/2046	436966080
14/10/2046	456675648
15/10/2046	468665408
16/10/2046	435463872
17/10/2046	371698240
18/10/2046	380756928
19/10/2046	355728384
20/10/2046	323746240
21/10/2046	337279040
22/10/2046	339088128
23/10/2046	355413568
24/10/2046	364896192

11/10/2046	79537088
12/10/2046	441237184
13/10/2046	371395008
14/10/2046	360888704
15/10/2046	367027584
16/10/2046	386920128
17/10/2046	417473472
18/10/2046	424637376
19/10/2046	436909248
20/10/2046	456619968
21/10/2046	468605888
22/10/2046	435406016
23/10/2046	371648192
24/10/2046	380698688
25/10/2046	355672384
26/10/2046	323700032
27/10/2046	337227392
28/10/2046	339035776
29/10/2046	355357824
30/10/2046	364844736

8/10/2046	35073344
9/10/2046	441270592
10/10/2046	371428736
11/10/2046	360921024
12/10/2046	367059968
13/10/2046	386953536
14/10/2046	417508160
15/10/2046	424671424
16/10/2046	436943808
17/10/2046	456653760
18/10/2046	468641984
19/10/2046	435441216
20/10/2046	371678592
21/10/2046	380734016
22/10/2046	355706368
23/10/2046	323728128
24/10/2046	337258816
25/10/2046	339067584
26/10/2046	355391680
27/10/2046	364876096

15/10/2046	487382944
16/10/2046	441251136
17/10/2046	371409152
18/10/2046	360902272
19/10/2046	367041344
20/10/2046	386934336
21/10/2046	417488320
22/10/2046	424652096
23/10/2046	436924224
24/10/2046	456634560
25/10/2046	468621760
26/10/2046	435421504
27/10/2046	371661440
28/10/2046	380714304
29/10/2046	355687424
30/10/2046	323712576
31/10/2046	337241472
1/11/2046	339050112
2/11/2046	355373056
3/11/2046	364859008

Αστοχία στο UWOT component Μορνός τις μέρες που φαίνονται από τους πάνω πίνακες.

Βήματα εύρεσης απομείωσης αξιοπιστίας λόγω αστοχιών στα εξωτερικά υδραγωγεία με μορφή πινάκων.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέρες οι οποίες “πατώνει” ο ταμιευτήρας του Μόρνου.

Time stamp	Mornos (455), Component - Surface water (L or mm)	Time stamp	Mornos (455), Component - Surface water (L or mm)
30/9/2046	0	1/9/2046	0
29/9/2046	0	31/8/2046	0
3/10/2046	0	30/8/2046	0
28/9/2046	0	29/8/2046	0
27/9/2046	0	28/8/2046	0
1/10/2046	0	27/8/2046	0
6/10/2046	0	26/8/2046	0
4/10/2046	0	25/8/2046	0
26/9/2046	0	24/8/2046	0
9/10/2046	0	23/8/2046	0
12/10/2046	0	22/8/2046	0
25/9/2046	0	21/8/2046	0
7/10/2046	0	20/8/2046	0
24/9/2046	0	19/8/2046	0
10/10/2046	0	18/8/2046	0
23/9/2046	0	17/8/2046	0
22/9/2046	0	16/8/2046	0
13/10/2046	0	15/8/2046	0
21/9/2046	0	14/8/2046	0
20/9/2046	0	13/8/2046	0
16/10/2046	0	12/8/2046	0
19/9/2046	0	11/8/2046	0
18/9/2046	0	10/8/2046	0
21/10/2046	0	9/8/2046	0
19/10/2046	0	8/8/2046	0
24/10/2046	0	7/8/2046	0
17/9/2046	0	6/8/2046	0
22/10/2046	0	5/8/2046	0
16/9/2046	0	4/8/2046	0
15/9/2046	0	3/8/2046	0
14/9/2046	0	2/8/2046	0
13/9/2046	0	1/8/2046	0
25/10/2046	0	31/7/2046	0

12/9/2046	0	30/7/2046	0
11/9/2046	0	29/7/2046	0
10/9/2046	0	28/7/2046	0
28/10/2046	0	27/7/2046	0
9/9/2046	0	26/7/2046	0
31/10/2046	0	25/7/2046	0
8/9/2046	0	24/7/2046	0
7/9/2046	0	23/7/2046	0
6/9/2046	0	22/7/2046	0
5/9/2046	0	21/7/2046	0
4/9/2046	0	20/7/2046	0
3/9/2046	0	19/7/2046	0
2/9/2046	0		

Πίνακας 3. Οι μέρες κατά τις οποίες ο ταμιευτήρας του Μόρνου έχει μηδενικές τιμές αποθέματος νερού.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι πλέον χαμηλές τιμές του αποθέματος του ταμιευτήρα του Μόρνου, οι οποίες στην ουσία είναι οι τιμές που παρατηρήθηκαν αμέσως μετά το πέρας των μηδενικών και για τις οποίες έγιναν οι έλεγχοι για την αξιοπιστία αυτού.

