



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ**  
**ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΕΙΑ**

## **Μεταπτυχιακή Εργασία**

**Προβλήματα και αστοχίες στο δίκτυο διανομής νερού από το  
υλικό κατασκευής**

**Γεώργιος Τσιλογιάννης**

**A.M.: 20033**

**Επιβλέπουσα:**

**Ιωάννα Δαμικούκα**

**Αθήνα, Μάρτιος 2022**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**SCHOOL OF PUBLIC HEALTH**  
**DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH POLICIES**  
**MSc IN OCCUPATIONAL AND ENVIRONMENTAL HEALTH**

## **Diploma Thesis**

**Water distribution network material related problems and failures**

**Georgios Tsilogiannis**

**Registration Number: 20033**

**Supervisor:**

**Ioanna Damikouka**

**Athens, March 2022**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ**  
**ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΕΙΑ**

**Προβλήματα και αστοχίες στο δίκτυο διανομής νερού από το  
υλικό κατασκευής**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι  
Εξεταστική Επιτροπή:

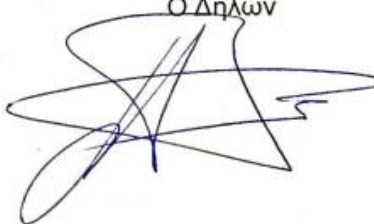
<b>Α/Α</b>	<b>ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	Ιωάννα Δαμικούκα	Επίκουρη Καθηγήτρια	
2	Λευκοθέα Εβρένογλου	Αναπληρώτρια Καθηγήτρια	
3	Γεώργιος Ζέρβας	ΕΔΙΠ	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γεώργιος Τσιλογιάννης του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 20033, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Επαγγελματική και Περιβαλλοντική Υγεία του Τμήματος Πολιτικών Δημόσιας Υγείας της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών  


*\*Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.*

**Ονοματεπώνυμο/Ιδιότητα**

**Ψηφιακή υπογραφή επιβλέποντος**

(Υπογραφή)

***\* Εάν κάποιος επιθυμεί απαγόρευση πρόσβασης στην εργασία για χρονικό διάστημα 6-12 μηνών (embargo), θα πρέπει να υπογράψει ψηφιακά ο/η επιβλέπων/ουσα καθηγητής/τρια, για να γνωστοποιεί ότι είναι ενημερωμένος/η και συναινεί. Οι λόγοι χρονικού αποκλεισμού πρόσβασης περιγράφονται αναλυτικά στις πολιτικές του Ι.Α. (σελ. 6).***

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα δίκτυα διανομής νερού, αποτελούν σημαντικότατο τμήμα των έργων υδροδότησης, με κύριο σκοπό τη διασφάλιση της παροχής επαρκούς και ποιοτικού νερού προς κατανάλωση. Απαρτίζονται κυρίως από πλέγμα αγωγών μεταφοράς και δεξαμενών αποθήκευσης του νερού, κατασκευασμένων από μεταλλικά (κράματα σιδήρου και χαλκού) και μη μεταλλικά υλικά (πολυμερή πλαστικά, αμίαντος, τσιμέντο). Οι αγωγοί και οι δεξαμενές του δικτύου υπόκεινται σε ένα εύρος αστοχιών και εμφανίζουν συγκεκριμένα προβλήματα κατά τη λειτουργία τους. Ο αντίκτυπος των προβλημάτων και αστοχιών αυτών στην παρεχόμενη ποιότητα του πόσιμου νερού είναι μεγάλος και ευρέως μελετημένος σε παγκόσμιο επίπεδο. Το εύρος των επιπτώσεων κυμαίνεται από μεταβολή των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού (χρώμα, οσμή, γεύση και θολότητα), μέχρι αλλαγές στα βιολογικά χαρακτηριστικά του που ενδέχεται να προκαλέσουν υδατογενείς ασθένειες. Οι παράγοντες που συντελούν στην εμφάνιση προβλημάτων και αστοχιών στο δίκτυο ύδρευσης ποικίλουν, και ως επί το πλείστον λειτουργούν συνεργατικά στη διατάραξη της ορθής λειτουργίας του. Τα υλικά ενός δικτύου παίζουν ιδιαίτερο ρόλο στην εμφάνιση, μελέτη και διαχείριση των προαναφερθέντων προβλημάτων και αστοχιών, με πιο χαρακτηριστικά τις θραύσεις και τις διαρροές, την εσωτερική και εξωτερική διάβρωση και την πρόκληση βιορύπανσης (μέσω σχηματισμού βιοφίλμ στις εσωτερικές επιφάνειες) αγωγών και δεξαμενών. Η κατάλληλη επιλογή του υλικού κατασκευής αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση στην προσπάθεια μετριασμού των προβλημάτων και ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων των αστοχιών στο πόσιμο νερό, αφού αποτελεί συνάρτηση οικονομικών και κατασκευαστικών παραμέτρων, των εδαφικών και κλιματικών συνθηκών της υδροδοτούμενης περιοχής, καθώς και της ποιότητας του νερού της πηγής.

Λέξεις – κλειδιά: Δίκτυα διανομής νερού, υλικά, μηχανικές αστοχίες, διάβρωση, βιοφίλμ.

## **ABSTRACT**

Water distribution networks are a very important part of water supply systems, and their main purpose is ensuring that there is adequate quality and supply of water for consumption. They mainly consist of transport pipes and water storage tanks, made of metallic (iron and copper alloys) and non-metallic materials (polymer plastics, asbestos, cement). Network pipes and tanks are subject to a range of failures and problems during their operation. The impact of these problems and failures on the quality of drinking water provided is large and widely studied worldwide. These effects range from changes in the physicochemical parameters of water (color, odor, taste and turbidity), to changes in its biological characteristics that may cause waterborne diseases. Factors contributing to the occurrence of problems and failures in the water supply network vary, and in most cases, they work collaboratively in disrupting its proper operation. Network materials play a special role in the occurrence, study and management of the aforementioned problems and failures; the most characteristic ones are fractures and leaks, internal and external corrosion and the induction of bio-pollution (through the formation of biofilm on the inner surfaces) of pipes and tanks. The appropriate choice of materials is the greatest challenge in the effort to mitigate problems and minimize the impact of material failures on drinking water, as it is a function of economic and construction parameters, soil and climatic conditions of the water supply area, and the quality of the water from the source.

**Keywords:** Water distribution networks, materials, mechanical failures, corrosion, biofilms.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	i
ABSTRACT.....	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	vi
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	11
1.1 Ορισμός, βασικές αρχές λειτουργίας και είδη δικτύων.....	11
1.2 Δεξαμενές αποθήκευσης νερού.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΟΤΕΡΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	15
2.1 Μεταλλικοί αγωγοί.....	15
2.1.1 Σιδηροσωλήνες.....	15
2.1.2 Χαλκοσωλήνες.....	16
2.2 Μη μεταλλικοί αγωγοί.....	16
2.2.1 Αμιαντοτσιμεντοσωλήνες.....	16
2.2.2 Πλαστικοί σωλήνες.....	17
2.2.2.1 Πολυβινυλοχλωρίδιο.....	17
2.2.2.2 Πολυαιθυλένιο.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΩΛΕΙΑ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΙΤΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	22
4.1 Συνιστώσες της λειτουργικής ακεραιότητας.....	22
4.2 Αστοχίες και προβλήματα των υλικών.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΘΡΑΥΣΕΙΣ.....	26
5.1 Παράγοντες και είδη θραύσεων.....	26

5.2 Διαρροές.....	26
5.3 Κλιματικές και εδαφολογικές συνθήκες.....	27
5.4 Εσωτερική πίεση λειτουργίας του δικτύου.....	29
5.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	30
6.1 Γενικά.....	30
6.2 Διαβρωτικότητα του νερού.....	31
6.3 Είδη διάβρωσης.....	31
6.4 Διάβρωση μεταλλικών υλικών.....	33
6.4.1 Υλικά από κράματα σιδήρου.....	33
6.4.2 Υλικά από κράματα χαλκού.....	38
6.4.3 Γαλβανική διάβρωση.....	38
6.5 Η διάβρωση σε αμίαντο – τσιμέντο και σκυρόδεμα.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΟΦΙΛΜ.....	39
7.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά των βιοφίλμ.....	39
7.2 Παράγοντες σχηματισμού βιοφίλμ.....	39
7.3 Σχηματισμός βιοφίλμ στις οικιακές δεξαμενές αποθήκευσης πόσιμου νερού .....	41
7.4 Σχηματισμός βιοφίλμ στους αγωγούς των δικτύων διανομής πόσιμου νερού .....	42
7.5 Επιπτώσεις του σχηματισμού βιοφίλμ στην απολυμαντική ικανότητα του δικτύου.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	48
8.1 Φαινόμενα διείδυσης και έκπλυσης ουσιών.....	48
8.2 Αμίαντος.....	49
8.3 Έλεγχος της διάβρωσης.....	49
8.4 Καθαρισμός των επιφανειών.....	51
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	54