Time stamp	Mornos (455), Component - Surface water (L or mm)	Time stamp	Mornos (455), Component - Surface water (L or mm)
15/10/2046	3174816	11/11/2046	3.15E+09
18/10/2046	63567904	10/11/2046	3.27E+09
30/10/2046	81245920	15/7/2046	3.34E+09
27/10/2046	178953888	14/11/2046	3.75E+09
11/10/2046	411056384	13/11/2046	3.86E+09
2/10/2046	438761600	12/11/2046	3.99E+09
8/10/2046	455561472	14/7/2046	4.31E+09
23/10/2046	468855168	16/11/2046	4.52E+09
18/7/2046	490090880	15/11/2046	4.63E+09
14/10/2046	499097728	19/11/2046	5.05E+09
5/10/2046	513107904	18/11/2046	5.20E+09
20/10/2046	515276672	13/7/2046	5.21E+09
29/10/2046	538797376	17/11/2046	5.33E+09

17/10/2046	542779200	21/11/2046	5.79E+09
26/10/2046	601694464	20/11/2046	5.92E+09
2/11/2046	748833728	12/7/2046	6.09E+09
1/11/2046	894759552	24/11/2046	6.42E+09
4/11/2046	1.02E+09	23/11/2046	6.57E+09
3/11/2046	1.10E+09	22/11/2046	6.71E+09
17/7/2046	1.43E+09	11/7/2046	6.99E+09
6/11/2046	1.73E+09	26/11/2046	7.18E+09
5/11/2046	1.89E+09	25/11/2046	7.31E+09
16/7/2046	2.38E+09	28/11/2046	7.82E+09
9/11/2046	2.39E+09	29/11/2046	7.89E+09
8/11/2046	2.52E+09	27/11/2046	7.93E+09
7/11/2046	2.62E+09	10/7/2046	7.93E+09

Πίνακας 4. Οι χαμηλότερες τιμές των 100 χρόνων (αμέσως μετά τις μηδενικές) του αποθέματος του ταμιευτήρα του Μόρνου.

Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο Μελέτη απομείωσης αξιοπιστίας λόγω αστοχιών στα εξωτερικά υδραγωγεία παρατίθενται οι ακόλουθοι πίνακες.

5.10 Οι μέρες που επήλθε αστοχία στο Μόρνο.

5.10.1 Για το Evinos-Mornos tunnel

15/10/2046	2.00E+01	11/11/2046	1.30E+01
18/10/2046	2.00E+01	10/11/2046	1.20E+01
30/10/2046	2.00E+01	15/7/2046	1.20E+01
27/10/2046	2.00E+01	14/11/2046	1.10E+01
11/10/2046	2.00E+01	13/11/2046	1.10E+01
2/10/2046	2.00E+01	12/11/2046	1.10E+01
8/10/2046	2.00E+01	14/7/2046	1.00E+01
23/10/2046	2.00E+01	16/11/2046	1.00E+01
18/7/2046	2.00E+01	15/11/2046	9.00E+00
14/10/2046	2.00E+01	19/11/2046	9.00E+00
5/10/2046	2.00E+01	18/11/2046	8.00E+00
20/10/2046	2.00E+01	13/7/2046	8.00E+00
29/10/2046	2.00E+01	17/11/2046	8.00E+00
17/10/2046	2.00E+01	21/11/2046	7.00E+00
26/10/2046	2.00E+01	20/11/2046	6.00E+00
2/11/2046	2.00E+01	12/7/2046	6.00E+00
1/11/2046	2.00E+01	24/11/2046	5.00E+00
4/11/2046	1.80E+01	23/11/2046	4.00E+00

3/11/2046	1.80E+01	22/11/2046	4.00E+00
17/7/2046	1.70E+01	11/7/2046	3.00E+00
6/11/2046	1.60E+01	26/11/2046	2.00E+00
5/11/2046	1.60E+01	25/11/2046	2.00E+00
16/7/2046	1.50E+01	28/11/2046	1.00E+00
9/11/2046	1.50E+01	29/11/2046	0.00E+00
8/11/2046	1.40E+01	27/11/2046	0.00E+00
7/11/2046	1.40E+01	10/7/2046	0.00E+00

Πίνακας 5. Οι συνολικές μέρες που επήλθε αστοχία στον ταμιευτήρα του Μόρνου, για κάθε μια μέρα στην οποία παρατηρήθηκε χαμηλή τιμή αποθέματος αυτού- Βλάβη στο Evinos-Mornos tunnel.

5.10.2 Για το Marathon-Helidonou

15/10/2046	1.30E+01	11/11/2046	6.00E+00
18/10/2046	1.30E+01	10/11/2046	7.00E+00
30/10/2046	1.40E+01	15/7/2046	8.00E+00
27/10/2046	1.40E+01	14/11/2046	4.00E+00
11/10/2046	1.40E+01	13/11/2046	5.00E+00
2/10/2046	1.40E+01	12/11/2046	7.00E+00
8/10/2046	1.40E+01	14/7/2046	6.00E+00
23/10/2046	1.40E+01	16/11/2046	3.00E+00
18/7/2046	1.40E+01	15/11/2046	4.00E+00
14/10/2046	1.40E+01	19/11/2046	0.00E+00
5/10/2046	1.40E+01	18/11/2046	2.00E+00
20/10/2046	1.40E+01	13/7/2046	4.00E+00
29/10/2046	1.40E+01	17/11/2046	3.00E+00
17/10/2046	1.40E+01	21/11/2046	0.00E+00
26/10/2046	1.40E+01	20/11/2046	0.00E+00
2/11/2046	1.20E+01	12/7/2046	2.00E+00
1/11/2046	1.30E+01	24/11/2046	0.00E+00
4/11/2046	1.00E+01	23/11/2046	0.00E+00
3/11/2046	1.20E+01	22/11/2046	0.00E+00
17/7/2046	1.20E+01	11/7/2046	0.00E+00
6/11/2046	1.00E+01	26/11/2046	0.00E+00
5/11/2046	1.00E+01	25/11/2046	0.00E+00
16/7/2046	1.00E+01	28/11/2046	0.00E+00
9/11/2046	8.00E+00	29/11/2046	0.00E+00
8/11/2046	8.00E+00	27/11/2046	0.00E+00
7/11/2046	9.00E+00	10/7/2046	0.00E+00

Πίνακας 6. Οι συνολικές μέρες που επήλθε αστοχία στον ταμιευτήρα του Μόρνου, για κάθε μια μέρα στην οποία παρατηρήθηκε χαμηλή τιμή αποθέματος αυτού- Βλάβη στο Marathon-Helidonου.