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Χρονοδιάγραμμα χρήσης των βασικότερων υλικών κατασκευής αγωγών δικτύων διανομής πόσιμου νερού στις Η.Π.Α. κατά τον 20 <sup>ο</sup> αιώνα.....	19
Πίνακας 4.1 Αιτίες απώλειας της λειτουργικής ακεραιότητας των δικτύων διανομής πόσιμου νερού.....	23
Πίνακας 4.2: Συνηθέστερες αιτίες αστοχίας των αγωγών δικτύου διανομής νερού, για τα βασικότερα υλικά κατασκευής.....	25

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Σχηματική αναπαράσταση τμήματος δικτύου διανομής νερού.....	12
Εικόνα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση ακτινωτού (διακλαδιζόμενου) δικτύου διανομής νερού.....	13
Εικόνα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση βροχωτού δικτύου διανομής νερού.....	13
Εικόνα 6.1 Τοπική διάβρωση στην εξωτερική επιφάνεια μεταλλικού αγωγού, και σχηματική αναπαράσταση.....	32
Εικόνα 6.2 Γενικευμένη διάβρωση στην εξωτερική επιφάνεια μεταλλικού αγωγού, και σχηματική αναπαράσταση.....	32
Εικόνα 6.3 Σημειακή διάβρωση με οπές στην εξωτερική επιφάνεια μεταλλικού αγωγού, και σχηματική αναπαράσταση.....	32
Εικόνα 6.4 Απεικόνιση διαφόρων σχηματισμών οξειδίων του σιδήρου ως προϊόντα διάβρωσης εσωτερικής επιφάνειας σιδηροσωλήνα, με τη μέθοδο της μικροσκοπίας ηλεκτρονικής σάρωσης.....	34
Εικόνα 6.5 Εσωτερική διάβρωση και εναποθέσεις σε χυτοσιδηρό αγωγό δικτύου ύδρευσης.....	36
Εικόνα 6.6 Εσωτερική διάβρωση και εξογκώσεις αποθέσεων σε σιδηροσωλήνα δικτύου διανομής νερού.....	37
Εικόνα 7.1 Σχηματικό διάγραμμα τριών βασικών σταδίων σχηματισμού βιοφίλμ.....	40
Εικόνα 7.2 Παρουσία μικροβιακών πληθυσμών στην εσωτερική επιφάνεια αγωγού από ελατό σίδηρο και πολυβινυλοχλωρίδιο.....	44
Εικόνα 7.3 Φωτογραφίες σχηματισμών βιοφίλμ σε επιφάνειες διαφόρων υλικών κατασκευής αγωγών μέσω μικροσκοπίας ηλεκτρονικής σάρωσης.....	45

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ποιότητα του πόσιμου νερού αποτελεί παράγοντα μείζονος σημασίας για τη δημόσια υγεία. Το νερό που λαμβάνει ο καταναλωτής - τελικός αποδέκτης του δικτύου διανομής, δύναται να επηρεαστεί ποιοτικά (αλλά και ποσοτικά) από τα προβλήματα και τις αστοχίες του δικτύου. Η σωστή επιλογή του υλικού κατασκευής, αποτελεί ίσως τον κρισιμότερο παράγοντα για την ορθή λειτουργία και την αύξηση του χρόνου ζωής ενός δικτύου, εξασφαλίζοντας μέγιστη αξιοπιστία, αντοχή, και διατήρηση των επιθυμητών ποιοτικών χαρακτηριστικών του προς κατανάλωση νερού.

Το παρόν πόνημα αποτελεί το επιστέγασμα μιας διεπιστημονικής προσέγγισης. Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου ως μεταπτυχιακός φοιτητής στην Επαγγελματική και Περιβαλλοντική Υγεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα Επίκουρη Καθηγήτρια Κα Ιωάννα Δαμικούκα, αφενός για την επίβλεψη και καθοδήγηση στην εργασία μου, αφετέρου για τη δυνατότητα που μου έδωσε, μέσα από αυτή, να αναδείξω τη σημασία και τη συνεργασία δύο ευρύτατων επιστημονικών πεδίων, ήτοι της Δημόσιας Υγείας και της Επιστήμης των Υλικών. Κλείνοντας, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Κα Λευκοθέα Εβρένογλου και τον Κο Γεώργιο Ζέρβα (ΕΔΙΠ), αλλά και όλους τους διδάσκοντες των μαθημάτων του μεταπτυχιακού προγράμματος.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται αφενός η καταγραφή των συνηθέστερων υλικών κατασκευής των δικτύων διανομής πόσιμου νερού σε παγκόσμια κλίμακα (κυρίως σωληνώσεων και δεξαμενών που απαρτίζουν το δίκτυο), κι αφετέρου η περιγραφή των κυριότερων προβλημάτων και αστοχιών που τα εν λόγω δίκτυα εμφανίζουν αναλόγως του υλικού κατασκευής με την πάροδο του χρόνου.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός δικτύου διανομής πόσιμου νερού ποικίλουν, αναλόγως των τεχνικοοικονομικών παραγόντων και απαιτήσεων. Συνεπώς, ανάλογα είναι και τα προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του δικτύου. Στόχος του παρόντος πονήματος είναι να αναδειχθούν τα προβλήματα αυτά, αλλά και να καταδειχθεί η σχέση υλικού – προβλήματος. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιασμός των μελλοντικών δικτύων, αλλά και η συντήρηση των ήδη υπάρχοντων, θα μπορούν να εστιάζουν με μεγαλύτερη επιτυχία στον υπολογισμό και την αποτροπή ανεπιθύμητων καταστάσεων στη λειτουργία τους, ούτως ώστε να παρέχεται ποιοτικό νερό προς κατανάλωση.

Η επιλογή του υλικού κατασκευής ενός δικτύου διανομής πόσιμου νερού αποτελεί πολυδιάστατη διαδικασία. Το υλικό αξιολογείται ως αποδοτικό με βάση τη μηχανική αντοχή, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά και την προσδοκώμενη ποιότητα του νερού. Κάποιες φορές, η επιλογή λειτουργεί και αντίστροφα, αφού η ποιότητα του νερού και οι συνθήκες απολύμανσης αυτού καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το υλικό κατασκευής. Από υαλοβάμβακα και πολυμερή πλαστικά, μέχρι κράματα σιδήρου και χαλκού, οι επιλογές εκτός από τα θετικά, συνοδεύονται κι από ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά. Η συσσώρευση βακτηριακού φορτίου στα τοιχώματα των σωληνώσεων και η επακόλουθη βιορύπανση, ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα οσμής και γεύσης στο νερό. Η διάβρωση (ιδίως των μεταλλικών υλικών), οδηγεί στην έκπλυση μεταλλικών ιόντων και σωματιδίων στο κυρίως σώμα του παρεχόμενου νερού. Η αποθήκευση νερού σε δεξαμενές του δικτύου διανομής, εμφανίζει εντονότερα τα προαναφερθέντα προβλήματα, με ταυτόχρονη υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Αντίστοιχα, οι κάθε λογής μηχανικές καταπονήσεις και οι μεταβολές της ροής εντός του δικτύου δρουν επιβαρυντικά στη λειτουργία αυτού,

οδηγώντας σε θραύσεις των αγωγών και διαρροές νερού. Όλα τα παραπάνω, μεμονωμένα ή συνεργατικά, απαντώνται σε όλα τα υλικά δικτύου, αλλά σε διαφορετικό βαθμό, επομένως καθίσταται αναγκαία η μελέτη της σχέσης μεταξύ υλικού και εμφάνισης προβλημάτων - αστοχιών. Η κατάλληλη επιλογή του υλικού κατασκευής, μέσα από την κατανόηση των πιθανών προβλημάτων στο δίκτυο, διασφαλίζει σε μέγιστο βαθμό την ποιότητα του παρεχόμενου νερού.