Προκύπτει αξιοπιστία για το Μόρνο (όπως αναφέρεται και στην αντίστοιχη παράγραφο) ίση με 99,75% για βλάβη στο component Evinos-Mornos tunnelκαι 99,75% για βλάβη στο component Marathon-Helidonου.

Περιγραφή των αποτελεσμάτων του UWOT-Συμπεράσματα

Σενάρια αστοχίας

1) Στο σενάριο αστοχίας όπου επεβλήθη βλάβη στο Marathon-Helidonou και για τις 5 δυσμενέστερες μέρες όπου έγιναν οι προσομοιώσεις, παρατηρήθηκε αστοχία στο στοιχείο Mandra-Menidi και στο στοιχείο Mornos. Στο στοιχείο Mandra-Menidi βλέπουμε ότι και για τις 5 προσομοιώσεις που έγιναν υπάρχουν δυο συγκεκριμένες φορές που παρατηρείται αστοχία και αυτές είναι η 1^η και η 11^η μέρα. Τις δύο αυτές μέρες λοιπόν παρατηρείται έλλειμμα 12624256 και 3853952 λίτρα νερού. Έτσι, έπρεπε να γίνουν δοκιμές, ώστε να δούμε εάν με κάποιο τρόπο μπορεί να επιτευχτεί επανόρθωση αυτής της αστοχίας και απουσίας αυτού του ελλείμματος.

Στην 2^η πιο δυσμενέστερη μέρα και συγκεκριμένα στις 5/10/2046, πειράζοντας το splitterανάντη του στοιχείου Marathon-Helidonou, όπου επεβλήθη βλάβη (στο UWOT), έγινε προσπάθεια εξάλειψης ή στην χειρότερη περίπτωση περιορισμού του προβλήματος. Ρυθμίζοντας το splitterστο 95% (να σημειωθεί εδώ ότι όταν λέμε βλάβη εννοούμε ότι ο splitter ρυθμίζεται στο 0% ή στο 100% ώστε να μην περνάει από εκεί καθόλου νερό) δεν υπάρχει πια το πρόβλημα με το στοιχείο Mandra-Menidi, ενώ στο Μόρνο παρατηρείται μόνο μια μέρα αστοχία. Αν πάμε το splitter στο 100%, που σημαίνει ότι όλη η ζήτηση στην συγκεκριμένη περιοχή θα χρησιμοποιηθεί από τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα, κάτι που συνεπάγεται ότι θα είναι εντάξει και το Mandra-Menidi και ο Mornos, αλλά θα επέλθει αστοχία την τελευταία μέρα από τις 20 στον ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Έτσι, με δοκιμές προέκυψε ότι για splitter 97% και πάνω, δηλαδή αφήνοντας ένα περιθώριο ώστε να μην παίρνουμε όλη τη ζήτηση από το Μαραθώνα, δεν επέρχεται σε κανένα από τα δύο στοιχεία αστοχία.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες μέρες. Συγκεκριμένα, την 3^η πιο δυσμενέστερη, δηλαδή στις 11/10/2046, με splitter 97% αστοχεί μόνο ο Μόρνος για μια μέρα (το Mandra-Menidi όπως και πριν είναι εντάξει), ενώ για 99% αστοχεί τη δεύτερη μέρα. Για 100%επέρχεται αστοχία την τελευταία μέρα από τις 20 στον ταμιευτήρα του Μαραθώνα, όπως προηγουμένως, ωστόσο εξακολουθεί να παρατηρείται αστοχία στο Μόρνο τη δεύτερη μέρα.

Για την περίπτωση της 4^{ης} πιο δυσμενέστερης μέρας, δηλαδή στις 8/10/2046, παρατηρούνται τα ίδια με την άνω περίπτωση.

Για την περίπτωση της 5^{ης} πιο δυσμενέστερης μέρας, δηλαδή στις 15/10/2046, το καλύτερο που μπορεί να γίνει είναι η ρύθμιση του splitter στο 98%, οπότε και παρατηρείται μόνο την πρώτη μέρα αστοχία στο Μόρνο.

2) Στο σενάριο αστοχίας όπου επεβλήθη βλάβη στο Marathon-connecting 2, βλέπουμε ότι παρατηρείται και στις 5 περιπτώσεις αστοχία στο Μόρνο. Ωστόσο, και 0% να έμπαινε ο splitter (τον θεωρούμε 100% στην περίπτωση της βλάβης) δεν επιτυγχάνεται η εξάλειψη της αστοχίας, η οποία παραμένει.

3) Στο σενάριο αστοχίας όπου επεβλήθη βλάβη στο Manrosounala, ισχύει ότι και στην παραπάνω περίπτωση. Δηλαδή, ακόμα και να πάρουμε όλη τη ζήτηση αντλώντας νερό κατά 100% από τη γεώτρηση στην περιοχή Μαυροσουβάλα, πάλι παραμένει η αστοχία.

4) Στο σενάριο αστοχίας όπου επεβλήθη βλάβη στο Yliki-Ougra, ισχύει ότι και στην παραπάνω περίπτωση, δηλαδή ακόμα και να μεγιστοποιήσουμε την άντληση νερού από τη γεώτρηση στην περιοχή Υλίκη-Ούγγρα στη Εύβοια, πάλι δεν εξαλείφεται η αστοχία.