Η παρούσα εργασία αποτελεί ανασκόπηση της παγκόσμιας και εγχώριας βιβλιογραφίας, μέσω μελέτης και αξιολόγησης επιστημονικών δημοσιευμένων άρθρων και εργασιών. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν μελέτες από επιστημονικά περιοδικά και φορείς που προσεγγίζουν διεπιστημονικά το θέμα της εργασίας. Η επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, η περιβαλλοντική μηχανική, αλλά και η επιστήμη της δημόσιας υγείας, αποτυπώνουν και ερμηνεύουν συνεργατικά τα προβλήματα και τις αστοχίες στη λειτουργία των δικτύων διανομής νερού, με πρωταρχικό στόχο την εξεύρεση λύσεων στα προβλήματα αυτά, και κατ' επέκταση στην εξασφάλιση ποιοτικής και ποσοτικής παροχής κατάλληλου νερού προς κατανάλωση σε παγκόσμιο επίπεδο. Ο υψηλός βαθμός σημαντικότητας του θέματος της εργασίας για τη δημόσια υγεία γίνεται εύκολα αντιληπτός, εάν κανείς αναλογιστεί την έλλειψη (ποιοτικά και ποσοτικά) πόσιμου νερού σε πολλές περιοχές του πλανήτη λόγω ελαττωματικών δικτύων διανομής, της επιμόλυνσης του νερού και την εμφάνιση υδατογενών ασθενειών λόγω φθορών στα υλικά του δικτύου, καθώς και την ποιοτική υποβάθμιση του νερού όταν τροποποιούνται αρνητικά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του, λόγω αλληλεπίδρασης νερού και υλικών του δικτύου.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, γίνεται αρχικά αναφορά στον ορισμό, τα είδη και τις βασικές αρχές λειτουργίας των δικτύων διανομής πόσιμου νερού. Στη συνέχεια, καταγράφονται οι συνηθέστερες κατηγορίες χρησιμοποιούμενων υλικών (μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά), καθώς και τα κυριότερα κριτήρια επιλογής και καταλληλότητας των υλικών κατασκευής ενός δικτύου. Κατόπιν αναλύονται, και πάντοτε σε συνάρτηση με το υλικό κατασκευής, οι βασικότερες μηχανικές αστοχίες αυτών (θραύση, διαρροή), η εσωτερική και εξωτερική διάβρωση, αλλά και ο σχηματισμός βιοφίλμ που εμφανίζονται στους αγωγούς και δεξαμενές του δικτύου. Κλείνοντας, και προτού εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα που αφορούν στη σχέση υλικού κατασκευής – είδους και συχνότητας εμφάνισης προβλημάτων και

αστοχιών, γίνεται αναφορά σε πιθανές παρεμβάσεις και βασικές μεθόδους πρόληψης και αποκατάστασης των προαναφερθέντων ζητημάτων.

# 1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

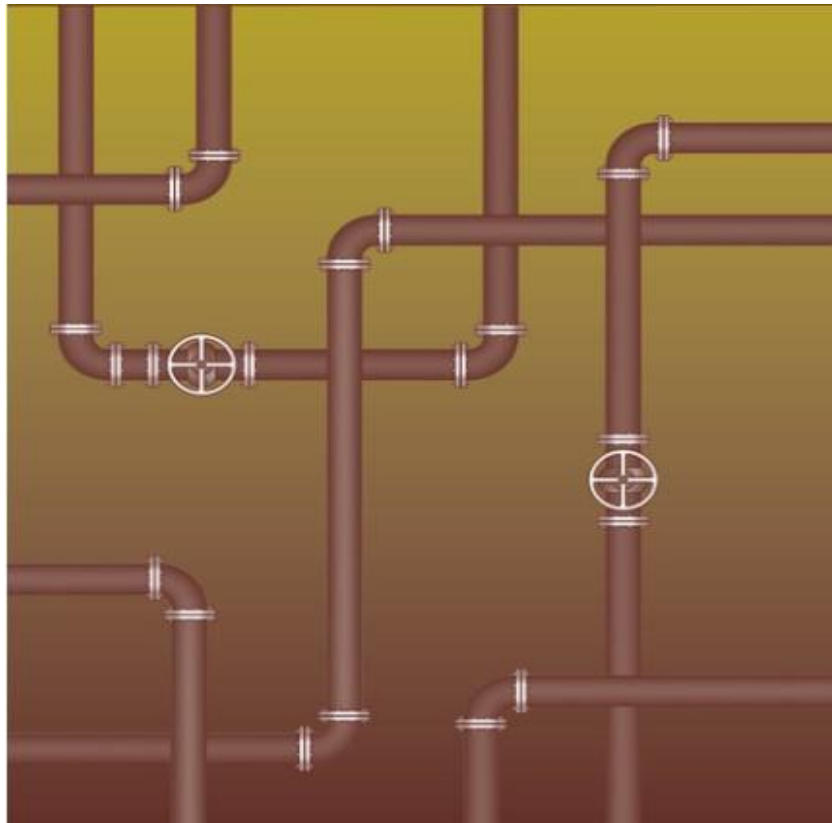
## 1.1 Ορισμός, βασικές αρχές λειτουργίας και είδη δικτύων

Τα δημόσια συστήματα ύδρευσης βασίζονται στα δίκτυα διανομής νερού για την απρόσκοπτη παροχή ασφαλούς και ποιοτικού πόσιμου νερού στους καταναλωτές. Γίνεται επομένως αντιληπτό πως ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία και η συνολική διαχείριση ενός δικτύου αποτελεί πολυδιάστατη πρόκληση για τη δημόσια υγεία (USEPA, 2010).

Ένα δίκτυο διανομής πόσιμου νερού «περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα και τις εγκαταστάσεις που απαιτούνται για τη διανομή πόσιμου νερού μέσω δικτύου σωληνώσεων στους καταναλωτές, με τροφοδοσία από αντλίες ή συσκευές βαρυτικής αποθήκευσης» (AWWA, 1974). Αποτελείται από πλέγμα αγωγών που λειτουργούν υπό πίεση, τροφοδοτείται από τα σημεία υδροληψίας και διανέμει το επεξεργασμένο νερό από τις δεξαμενές αποθήκευσης στους καταναλωτές (Τσακίρης και Αλεξάκης, 2010). Μέσω του δικτύου διανομής, το πόσιμο νερό μεταφέρεται προς πολλαπλά σημεία μιας υδροδοτούμενης περιοχής. Το δίκτυο διανομής νερού (ή αλλιώς και έργα εσωτερικού υδραγωγείου), περιλαμβάνει, εκτός της δεξαμενής αποθήκευσης νερού που είναι και το όριο λειτουργίας του δικτύου διανομής, και τις σωληνώσεις, αντλίες, βαλβίδες, δικλείδες, μετρητές, οικιακές δεξαμενές αποθήκευσης κ.ά. (Εικ. 1.1) (Τσακίρης και Σπηλιώτης, 2010).

Όσον αφορά στον ελληνικό χώρο, τα στοιχεία της ΕΥΔΑΠ σχετικά με την ηλικία, το συνολικό μήκος, τα υλικά κατασκευής και την πίεση λειτουργίας του δικτύου ύδρευσης της πρωτεύουσας, είναι ενδεικτικά πως «το σημερινό δίκτυο άρχισε να κατασκευάζεται από το 1926 και έχει συνολικό μήκος 9.500 χλμ. Υλικά κατασκευής των αγωγών του δικτύου ύδρευσης, αποτελούν το αμιαντοτσιμέντο, ο χάλυβας, ο χυτοσίδηρος και το πολυβινυλοχλωρίδιο, σε ποσοστά επί του συνολικού μήκους 65%, 15%, 15% και 5% αντιστοίχως. Οι πιέσεις λειτουργίας των αγωγών κυμαίνονται από 1 (ελάχιστη) έως 25 (μέγιστη) bar (ατμόσφαιρες), με βέλτιστη επιδιωκόμενη πίεση τα 6 bar.»

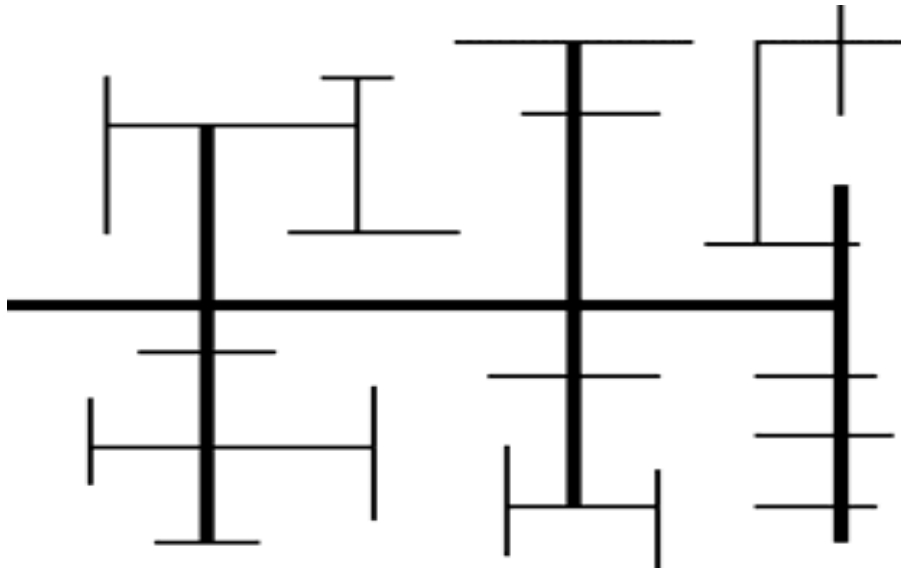
**Εικόνα 1.1:** Σχηματική αναπαράσταση τμήματος δικτύου διανομής νερού, αποτελούμενο από αγωγούς, συνδέσμους, αρθρώσεις και βαλβίδες (National Research Council - Washington DC, 2006).



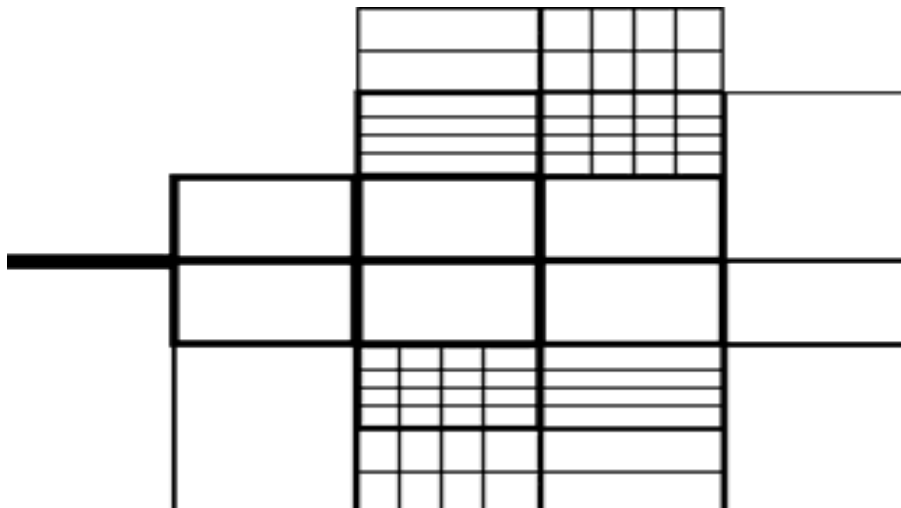
Τα δίκτυα διανομής χωρίζονται κυρίως σε ακτινωτά (ή διακλαδιζόμενα), βροχωτά και μικτά, με βάση τη διάταξη των αγωγών (Εικ. 1.2 και 1.3). Στην περίπτωση του ακτινωτού δικτύου, το νερό σε κάθε σημείο της υδροδοτούμενης περιοχής παρέχεται από μία μόνο κατεύθυνση. Αντίθετα, σε ένα βροχωτό δίκτυο, που αποτελείται από συστήματα βρόχων (κλειστό δίκτυο), το νερό παρέχεται από δύο ή περισσότερες κατευθύνσεις. Τα δίκτυα μικτού τύπου, αποτελούν συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων ειδών, και είναι αυτά που πρακτικά συνήθως χρησιμοποιούνται (Σταυρακαντωνάκης, 2017).



**Εικόνα 1.2:** Σχηματική αναπαράσταση ακτινωτού (διακλαδιζόμενου) δικτύου διανομής νερού (Σταυρακαντωνάκης, 2017).



**Εικόνα 1.3:** Σχηματική αναπαράσταση βροχωτού δικτύου διανομής νερού (Σταυρακαντωνάκης, 2017).



## 1.2 Δεξαμενές αποθήκευσης νερού

Εκτός από τους αγωγούς, οι δεξαμενές αποθήκευσης νερού κατέχουν σημαντικό ρόλο στην ορθή λειτουργία του εσωτερικού δικτύου και την παροχή πόσιμου νερού με αποδεκτά ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά. Η τοποθέτησή τους προτείνεται να γίνεται στο κέντρο της ζήτησης της εξυπηρετούμενης περιοχής και σε υψηλά σημεία, με σκοπό την επίτευξη της απαιτούμενης πίεσης κατά μήκος του δικτύου, αλλά και για λόγους ασφάλειας. Οι δεξαμενές συμβάλλουν στην αποδοτικότερη και οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου, ρυθμίζοντας την παροχή σε ημερήσια βάση, εξισώνοντας παροχή και κατανάλωση, ενώ επιπρόσθετα παρέχουν τη δυνατότητα κάλυψης εκτάκτων αναγκών ύδρευσης σε περίπτωση βλάβης στο υπόλοιπο δίκτυο ή πυρκαγιάς (Σταυρακαντωνάκης, 2017). Χρησιμεύουν στην αποθήκευση του νερού, ώστε να αντιμετωπίζονται οι διακυμάνσεις στη ζήτηση από τη μεριά των καταναλωτών, και λειτουργούν σταθεροποιητικά στην εσωτερική πίεση του δικτύου, προσφέροντας ευελιξία στη λειτουργία των αντλιών. Τέλος, με τη βοήθεια των δεξαμενών επιτυγχάνεται η μίξη νερού από διαφορετικές πηγές (AWWA, 1998).

## **2. ΒΑΣΙΚΟΤΕΡΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ**

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες διαθέσιμων υλικών για την κατασκευή αγωγών των δικτύων διανομής πόσιμου νερού, τα μεταλλικά και τα μη μεταλλικά υλικά. Από αυτά, τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μεταλλικά είναι τα κράματα σιδήρου (ελατός σίδηρος, χάλυβας και χυτοσίδηρος) και ο χαλκός, ενώ στα μη μεταλλικά υλικά συγκαταλέγονται οι πλαστικοί αγωγοί από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και πολυαιθυλένιο (PE), καθώς και οι αγωγοί από αμιαντοτσιμέντο (WHO, 2006).

Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1950 και 1960, ξεκίνησαν να παράγονται σωλήνες από ελατό σίδηρο, λόγω της μεγαλύτερης μηχανικής αντοχής και ανθεκτικότητάς τους στη διάβρωση από τους αντίστοιχους χυτοσιδηρούς. Οι σωλήνες από πολυβινυλοχλωρίδιο πρωτοεμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1970, ενώ το υψηλής και μέσης πυκνότητας πολυαιθυλένιο χρησιμοποιήθηκε τη δεκαετία του 1990 για την κατασκευή αγωγών δικτύου διανομής πόσιμου νερού. Οι πλαστικοί αυτοί σωλήνες είναι πολύ ανθεκτικοί στη διάβρωση, αλλά υπολείπονται μηχανικής αντοχής σε σχέση με τους σωλήνες από ελατό σίδηρο (AWWA, 2001). Στον πίνακα 2.1 που ακολουθεί στο τέλος του κεφαλαίου, καταγράφονται συνοπτικά τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής αγωγών δικτύων διανομής πόσιμου νερού στις Η.Π.Α., σε συνάρτηση με τις χρονικές περιόδους εφαρμογής και χρήσης τους κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα.

### **2.1 Μεταλλικοί αγωγοί**

#### **2.1.1 Σιδηροσωλήνες**

Οι χαλύβδινοι και οι αγωγοί από ελατό σίδηρο κατασκευάζονται κυρίως με τη διαδικασία της θερμής διέλασης, αλλά και με τη συγκόλληση κατάλληλα διαμορφωμένων ελασμάτων, ενώ οι αντίστοιχοι από χυτοσίδηρο παράγονται μέσω χύτευσης του κράματος σιδήρου. Οι αγωγοί από ελατό σίδηρο, χάλυβα και χυτοσίδηρο αναφέρονται συνολικά ως σιδηροσωλήνες (TEE, 2005). Ο γαλβανισμένος χάλυβας και χυτοσίδηρος αποτελούσαν τα παραδοσιακά υλικά κατασκευής σωληνώσεων των δικτύων μεταφοράς και διανομής πόσιμου νερού. Ο

γαλβανισμός των εν λόγω κραμάτων σιδήρου παλαιότερα, αποτελούσε μέθοδο επιμετάλλωσης που επιτυγχανόταν με την ολική βύθιση του καθαρισμένου μεταλλικού εξαρτήματος σε λουτρό τηγμένου ψευδαργύρου. Ο γαλβανισμός προσφέρει πρωτίστως αντιδιαβρωτική προστασία, εσωτερικά και εξωτερικά στον μεταλλικό σωλήνα (WHO, 2006). Οι σωλήνες από γαλβανισμένο χάλυβα ενδείκνυνται για δίκτυα διανομής πόσιμου νερού που λειτουργούν υπό υψηλές πιέσεις και απαιτείται μεγάλη διάμετρος αγωγού, ενώ οι σωλήνες από γαλβανισμένο χυτοσίδηρο έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, σκληρότητα και μηχανική αντοχή (Μαντσουκίδου, 2019). Από χάλυβα και χυτοσίδηρο κατασκευάζονται ημιάκαμπτοι αγωγοί δικτύου, οι οποίοι εφόσον ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο όριο μηχανικής αντοχής, εμφανίζουν μετρήσιμη και μη αντιστρεπτή παραμόρφωση μέχρι το όριο θραύσης τους (Maiolo et al., 2018). Γενικά, οι αγωγοί αυτής της κατηγορίας προτιμώνται για την κατασκευή του δικτύου διανομής εξωτερικά των κτηρίων και των κατοικιών, κι όχι για τα εσωτερικά μέρη του δικτύου.