5) Στο σενάριο αστοχίας όπου επεβλήθη βλάβη στο Distomo connecting ισχύουν τα ίδια με πάνω, δηλαδή ακόμα και να μεγιστοποιήσουμε την άντληση νερού από τη γεώτρηση στην περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού (Βασιλικά-Παρόρι) πάλι δεν εξαλείφεται η αστοχία.

6) Η περίπτωση αστοχίας του Evinos-Mornos Tunnel αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση όλων αυτών των σεναρίων, καθώς και στις 5 περιπτώσεις παρατηρείται αστοχία στο Μόρνο για κάθε μια από τις 20 μέρες που διαρκεί η επισκευή. Αυτό οφείλεται στο ότι όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, ο ταμιευτήρας του Εύηνου σχεδιάστηκε για την ενίσχυση του βασικού ταμιευτήρα του Μόρνου, όπου μέσω της σήραγγας Εύηνου - Μόρνου, τα νερά του ταμιευτήρα του Εύηνου μεταφέρονται και διοχετεύονται στον ταμιευτήρα του Μόρνου. Έτσι, από την στιγμή που υπάρχει βλάβη στη σήραγγα αυτή, παρατηρείται και

εκτεταμένη αστοχία στον ταμιευτήρα του Μόρνου με καθημερινές παρουσίες ελλειμμάτων νερού.

Στην προσπάθεια για περιορισμό της αστοχίας αυτής έγιναν πολλές δοκιμές μέσω του προγράμματος UWOT, ρυθμίζοντας κάθε φορά κατάλληλα το splitter μέχρι να βρεθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Στην περίπτωση της δυσμενέστερης μέρας μέσα στα 100 χρόνια, δηλαδή στις 2/10/2046, με μια αρχική ρύθμιση του splitter στο 50% καταφέρνουμε να περιορίσουμε την αστοχία στις 8 μέρες από τις 20. Πηγαίνοντας το splitter στο 60% έχουμε αστοχία σε 6 μέρες αντί 20. Ρυθμίζοντας το splitter στο 70% αλλά και στο 80% παρατηρούμε ότι διατηρούνται οι 6 αστοχίες. Το ίδιο συμβαίνει και στο 90%. Πηγαίνοντας το splitter στο 95% καταφέρνουμε να περιορίσουμε την αστοχία στις 5 μέρες από τις 20. Ακόμα και στο 100% παραμένει η αστοχία στις 5 μέρες, δηλαδή βλέπουμε ότι από ένα σημείο και μετά, δηλαδή από 60%-90% και 95%-100%, οι αστοχίες παραμένουν στα ίδια επίπεδα και δεν επέρχεται περαιτέρω μείωση των αστοχιών.

Τα ίδια βήματα ακολουθήθηκαν και για τις υπόλοιπες 4 περιπτώσεις που έγιναν προσομοιώσεις και έλεγχοι αστοχίας. Για την περίπτωση στις 5/10/2046, με μια αρχική ρύθμιση του splitter στο 50% καταφέρνουμε να περιορίσουμε την αστοχία στις 7 μέρες από τις 19. (Είναι η μόνη περίπτωση που υπάρχει μία μέρα και συγκεκριμένα στις 5/10/2046, οπότε και δεν επέρχεται αστοχία.) Τελικά από 95% και πάνω επιτυγχάνεται να περιοριστεί η αστοχία στις 4 μέρες.

Για την 3^η δυσμενέστερη περίπτωση στις 11/10/2046, με μια αρχική ρύθμιση του splitter στο 50% καταφέρνουμε να περιορίσουμε την αστοχία στις 7 μέρες από τις 20. Το καλύτερο που επετεύχθη, ήταν ο περιορισμός των αστοχιών σε 6 μέρες.

Για την 4^η δυσμενέστερη περίπτωση στις 8/10/2046, με τον splitter στο 50% καταφέρνουμε να περιορίσουμε την αστοχία στις 8 μέρες από τις 20. Από 95% και πάνω επιτυγχάνεται να περιοριστεί η αστοχία στις 5 μέρες.

Τέλος, για την 5^η δυσμενέστερη περίπτωση στις 15/10/2046, με τον splitter στο 50% καταφέρνουμε να περιορίσουμε την αστοχία στις 7 μέρες από τις 20. Από 90% και πάνω επιτυγχάνεται να περιοριστεί η αστοχία στις 5 μέρες.

Βγαίνει λοιπόν το συμπέρασμα από όλες αυτές τις δοκιμές, ότι στην περίπτωση βλάβης στην σήραγγα Ευήνου – Μόρνου, δεν καταφέρνουμε να εξαλείψουμε το πρόβλημα που παρατηρείται σε συνθήκες ελλείμματος νερού, αλλά μόνο να το περιορίσουμε και συγκεκριμένα σε επίπεδο 4, 5 ή και 6 ημερών.

Επίσης, στα σενάρια 2,3,4,5 συμπεραίνουμε ότι ούτε εκεί καταφέρνουμε να εξαλείψουμε πλήρως το πρόβλημα, ακόμα και στην περίπτωση που μεγιστοποιήσουμε την άντληση νερού από τις αντίστοιχες γεωτρήσεις.

Αντίθετα, στο πρώτο σενάριο όπου θεωρήθηκε βλάβη στο στοιχείο του συστήματος Marathon-Helidonou, συμπεραίνουμε ότι καταφέρνουμε να εξαλείψουμε το πρόβλημα τόσο στο Mandra-Menidi όσο και στο Μόρνο, ή στην χειρότερη περίπτωση παρατηρείται μόνο μια μέρα αστοχία στο Μόρνο.