### **2.1.2 Χαλκοσωλήνες**

Οι σωλήνες από χαλκό αποτελούνται από υψηλής καθαρότητας χαλκό, και επί το πλείστον επενδύονται από πλαστικό προστατευτικό περίβλημα (TEE, 2005). Οι χάλκινες σωληνώσεις αποτελούν εξαρτήματα πιο εύκαμπτα, μικρότερης συνολικής διαμέτρου και με συνήθως καλύτερη συμπεριφορά στη διάβρωση από αντίστοιχης δυναμικότητας γαλβανισμένες σωληνώσεις χάλυβα και χυτοσιδήρου. Λόγω του λεπτότερου τοιχώματος, οι χάλκινες σωληνώσεις αποτελούν σχετικά ελαφρές κατασκευές, οπότε και ενδείκνυται η χρήση τους εσωτερικά σε κτήρια και κατοικίες. Η συναρμολόγηση των χάλκινων αγωγών πόσιμου νερού πραγματοποιείται με συνδέσμους, εξαρτήματα συμπίεσης, αλλά και συγκόλληση χωρίς μόλυβδο (WHO, 2006).

## **2.2 Μη μεταλλικοί αγωγοί**

### **2.2.1 Αμιαντοτσιμεντοσωλήνες**

Ο αμίαντος αποτελεί κατηγορία υλικών που παράγονται με τη μορφή μικροσκοπικών ινών, τα οποία προέρχονται από ένυδρα πυριτικά ορυκτά. Λόγω της αντοχής του στην οξείδωση, τη θερμοκρασία και το νερό, χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα στο παρελθόν για την κατασκευή αγωγών στα δίκτυα διανομής πόσιμου νερού. Η

μηχανική αντοχή των αγωγών αμιάντου ενισχύεται με την προσθήκη τσιμέντου ή σκυροδέματος (ΕΥΔΑΠ, 2020). Οι σωλήνες από τσιμέντο και αμίαντο κατατάσσονται στους άκαμπτους αγωγούς, όπου το κύριο χαρακτηριστικό τους υπό μηχανικό φορτίο είναι η θραύση με ελάχιστη προηγηθείσα παραμόρφωση, όταν η πίεση ξεπεράσει το όριο αντοχής σε θραύση (Maiolo et al., 2018). Οι αγωγοί αυτής της κατηγορίας δεν χρησιμοποιούνται στο δίκτυο εσωτερικά σε κτήρια και κατοικίες. Στις περισσότερες χώρες έχει σταματήσει η χρήση των αμιαντοτσιμεντοσωλήνων στην κατασκευή νέων ή στην αντικατάσταση τμημάτων δικτύων, ενώ σύμφωνα με την οδηγία 76/769/ΕΟΚ του 1999 της Ευρωπαϊκής Ένωσης «απαγορεύεται η χρήση προϊόντων που περιέχουν ίνες αμιάντου (αμιαντοτσιμεντοσωλήνες), αλλά επιτρέπεται η χρήση των προϊόντων αυτών που ήταν εγκατεστημένα ή σε λειτουργία πριν την 15-08-1999, μέχρι την τελική απόρριψη ή το τέλος διάρκειας λειτουργίας τους».

### **2.2.2 Πλαστικοί σωλήνες**

Οι πλαστικοί σωλήνες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια στην κατασκευή δικτύων διανομής πόσιμου νερού. Η πίεση και η θερμοκρασία του μεταφερόμενου νερού στο δίκτυο είναι οι κύριοι γνώμονες για την κατασκευή πλαστικών σωλήνων με κατάλληλες προδιαγραφές και ικανοποιητική διάρκεια ζωής. Επιπρόσθετα, για την περαιτέρω ενίσχυση της μηχανικής αντοχής των πλαστικών σωλήνων, αλλά και της ανθεκτικότητας έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας, κατασκευάζονται σωλήνες με τοιχώματα διαφόρων επάλληλων στρώσεων (εναλλαγή φύλλων πλαστικού και μεταλλικού υλικού), και καλύπτονται από ειδικό προστατευτικό περίβλημα (ΤΕΕ, 2005). Οι εύκαμπτοι αγωγοί από πλαστικά και τα πολυμερή τους (PE, PVC), εμφανίζουν μεγαλύτερη ελαστικότητα σε ενδεχόμενες παραμορφώσεις λόγω πιέσεων του περιβάλλοντος εδάφους (Maiolo et al., 2018).

#### **2.2.2.1 Πολυβινυλοχλωρίδιο**

Το μη πλαστικοποιημένο πολυβινυλοχλωρίδιο (UPVC) χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή αγωγών των δικτύων διανομής πόσιμου νερού. Οι σωλήνες από UPVC αποτελούν κατασκευές αρκετά ελαφρύτερες από τις αντίστοιχες γαλβανισμένες μεταλλικές, ενώ εμφανίζουν εσωτερικά κι εξωτερικά λιγότερα προβλήματα από διάβρωση. Οι εν λόγω σωλήνες είναι σχετικά εύκολοι στην

τοποθέτηση, όντας όμως ογκώδεις για τοποθέτηση και χρήση σε τμήματα του δικτύου στο εσωτερικό κτηρίων (WHO, 2006).

Το χλωριωμένο πολυβινυλοχλωρίδιο (CPVC) αποτελεί θερμοπλαστικό υλικό που παράγεται από τον πολυμερισμό του βινυλοχλωριδίου, με επιπρόσθετη χλωρίωση. Οι σωλήνες από CPVC κατασκευάζονται με μεθόδους εξέλασης, και οι συνήθεις διαστάσεις που τους προσδίδονται είναι παρόμοιες με τους χάλκινους. Οι σωλήνες και οι συναρμογές του δικτύου αυτού του τύπου κόβονται εύκολα στα επιθυμητά μήκη και ενώνονται με ειδική διαδικασία συγκόλλησης (συγκόλληση με διαλύτη). Στα πλεονεκτήματα των σωλήνων από CPVC συγκαταλέγονται το χαμηλό βάρος, η αντοχή στη φωτιά και στη διάβρωση (αντοχή στα οξέα), και η μη τοξικότητα, ενώ το CPVC μειώνει την ανάπτυξη μυκήτων, αλγών και βακτηρίων (WHO, 2006).

#### **2.2.2.2 Πολυαιθυλένιο**

Άλλο ένα υλικό της κατηγορίας των πλαστικών υλικών που διατίθεται για την κατασκευή σωληνώσεων και συνδέσμων των δικτύων διανομής πόσιμου νερού, είναι και το πολυαιθυλένιο (PE). Σε σχέση με το υψηλής (HDPE) και το χαμηλής (LDPE) πυκνότητας πολυαιθυλένιο, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή δικτύων αποχέτευσης και άρδευσης αντιστοίχως, το μεσαίας πυκνότητας πολυαιθυλένιο είναι το προτιμώμενο υλικό για την κατασκευή σωλήνων δικτύου διανομής πόσιμου νερού. Αποτελεί υλικό εύκαμπτο και ανθεκτικό για υψηλές εσωτερικές πιέσεις του δικτύου, και η συναρμολόγηση των σωλήνων επιτυγχάνεται μέσω συμπιεστών αρθρώσεων ή ηλεκτροσύντηξης (TEE, 2005).

**Πίνακας 2.1:** Χρονοδιάγραμμα χρήσης των βασικότερων υλικών κατασκευής αγωγών δικτύων διανομής πόσιμου νερού στις Η.Π.Α. κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα (AWWSC, 2002).

ΥΛΙΚΟ	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	'00	'10	'20	'30	'40	'50	'60	'70	'80	'90
Χάλυβας	Όχι										
Χάλυβας	Τσιμέντο (εσωτερικά)										
Χυτοσίδηρος	Όχι										
Χυτοσίδηρος	Τσιμέντο (εσωτερικά)										
Ελατός σίδηρος	Τσιμέντο (εσωτερικά)										
Ελατός σίδηρος	Τσιμέντο (εσωτερικά) – PE (εξωτερικά)										
Αμίαντος Τσιμέντο	Όχι										
Οπλισμένο σκυρόδεμα	Όχι										
Προεντεταμένο σκυρόδεμα	Όχι										
PVC	Όχι										
MDPE	Όχι										
		Εμπορικά διαθέσιμο		Σε κύρια χρήση							

### 3. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

Σε εθνικό αλλά και διεθνές επίπεδο υπάρχουν διάφορα πρότυπα και διαδικασίες πιστοποίησης των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των δικτύων διανομής πόσιμου νερού. Επομένως, η κάθε χώρα κατά περίπτωση υιοθετεί τα ήδη υπάρχοντα πρότυπα και απαιτεί τα υλικά να είναι πιστοποιημένα, ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του εκάστοτε δικτύου. Οι παράγοντες που διερευνώνται πρωτίστως για την πιστοποίηση καταλληλότητας των υλικών, συνοψίζονται στα παρακάτω ερωτήματα (WHO, 2006):

- Είναι το υπό εξέταση προϊόν ή υλικό κατάλληλο για την εφαρμογή;
- Θα είναι επιβλαβές υπό φυσιολογική χρήση για την υγεία της κοινότητας που θα καταναλώσει το νερό;
- Υπάρχει κίνδυνος απελευθέρωσης του υλικού κατασκευής στο περιβάλλον (π.χ. στο πόσιμο νερό του δικτύου) σε τυχαία στιγμή κατά τη λειτουργία του δικτύου, ή και μετά τη λήξη της διάρκειας ζωής του προϊόντος;

Οι κάτωθι παράγοντες πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή κατάλληλων υλικών για την κατασκευή δικτύων διανομής πόσιμου νερού (National Research Council - Washington DC, 2006):

- Κίνδυνοι και θέματα ασφάλειας κατά την εργασία με τα υλικά
- Διαθεσιμότητα και κόστος του υλικού
- Συμβατότητα μεταξύ των διαφορετικών υλικών κατασκευής του δικτύου και με το περιβάλλον έδαφος

Για να επιτευχθεί η μεταφορά υψηλής ποιότητας πόσιμου νερού μέσω του δικτύου διανομής, πρέπει καταρχήν τα υλικά κατασκευής του δικτύου να μην επηρεάζουν τις φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους του νερού. Οι σωληνώσεις και τα λοιπά εξαρτήματα ενός δικτύου διανομής πόσιμου νερού, δεν πρέπει να περιέχουν επιβλαβείς ουσίες άνω του επιτρεπτού ορίου που θα μπορούσαν να διαφύγουν μέσα στο νερό. Ο μόλυβδος, το κάδμιο και το αρσενικό αποτελούν παραδείγματα τέτοιων ρυπαντών. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας και άλλοι εθνικοί φορείς έχουν αναπτύξει οδηγίες και προτυποποιήσεις που θέτουν τα μέγιστα αποδεκτά όρια μετάλλων, ενώσεων και άλλων ρυπαντών στο πόσιμο νερό των



δημόσιων δικτύων διανομής. Αυτά τα όρια μετατρέπονται ούτως ώστε να εφαρμόζονται στον υπολογισμό των ρυπαντών που μπορούν να εκλυθούν στο νερό από τις σωληνώσεις και τα λοιπά εξαρτήματα του δικτύου. Για παράδειγμα, μια προτυποποίηση μπορεί να απαιτεί ο βαθμός διαφυγής στο νερό ενός βαρέος μετάλλου από τα υλικά του δικτύου, να μην υπερβαίνει το 10% της επιτρεπόμενης τιμής ανεύρεσης του μετάλλου αυτού στο πόσιμο νερό, βάσει δοκιμών που προσομοιώνουν τη χρήση και τις συνθήκες λειτουργίας του δικτύου (WHO, 2006).

Επιπρόσθετα, άλλο ένα κριτήριο επιλογής του κατάλληλου υλικού, αποτελούν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους στο οποίο θα τοποθετηθεί και θα λειτουργήσει ένα δίκτυο. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους – δικτύου, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή συγκεκριμένου υλικού, ιδιαίτερα για την κατασκευή σωληνώσεων και λοιπών συνδετικών εξαρτημάτων (Maiolo et al., 2018).

Τυπικά η επιλογή του κατάλληλου υλικού βασίζεται σε παραμέτρους όπως η αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη, η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά, ο συντελεστής τραχύτητας, και το κόστος παραγωγής και τοποθέτησης του υλικού. Στην πραγματικότητα όμως, η διαθεσιμότητα του υλικού και οικονομικοί παράγοντες αποτελούν κύριους γνώμονες επιλογής των υλικών κατασκευής δικτύου (AWWA, 1986).

## **4. ΑΠΩΛΕΙΑ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΙΤΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

### **4.1 Συνιστώσες της λειτουργικής ακεραιότητας**

Η λειτουργική ακεραιότητα ενός δικτύου διανομής πόσιμου νερού αποτελείται από τρεις συνιστώσες: την φυσική και υδραυλική ακεραιότητα του δικτύου, και την ακεραιότητα της ποιότητας του πόσιμου νερού. Η φυσική ακεραιότητα έγκειται στη διατήρηση ενός φυσικού φραγμού μεταξύ του εσωτερικού του δικτύου και του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ η υδραυλική ακεραιότητα αναφέρεται στη διατήρηση της επιθυμητής ροής, πίεσης και παραμονής του νερού εντός του δικτύου διανομής. Η διαφύλαξη της ποιότητας του πόσιμου νερού στον τελικό αποδέκτη – καταναλωτή, μέσω της πρόληψης τυχόν επιμόλυνσης που θα προκύψει από διεργασίες στο εσωτερικό του δικτύου, αποτελεί την τρίτη συνιστώσα ακεραιότητας του δικτύου (Κανακούδης, 1998). Ο παραπάνω διαχωρισμός είναι σημαντικός, διότι οι τρεις συνιστώσες έχουν διαφορετικές αιτίες απώλειας της ακεραιότητάς τους, και οι απώλειες αυτές προκαλούν διαφορετικές συνέπειες στην ομαλή λειτουργία του δικτύου. Επιπρόσθετα, διαφοροποιούνται οι μέθοδοι εντοπισμού και πρόληψης των απωλειών, ώστε να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες στρατηγικές ανάκτησης της λειτουργικής ακεραιότητας του δικτύου (National Research Council – Washington DC, 2006). Οι συνιστώσες της λειτουργικής ακεραιότητας του δικτύου διανομής, καθώς και οι κυριότερες αιτίες απώλειας αυτών, συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1 ακολούθως.

**Πίνακας 4.1:** Αιτίες απώλειας της λειτουργικής ακεραιότητας των δικτύων διανομής πόσιμου νερού (Κανακούδης, 1998 και National Research Council – Washington DC, 2006).

<b>Φυσική ακεραιότητα του δικτύου (θραύσεις αγωγών λόγω εσωτερικών πιέσεων, εδαφικών και κλιματικών συνθηκών)</b>	<b>Υδραυλική ακεραιότητα του δικτύου (απώλειες νερού και αλλαγή υδραυλικών χαρακτηριστικών ροής του νερού)</b>	<b>Ποιοτική ακεραιότητα του νερού του δικτύου (βιορύπανση και επιμόλυνση του νερού)</b>
Περιμετρικές θραύσεις Αξονικές θραύσεις Σημειακές θραύσεις Ανομοιόμορφες θραύσεις Τυχαίες θραύσεις Θραύσεις σε ενώσεις και συνδέσεις των αγωγών	Διαρροές σε ενώσεις και συνδέσεις των αγωγών Διαρροές σε οπές λόγω σημειακής διάβρωσης Αναστροφή ροής Εκτεταμένη παραμονή – στασιμότητα του νερού εντός του δικτύου Οξείδωση εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού Σχηματισμός προϊόντων διάβρωσης στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού Μείωση συντελεστή τραχύτητας C αγωγού (αύξηση τραχύτητας)	Αυξημένη θολότητα Αυξημένα επίπεδα μετάλλων (ασβέστιο, μόλυβδος, χαλκός, σίδηρος κ.ά.) Χρωματική αλλαγή (κόκκινο νερό) Παρουσία ιζήματος Οσμή – γεύση Ανάπτυξη βιοφίλμ

## 4.2 Αστοχίες και προβλήματα των υλικών

Οι αιτίες των προβλημάτων και αστοχιών που κάνουν την εμφάνισή τους στα δίκτυα διανομής πόσιμου νερού, και που δύνανται να επηρεάσουν τη δημόσια υγεία των καταναλωτών, διακρίνονται σε εσωτερικές και εξωτερικές (Kanakoudis, 2004). Η πρωταρχική λειτουργία ενός δικτύου διανομής πόσιμου νερού είναι η παροχή της απαιτούμενης ποσότητας και ποιότητας νερού υπό κατάλληλη πίεση. Συνιστά επομένως αστοχία και πρόβλημα του δικτύου η μη τήρηση των προαναφερθέντων απαιτήσεων. Η ποιότητα του πόσιμου νερού μπορεί να υποβαθμιστεί κατά τη διαδικασία της διανομής του εξαιτίας του τρόπου επεξεργασίας του πριν τη διανομή, βιολογικών και χημικών δράσεων που λαμβάνουν χώρα στο νερό κατά τη διανομή, αντιδράσεων μεταξύ του νερού και του υλικού κατασκευής του δικτύου διανομής, καθώς και μόλυνσης που μπορεί να προκύψει από εξωτερικές πηγές λόγω διαρροών και θραύσεων των αγωγών και λοιπών εξαρτημάτων του δικτύου. (National Research Council – Washington DC, 2005). Όπως αποτυπώνεται και στον Πίνακα 4.2 παρακάτω, αναλόγως του υλικού κατασκευής, διάφοροι εσωτερικοί κι εξωτερικοί παράγοντες του δικτύου, οδηγούν σε μηχανικές αστοχίες και προβλήματα διάβρωσης.