Στα προαναφερθέντα για τα 6 σενάρια αστοχίας, κατά τα οποία επεβλήθη βλάβη σε συγκεκριμένα στοιχεία του συστήματος, έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης για το καθένα από αυτά, έτσι ώστε για τις 20 μέρες που θα διαρκεί η επισκευή να περιοριστεί όσο γίνεται το έλλειμμα που παρατηρείται, σαν όμως να μην υπήρχε αστοχία σε αυτά τα 6 στοιχεία του συστήματος. Δηλαδή, παίρνοντας για παράδειγμα την αστοχία στο στοιχείο Marathon-Helidonou, όπου ο splitter θεωρήθηκε μηδενικός λόγω της βλάβης, έγιναν προσπάθειες βελτιστοποίησης του splitter, με δοκιμές και ελέγχους, ώστε να παρατηρείται το ελάχιστο πιθανό έλλειμμα.

Επίσης, έγινε και προσπάθεια περιορισμού των αστοχιών (ελλειμμάτων) στα στοιχεία όπου παρατηρήθηκαν αυτές, με την διατήρηση όμως αυτήν την φορά της βλάβης στα στοιχεία του συστήματος που επεβλήθη βλάβη, για το καθένα ξεχωριστά, ψάχνοντας εναλλακτικές πηγές υδροληψίας, ώστε να ανακουφιστούν τα στοιχεία που αστοχούν και να περιοριστεί το έλλειμμα. Αυτό έγινε πειράζοντας τα κατάλληλα splitters, ώστε να παίρνουμε περισσότερο νερό από κάποιες πηγές, όπως είναι οι ταμιευτήρες και οι γεωτρήσεις.

1) Στην περίπτωση αστοχίας στο στοιχείο Marathon-Helidonou, δεν δύνανται να τροποποιηθούν splitters, καθώς το στοιχείο αυτό βρίσκεται στο τέλος του

εξωτερικού υδραγωγείου της Αθήνας, κοντά στις μονάδες επεξεργασίας νερού του Λεκανοπεδίου της Αττικής και δεν υπάρχουν splitters κατάντη που θα μπορούσαν να ρυθμιστούν να πάρουν νερό από κάποια άλλη πηγή.

2) Στην περίπτωση αστοχίας στο στοιχείο Marathon-connecting 2, η μεγιστοποίηση των αντλήσεων από το Βοιωτικό Κηφισό και την περιοχή της Μαυροσουβάλας δε θα περιορίζει το πρόβλημα. Αυτό που μπορεί να το κάνει είναι η εκμετάλλευση του ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Αν λοιπόν πειραχτεί το splitter ανάντη της σήραγγας Marathon-Helidonou, ώστε να περνάει περισσότερη ζήτηση από εκεί, να παίρνουμε δηλαδή περισσότερο νερό από το Μαραθώνα από ότι παίρνουμε συνήθως, τότε περιορίζεται κατά πολύ η αστοχία και από εκεί που είχαμε 8 μέρες από τις 20 παρουσία ελλείμματος στο Μόρνο, τώρα η αστοχία περιορίζεται στη μία μέρα, ενώ για τη 2^η πιο δυσμενέστερη μέρα και συγκεκριμένα στις 5/10/2046, δεν υπάρχει καμία μέρα παρουσία ελλείμματος στο Μόρνο και αυτό γιατί εκείνη τη μέρα σε σχέση με τις υπόλοιπες τέσσερις το απόθεμα του Μόρνου είναι το πιο υψηλό. Με τιμές λοιπόν του splitter γύρω στο 90% έχουμε πολύ καλά αποτελέσματα. Επομένως με ρύθμιση του splitter στο 99%, δηλαδή αφήνοντας ένα περιθώριο ώστε να μην παίρνουμε όλη τη ζήτηση από το Μαραθώνα έχουμε τη μέγιστη μείωση στις αστοχίες. Για splitter 100% επέρχεται αστοχία την τελευταία μέρα από τις 20 στον ταμιευτήρα του Μαραθώνα.

3) Στην περίπτωση αστοχίας στο στοιχείο Μανγροσουβαλαδεν αλλάζει κάτι εάν αντλήσουμε περισσότερο νερό από την κοντινή γεώτρηση της περιοχής Υλίκη-Ούγγρα ή από αυτή στο Βοιωτικό Κηφισό στην περιοχή Βασιλικά-Παρόρι. Ωστόσο πετυχαίνουμε πολύ καλά αποτελέσματα αν πάρουμε περισσότερο νερό από το Μαραθώνα. Έτσι, αν ρυθμιστεί ο splitter όπως και πριν στο 99%, δηλαδή αφήνοντας ένα περιθώριο ώστε να μην παίρνουμε όλη τη ζήτηση από το Μαραθώνα, από 8 μέρες αστοχίας από τις 20 που είχαμε στο Μόρνο, τώρα περιοριζόμαστε μόνο στη μια, ενώ στην περίπτωση με αρχή της προσομοίωσης τις 5/10/2046, δεν παρατηρείται καμία μέρα έλλειμμα νερού.

4) Στην περίπτωση αστοχίας στο στοιχείο Yliki-Ougra, ισχύουν τα ίδια με την περίπτωση της Μαυροσουβάλας, ότι δηλαδή ειπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

5) Στην περίπτωση αστοχίας στο στοιχείο Distomoconnecting, το έλλειμμα περιορίζεται αν εκμεταλλευτούμε όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Έτσι, καταφέρνουμε όπως και πριν να περιορίσουμε το έλλειμμα σε μια μέρα, ή σε καμία για την περίπτωση στις 5/10/2046.