**Πίνακας 4.2:** Συνηθέστερες αιτίες αστοχίας των αγωγών δικτύου διανομής νερού, για τα βασικότερα υλικά κατασκευής (AWWA, 1986).

<b>Υλικό αγωγού</b>	<b>Αιτίες αστοχίας αγωγού</b>
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) Πολυαιθυλένιο (PE)	Κάμψη, κακή ευθυγράμμιση και/ή διαρροή σε αρθρώσεις και σημεία σύνδεσης των αγωγών, αξονική θραύση, έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία, υψηλή πίεση και συχνές πτώσεις πίεσης του νερού στο εσωτερικό του αγωγού
Ελατός σίδηρος Χυτοσίδηρος	Εσωτερική - Εξωτερική διάβρωση, κακή ευθυγράμμιση και/ή διαρροή σε αρθρώσεις και σημεία σύνδεσης των αγωγών, σφάλματα χύτευσης – διαμόρφωσης
Χάλυβας	Εσωτερική - Εξωτερική διάβρωση, κάμψη, διαρροή σε αρθρώσεις, ατέλειες στις συγκολλητές ενώσεις
Χαλκός	Εσωτερική - Εξωτερική διάβρωση, κακή εγκατάσταση και/ή διαρροή σε σημεία σύνδεσης των αγωγών, μεγάλη αναλογία επιφάνειας – όγκου
Αμίαντος – Τσιμέντο	Εσωτερική διάβρωση, ρωγμάτωση, κακή ευθυγράμμιση και/ή διαρροή σε αρθρώσεις
Σκυρόδεμα (οπλισμένο/προεντεταμένο)	Εξωτερική διάβρωση σε περίπτωση επαφής με υπόγεια ύδατα, αυξημένο βάρος, δυσκολία ευθυγράμμισης, κατασκευαστικά σφάλματα

## 5. ΘΡΑΥΣΕΙΣ

### 5.1 Παράγοντες και είδη θραύσεων

Οι θραύσεις των αγωγών αποτελούν φαινόμενο που επηρεάζει την φυσική ακεραιότητα του δικτύου διανομής πόσιμου νερού. Θραύση μπορεί να προκύψει όταν οι εξωτερικές ή εσωτερικές πιέσεις στον αγωγό υπερβούν τα όρια της μηχανικής αντοχής του. Κύριους παράγοντες πρόκλησης θραύσης ενός αγωγού αποτελούν οι εξωτερικές (κλιματικές και εδαφολογικές) συνθήκες και οι απότομες και συχνές αυξομειώσεις της εσωτερικής πίεσης λειτουργίας του δικτύου. Τα γηρασμένα ή ακατάλληλα, αλλά και τα έντονα διαβρωμένα υλικά είναι πιο επιρρεπή σε θραύση, η οποία εμφανίζεται με διάφορες μορφές, όπως η περιμετρική, αξονική, σημειακή, ανομοιόμορφη και τυχαία, ενώ δύναται να εμφανιστεί και στα σημεία σύνδεσης των αγωγών, ιδιαίτερα όταν προϋπάρχει και διαρροή (Κανακούδης, 1998).

Στις περιπτώσεις των αγωγών μεγάλης διαμέτρου, οι οποίοι υφίστανται συνήθως και τις μεγαλύτερες μηχανικές καταπονήσεις, οι συνηθέστεροι τύποι μηχανικής αστοχίας είναι οι εξής (Rajeev et al., 2013):

- Διαμήκεις θραύσεις
- Αποκόλληση τεμαχίου του αγωγού
- Οπές και διάτρηση
- Διαρροές σε συνδέσμους και αρθρώσεις

### 5.2 Διαρροές

Οι διαρροές σε αγωγούς και δεξαμενές αποθήκευσης του δικτύου διανομής πόσιμου νερού, συχνά προηγούνται και υποβοηθούν τη θραύση σε σημεία του δικτύου, όπως ενώσεις και συνδέσεις αγωγών. Διαρροές επίσης συμβαίνουν και σε διαβρωμένες επιφάνειες του δικτύου. Προκύπτει συνεπώς από τα παραπάνω πως οι διαρροές εξαρτώνται σημαντικά από το υλικό κατασκευής των αγωγών, συνδέσμων κι ενώσεων του δικτύου.

Όντας δυσχερής ο εντοπισμός τους, αλλά και ο υπολογισμός της ποσότητας του νερού που χάνεται, οι διαρροές αποτελούν σημαντικό ποσοστό των απωλειών

νερού στα δίκτυα διανομής νερού παγκοσμίως. Μαζί με τις θραύσεις απαρτίζουν τις πραγματικές (φυσικές) απώλειες νερού στο δίκτυο, οι οποίες σε συνδυασμό και με άλλους τύπους εμπορικών (φαινόμενων) απωλειών νερού αποτελούν το λεγόμενο μη ανταποδοτικό νερό. Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος των παραπάνω απωλειών σε παγκόσμιο επίπεδο, προκύπτει από μετρήσεις της Παγκόσμιας Τράπεζας πως εάν επιτευχθούν τα διεθνώς αποδεκτά όρια του 5-10% στο μη ανταποδοτικό νερό, θα μπορούσε να υδροδοτηθεί επιπλέον από το εξοικονομούμενο νερό, περίπου το 1/4 του συνολικού πληθυσμού (Κανακούδης, 1998). Επιπρόσθετα, πολλές εταιρείες ύδρευσης παγκοσμίως έχουν θέσει ένα επιτρεπτό όριο απωλειών νερού λόγω διαρροών, της τάξεως του 8 – 10%. Και τούτο διότι έχει αποδειχθεί στην πράξη πως το κόστος αποκατάστασης των διαρροών κάτω από αυτό το ποσοστό, είναι πολλαπλάσια υψηλότερο από τα οφέλη εντοπισμού και επιδιόρθωσης της συγκεκριμένης αστοχίας (Ocierpa et al., 2019).

### **5.3 Κλιματικές και εδαφολογικές συνθήκες**

Ένα είδος εξωτερικών φορτίσεων που υφίστανται οι αγωγοί του δικτύου διανομής πόσιμου νερού, είναι και η κίνηση των οχημάτων του οδικού δικτύου. Συνεπώς, τα τμήματα του δικτύου που τοποθετούνται υπόγεια, καλούνται να ανταπεξέλθουν στις επιπρόσθετες πιέσεις που ασκούν τα υπερκείμενα στρώματα του εδάφους, λόγω της κίνησης αυτής. Οι αστοχίες που εμφανίζονται στους αγωγούς του δικτύου εξαιτίας των παραπάνω μηχανικών καταπονήσεων, οφείλονται σε μεγάλο βαθμό σε μη υδραυλικούς παράγοντες, όπως το είδος του υλικού κατασκευής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών, αλλά και το βάθος τοποθέτησής τους (Li et al., 2015).

Η μελέτη της σχέσης μεταξύ υλικού κατασκευής και αστοχιών από την κίνηση των οχημάτων, που οδηγεί σε θραύσεις και ρωγματώσεις των αγωγών, δεν έχει καταλήξει σε σαφή συμπεράσματα. Κι αυτό διότι παράγοντες όπως η γεωμετρία του αγωγού (διάμετρος, πάχος τοιχώματος), το βάθος τοποθέτησής του υπογείως και το υλικό κατασκευής του οδοστρώματος, φαίνεται πως παίζουν σημαντικότερο ρόλο στην εμφάνιση των προαναφερθέντων προβλημάτων. Όσον αφορά στους αγωγούς από κράματα σιδήρου (χάλυβας, χυτοσίδηρος και ελατός σίδηρος), έχει παρατηρηθεί αστοχία τους λόγω θραύσεων και ρωγμών εξαιτίας της υπερκείμενης κίνησης οχημάτων, συνυπάρχουν όμως κι άλλοι βασικοί επιβαρυντικοί παράγοντες,

όπως η εντονότερη διαβρωτική δραστηριότητα και οι μεγάλες εσωτερικές πιέσεις (Li et al., 2015 και Rajeev et al., 2013).