6) Στην περίπτωση αστοχίας στο στοιχείο Evinos-Mornostunnel, έγινε προσπάθεια περιορισμού του προβλήματος με εκμετάλλευση τόσο του Μαραθώνα όσο και της γεώτρησης στο Βοιωτικό Κηφισό στην περιοχή Βασιλικά-Παρόρι. Έτσι παρατηρήθηκε, ότι αν αυξήσουμε τον splitter που ρυθμίζει πόσο νερό παίρνουμε από την συγκεκριμένη γεώτρηση για να καλυφτεί η ζήτηση και κάνουμε τα ίδια όπως πριν για τον splitter ανάντη του στοιχείου Marathon-Helidonou, ώστε να πάρουμε περισσότερο νερό από το Μαραθώνα, έχουμε περιορισμό του προβλήματος και συγκεκριμένα πάνω από το μισό, δηλαδή παρατηρείται μείωση των ελλειμμάτων στο Μόρνο γύρω πάνω από το 50% έως και 60%, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρείται και μείωση της αστοχίας πάνω από 60%.

Επομένως βγαίνει το συμπέρασμα, ότι για τις περιπτώσεις με βλάβη στα στοιχεία Marathon-connecting 2, Mavrosouvala, Yliki-Ougra και Distomo connecting, επιτυγχάνονται πολύ καλά αποτελέσματα, δηλαδή μόνο μια μέρα αστοχία (ή και καμία στην περίπτωση στις 5/10/2046) στο Μόρνο, αν παίρνουμε περισσότερο νερό από το Μαραθώνα. Όσον αφορά την περίπτωση βλάβης στο Evinos-Mornos Tunnel, δεν μπορούμε να έχουμε τόσο καλά αποτελέσματα, δηλαδή εξάλειψη της αστοχίας, ωστόσο περιορίζονται πολύ τα ελλείμματα στο Μόρνο (γύρω στο 50-60% μείωση και λίγο παραπάνω ορισμένες φορές) αν αντλήσουμε περισσότερο νερό από τη γεώτρηση στην περιοχή Βασιλικά-Παρόρι στη Βοιωτία και φυσικά εκμεταλλευτούμε όπως και πριν τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα.

Μελέτη απομείωσης αξιοπιστίας λόγω αστοχιών στα εξωτερικά υδραγωγεία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην αντίστοιχη παράγραφο, έγινε μελέτη απομείωσης αξιοπιστίας λόγω αστοχιών στα εξωτερικά υδραγωγεία και συγκεκριμένα στα στοιχεία Marathon-Helidonou και Evinos-Mornos Tunnel, ώστε να δούμε κατά πόσο επηρεάζεται η αξιοπιστία του Μόρνου και κατά πόσο αποκλίνει από την αρχική αξιοπιστία που υπολογίστηκε, αυτή δηλαδή που δε λαμβάνει υπόψη κάποια βλάβη σε στοιχείο του υδραγωγείου, αλλά απλά τη διαθεσιμότητα των πόρων.

Στη δεύτερη αυτή περίπτωση, στην αξιοπιστία δηλαδή του συστήματος ως προς τη διαθεσιμότητα των πόρων, υπολογίστηκε ότι η αστοχία του Μόρνου ισούται με 0,25%, δηλαδή αξιοπιστία 99,75%, μιας και ο συνολικός αριθμός των ημερών που παρουσιάζει μηδενικό απόθεμα ο ταμιευτήρας του Μόρνου είναι 91 μέρες. (αξιοπιστία = $1 - 91/36524 = 99,75\%$.)

Με την συνεκτίμηση της βλάβης στο στοιχείο Marathon-Helidonou υπολογίστηκε ότι οι αστοχίες που παρατηρούνται είναι 0,021 και τοποθετώντας τις μαζί με τις ήδη υπάρχουσες 91, προκύπτει $1 - (91 + 0.021)/36524 = 99.75\%$ αξιοπιστία, ίδια δηλαδή με αυτή που είχαμε ήδη. Από αυτό βγαίνει το συμπέρασμα, ότι η συνεκτίμηση της βλάβης στο στοιχείο Marathon-Helidonou δίνει ένα πολύ μικρό ποσοστό συμμετοχής στην απομείωση της αξιοπιστίας του συστήματος, στην ουσία αμελητέο, μιας και το επίπεδο της αξιοπιστίας παραμένει στο ίδιο επίπεδο με το προηγούμενο, δηλαδή στο 99.75%. Το ίδιο συμβαίνει και με την περίπτωση της βλάβης στο στοιχείο Evinos-Mornos Tunnel, όπου παρατηρούνται 0.083 αστοχίες, αλλά η συμμετοχή τους εξακολουθεί να θεωρείται αμελητέα μιας και η αξιοπιστία του συστήματος παραμένει 99.75%.

Παράρτημα Α

Συνοπτικοί πίνακες

Ορισμοί - Προσεγγίσεις

<i>Survival Analysis</i>
είναι ένας κλάδος της στατιστικής που ασχολείται με την ανάλυση της χρονικής διάρκειας μέχρι ένα ή περισσότερα γεγονότα συμβούν
μια σειρά από μεθόδους για την ανάλυση των δεδομένων, όπου η μεταβλητή έκβασης (outcome variable) είναι ο χρόνος μέχρι την επέλευση (occurrence) ενός γεγονότος που μας ενδιαφέρει
<i>Regression analysis</i>
βοηθά στην κατανόηση του πώς η χαρακτηριστική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής (ή μεταβλητή κριτήριο) μεταβάλλεται, όταν οποιαδήποτε από τις ανεξάρτητες μεταβλητές αλλάζει, ενώ οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές παραμένουν σταθερές

<i>Censoring</i>
Λογοκρισία συμβαίνει όταν οι παρατηρήσεις έχουν ορισμένες πληροφορίες που διατίθενται για μια μεταβλητή, αλλά οι πληροφορίες δεν είναι πλήρεις. Αυτή η έλλειψη πληροφοριών προκύπτει όταν μια μεταβλητή μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μόνο εντός συγκεκριμένων ορίων.

Bayesian approach-inference

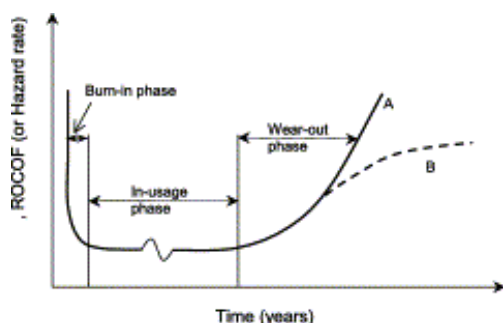
1. Διαμορφώνουμε τη γνώση μας για μια κατάσταση.
2. Συλλέγουμε στοιχεία.
3. Αποκτούμε μεταγενέστερη γνώση που δυναμώνει τα αρχικά μας πιστεύω.

Επιδείνωση αγωγών

Types of pipe deterioration

Structural deterioration	Hydraulic deterioration
μείωση στους σωλήνες της δομικής ανθεκτικότητας και της ικανότητάς τους να αντέχουν τα διάφορα είδη των τάσεων που τους επιβάλλονται	επιδείνωση της εσωτερικής επιφάνειας των σωλήνων με αποτέλεσμα την μειωμένη υδραυλική ικανότητα, την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και τη μείωση της δομικής ανθεκτικότητας σε περιπτώσεις σοβαρής εσωτερικής διάβρωσης

Bathtub curve



Είναι ένας συνδυασμός ενός φθίνοντος κινδύνου πρόωρης αστοχίας ("burn-in phase") και ενός αυξανόμενου κινδύνου τελικής αστοχίας, όπου πια ο αγωγός γηράσκει ("wear-out phase"), συν κάποιον σταθερό κίνδυνο τυχαίων σφαλμάτων στη μέση φάση ("in-usage phase").

Είδη αστοχίας

<i>Types of failure</i>	
Χυ και Goulter (1991)	(Tabesh, 1998)
<p>-Υδραυλική αστοχία ή αστοχία απόδοσης, η οποία οφείλεται στην ανικανότητα του δικτύου να παρέχει τη ζήτηση σχεδιασμού.</p> <p>-Μηχανική αστοχία ή αστοχία εξαρτημάτων, η οποία οφείλεται στην αστοχία των αντλιών, των βαλβίδων, των αγωγών κλπ. ή σε διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος.</p> <p>-Αστοχία λόγω μεταβολής της ζήτησης, η οποία προκαλείται όταν η πραγματική ζήτηση μαζί με την παροχή πυρκαγιάς υπερβαίνει την παροχή σχεδιασμού.</p>	<p>-Μηχανική βλάβη των συνιστωσών του συστήματος.</p> <p>-Υδραυλική βλάβη που προκαλείται από τις αλλαγές στη ζήτηση και την πίεση κεφαλής.</p>

Ποσοστό αποτυχίας

<i>Models of failure rate</i>			
Samir and Howard (1979)	Kettler and Goulter (1985)	Su <i>et al.</i> , (1987)	Ahn <i>et al.</i> , (2005)
$\lambda(t) = \lambda(t_0)e^{\alpha(t-t_0)}$	η τάση των μεταβολών της ηλικίας είναι γραμμική και δείχνει την ίδια αύξηση του αριθμού των αποτυχιών σε κάθε χρόνο	$\lambda = 0.6858/D_i^{3.28} + 2.7158/D_i^{1.3131} + 2.7658/D_i^{3.5792} + 0.42$	η διακύμανση των αποτυχιών σε σωλήνες, απέναντι στις θερμοκρασίες του εδάφους, του νερού και του αέρα με διαδικασία βασισμένη στο ANN

Ντετερμινιστικά μοντέλα

<i>Time exponential models</i>		
Shamir and Howard (1979)	Walski and Pellissia (1982)	Clark <i>et al.</i> , (1982)
$N(t) = N(t_0)e^{A(t+g)}$	$N(t) = C_1 C_2 N(t_0)e^{A(t+g)}$	$NY = x_1 + x_2 D + x_3 P + x_4 I + x_5 RES + x_6 LH + x_7 T$

<i>Time linear models</i>	
Kettler και Goulter (1985)	McMullen (1982)
$N = k_0 \text{Age}$	$\text{Age} = 65.78 = 0.028 \text{ SR} - 6.33 \text{ pH} - 0.049 r_d$

Παράρτημα Β

Φωτογραφικό Υλικό



Εικόνα 1:Σπάσιμο του κεντρικού αγωγού που τροφοδοτεί με νερό τη Λευκάδα.
(Πηγή:www.kolivas.de)



Εικόνα 2:Διαρροήαγωγού στη Λευκάδα. (Πηγή:www.offsite.com.cy)



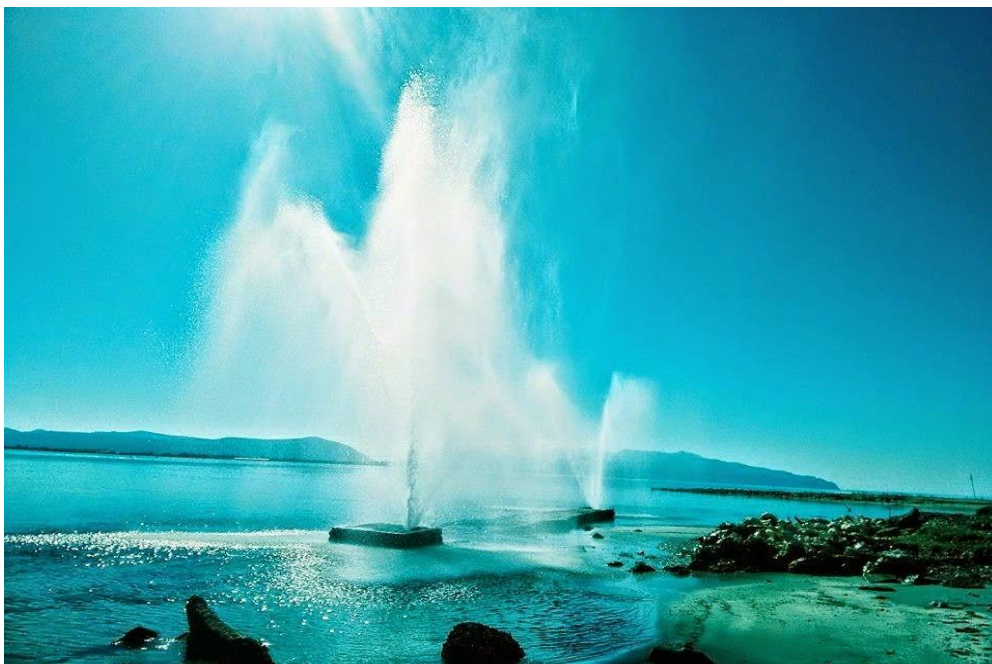
Εικόνα 3: Ανδριάνειος Δεξαμενή (Πηγή: www.mixanitouxronou.gr)



Εικόνα 4: Αδριάνειο Υδραγωγείο (Πηγή: wikimapia.org)



Εικόνα 5: Αντικατάσταση αγωγών ύδρευσης από αμίαντο στην Καλαμάτα
(Πηγή:www.tharrosnews.gr)



Εικόνα 6: Βλάβη στον αγωγό ύδρευσης Πρέβεζας- Λευκάδας
(Πηγή:www.xiromeronews.blogspot.gr)

Βιβλιογραφία

1. Simona Despa , What is Survival Analysis, Stat News #78, Cornell Statistical Consulting Unit, Cornell University
2. Golam Kabir , Solomon Tesfamariam, Rehan Sadiq, 2015, Predicting water main failures using Bayesian model averaging and survival modelling approach, School of Engineering, University of British Columbia (UBC), 3333 University Way, Kelowna, BC, Canada V1V1V7, Reliability Engineering and System Safety 142 (2015)498–514
3. M. Tabesh, J. Soltani, R. Farmani and D. Savic, 2009, Assessing pipe failure rate and mechanical reliability of water distribution networks using data-driven modeling, IWA Publishing, Journal of Hydroinformatics, 1-17
4. Στ. Γιαννόπουλος και Δημ. Βοχαϊτης, Βελτίωση της Αξιοπιστίας των Δικτύων Ύδρευσης, Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών έργων,, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης ,2003
5. L. Berardi, O. Giustolisi, Z. Kapelan and D. A. Savic, 2008, Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR, IWA Publishing, Journal of Hydroinformatics, 113-126
6. Raziye Farmani, Godfrey Walters and Dragan Savic, 2006, Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality, IWA Publishing, Journal of Hydroinformatics, 165-179
7. Yehuda Kleiner, Balvant Rajani, 2011, Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Ont., Canada K1A 0R6, Urban Water 3 (2001) 131-150
8. Lisa Scholten, Andreas Scheidegger , Peter Reichert , Max Mauer, Judit Lienert, 2013,Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis, Water Research 49 (2014) 124-143

9. Lisa Scholten, Andreas Scheidegger , Peter Reichert , Max Mauer, 2013, Extension of pipe failure models to consider the absence of data from replaced pipes, *Water Research* 47, (2013) 3696-3705
10. Lisa Scholten, Andreas Scheidegger, Peter Reichert, Max Maurer, 2012, Combining expert knowledge and local data for improved service life modeling of water supply networks, *Environmental Modelling & Software* 42 (2013) 1-16
11. V. K. Kanakoudis, 2014, Vulnerability based management of water resources systems, , IWA Publishing, *Journal of Hydroinformatics*, 133-156
12. D. Koutsoyiannis, G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, A. Christofides, 2003, *Physics and Chemistry of the Earth* 28 (2003) 599–609
13. Evangelos Rozos, Christos Makropoulos, 2012, Source to tap urban water cycle modelling, *Environmental Modelling & Software* 41 (2013) 139-150
14. Definitions and Censoring, <http://www.stats.ox.ac.uk/~mlunn/lecturenotes1.pdf>, Department of Statistics, University of Oxford, ημερομηνία πρόσβασης 02/09/2015
15. Aciel Eshky, Bayesian Methods of Parameter Estimation, http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/AV0809/eshky.pdf , University of Edinburgh, School of Informatics, ημερομηνία πρόσβασης 21/08/2015
16. Δ. Κουτσογιάννης, Α. Ευστρατιάδης, Κασταλία - Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών, https://www.itia.ntua.gr/getfile/497/1/documents/Kastalia_info.pdf, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2015
17. Δ. Κουτσογιάννης, Lecture notes on Stochastic Methods in Water Resources, Εισαγωγή στην προσομοίωση, https://www.itia.ntua.gr/getfile/207/1/documents/2013_StochWatRes_Simulation.pdf , Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα –Επανέκδοση 2013
18. Ορισμοί, el.wikipedia.org, ημερομηνία πρόσβασης 26/08/2015

19. Definitions, en.wikipedia.org, ημερομηνία πρόσβασης 26/08/2015
20. Στοιχεία για την ύδρευση της Αθήνας, www.eydap.gr, ημερομηνία πρόσβασης 20/09/2015