Συμπερασματικά, το υλικό κατασκευής των υπόγειων μερών του δικτύου διανομής, η διάμετρος και το πάχος του τοιχώματος των αγωγών, καθορίζουν το ελάχιστο βάθος τοποθέτησής τους, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας τους από την υπερκείμενη κυκλοφορία των οχημάτων (Aschilean et al., 2018).

Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή λειτουργίας ενός δικτύου διανομής νερού, επηρεάζουν κι αυτές με τη σειρά τους τη μηχανική συμπεριφορά των υπόγειων αγωγών. Οι ακραίες θερμοκρασίες και αυξομειώσεις αυτών, προκαλούν αλλαγές στην υγρασία και τη σύσταση των εδαφών, με αποτέλεσμα τις μεταβολές στην εδαφική στρωμάτωση, μέσω κινήσεων, καθιζήσεων και συρρίκνωσης του εδάφους που περικλείει το υπόγειο δίκτυο αγωγών. Ως εκ τούτου, το δίκτυο διανομής γίνεται αποδέκτης αυτών των μεταβολών και καταπονείται μηχανικά, με κύριους εκφραστές αυτής της καταπόνησης τις θραύσεις και τις ρωγματώσεις των αγωγών (Kleiner et al., 2002).

Σε γενικές γραμμές οι μεταλλικοί σωλήνες, λόγω υλικού κατασκευής, εμφανίζουν μεγαλύτερη ελαστικότητα κι έχουν υψηλότερο όριο διαρροής (το όριο μηχανικής καταπόνησης πριν τη μόνιμη πλαστική παραμόρφωση) από τους αντίστοιχους πλαστικούς ή αμιαντοτσιμεντένιους. Επομένως, εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά στις διατμητικές τάσεις και τις κάμψεις που ασκούνται πάνω τους από τις κινήσεις του εδάφους. Πιο επιρρεπείς σε θραύσεις ή ρωγματώσεις εμφανίζονται οι αγωγοί από αμιαντοτσιμεντό, ενώ οι πλαστικοί (πολυβινυλοχλωρίδιο) ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στις εδαφικές κινήσεις. Οι περισσότεροι χαλύβδινοι και πλαστικοί αγωγοί, κάτω από τέτοιες συνεχιζόμενες εξωτερικές πιέσεις, θα αποκτήσουν και ένα βαθμό πλαστικής (μόνιμης) παραμόρφωσης, επιτρέποντάς τους όμως να συνεχίζουν να λειτουργούν κανονικά (Wols et al., 2014).

Παρόμοιες επιπτώσεις στο δίκτυο μπορούν να επιφέρουν και οι αιφνίδιες παραμορφώσεις του εδάφους, εξαιτίας σεισμικής δραστηριότητας. Τα υπόγεια δίκτυα υφίστανται σε αυτήν την περίπτωση ισχυρές ταλαντώσεις, που μπορούν να επιφέρουν αστοχία με τη μορφή θραύσεων και μόνιμων παραμορφώσεων των αγωγών. Και σε αυτή την περίπτωση, το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου καθορίζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής έναντι της σεισμικής καταπόνησης (Σταυρακαντωνάκης, 2017).



Το είδος της θραύσης που επικρατεί στην περίπτωση αστοχίας εξαιτίας εδαφικών κινήσεων οποιασδήποτε αιτιολογίας, είναι η περιμετρική θραύση, και σε πολύ μικρότερο βαθμό εμφανίζονται αξονικές (διαμήκεις) θραύσεις (Wols et al., 2014).

#### **5.4 Εσωτερική πίεση λειτουργίας του δικτύου**

Η εσωτερική πίεση λειτουργίας ενός δικτύου είναι συνήθως χαμηλή, παρόλα αυτά υπάρχουν παράγοντες που καθορίζουν το επιθυμητό εύρος πιέσεων, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτούνται υψηλότερες πιέσεις για τη μεταφορά του νερού εντός του δικτύου (π.χ, υψηλά κτήρια αστικών περιοχών, ορεινές περιοχές, γεωγραφικές θέσεις δεξαμενών). Εμπειρικά, οι ταχύτητα ροής του νερού εντός των αγωγών του δικτύου δεν ξεπερνά τα 1,5 – 2 m/sec. Συνεπώς, το επιθυμητό εύρος πιέσεων του δικτύου καθορίζεται κι από τη διάμετρο των αγωγών (Κουτσογιάννης, 2015).

Σαν μια βασική λειτουργική παράμετρος του δικτύου, η εσωτερική πίεση λειτουργίας αποτελεί σημαντική αιτία θραύσεων, ρωγματώσεων και διαρροών στους αγωγούς του δικτύου διανομής. Απότομη αύξηση της πίεσης του νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα, αλλά και οι ξαφνικές και έντονες διακυμάνσεις στην πίεση λειτουργίας του δικτύου, προκαλούν σοβαρό υδραυλικό πλήγμα και εσωτερικές φορτίσεις στους αγωγούς, με αποτέλεσμα την υπέρβαση της αντοχής και την πιθανή επακόλουθη αστοχία τους. Οι υπερπιέσεις στο δίκτυο επιφέρουν συνήθως θραύση των αγωγών και διαρροές, ενώ οι υποπιέσεις υποβάλλουν τους αγωγούς σε θλίψη από το υπερκείμενο έδαφος (Μαντσουκίδου, 2019).

#### **5.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών**

Σε συνάρτηση με το υλικό κατασκευής, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός αγωγού επηρεάζουν την αντοχή του σε θραύση. Κι αυτό διότι έχει παρατηρηθεί πως η μικρή διάμετρος και το μειωμένο πάχος τοιχώματος, καθιστούν τον αγωγό πιο ευάλωτο σε μηχανικές αστοχίες λόγω επιβαλλόμενων πιέσεων. Επιπρόσθετα, το μήκος ενός αγωγού, καθορίζει την επηρεαζόμενη από τις εσωτερικές πιέσεις επιφάνεια του δικτύου (Boxall et al., 2007).

Οι μεταλλικοί σωλήνες εμφανίζουν γενικά καλύτερη αντοχή στα εσωτερικά υδραυλικά πλήγματα, αφενός λόγω υλικού, αλλά και γεωμετρικών χαρακτηριστικών (αυξημένη διάμετρος και πάχος τοιχώματος).

## 6. ΔΙΑΒΡΩΣΗ

### 6.1 Γενικά

Η διάβρωση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στη λειτουργία των δικτύων διανομής πόσιμου νερού, λόγω των επιπτώσεών της στην ασφαλή κατανάλωση του νερού. Η υποβάθμιση των υλικών του δικτύου εξαιτίας της διάβρωσης καθιστά αναγκαίες εξαιρετικά δαπανηρές παρεμβάσεις για επισκευή, αντικατάσταση και συντήρηση του δικτύου. Η διαδικασία της διάβρωσης απαντάται κυρίως στα μεταλλικά υλικά του δικτύου, αλλά και σε επιφάνειες από αμίαντο, τσιμέντο και σκυρόδεμα (AWWA – Orflow, 2015).

Η γήρανση των υλικών κατασκευής ενός δικτύου είναι μια αναπόφευκτη διαδικασία, και η διάβρωση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη φυσική γήρανση των υλικών. Όλα τα υλικά επομένως θα απωλέσουν τις αρχικές τους ιδιότητες με την πάροδο του χρόνου. Η έκταση της διάβρωσης έχει άμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε υλικού. Εκτός όμως του υλικού κατασκευής, διάφοροι παράγοντες επιδρούν στο βαθμό δημιουργίας και τη σύσταση των διαβρωτικών προϊόντων, όπως οι μικροοργανισμοί, οι παράμετροι ροής και η ποιότητα του νερού του δικτύου (Lee et al., 2005).

Σε γενικές γραμμές, τα υλικά που έχουν σαν βάση το τσιμέντο, υφίστανται τη γρηγορότερη φθορά λόγω διάβρωσης. Το σκυρόδεμα και το αμιαντοτσιμέντο απελευθερώνουν προϊόντα ασβεστίου και ίνες αμιάντου στο πόσιμο νερό. Τα μεταλλικά υλικά, όπως τα κράματα σιδήρου κι ο χαλκός, είναι ελαφρώς πιο ανθεκτικά στη διάβρωση, παρόλα αυτά η οξείδωσή τους κατά τη διαβρωτική διαδικασία διαλυτοποιεί μεταλλικά στοιχεία στο νερό, όπως σίδηρο, μόλυβδο, κάδμιο, ψευδάργυρο και χαλκό. Τα πλαστικά υλικά με τη σειρά τους, ακόμη και σαν πιο ανθεκτικά και αδρανή υλικά έναντι της διάβρωσης, εμφανίζουν μικροσκοπικές κοιλότητες σημειακής διάβρωσης, παρέχοντας έτσι πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη βιοφίλμ. Σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα της διάβρωσης εξελίσσεται και αμφίδρομα, αφού η ανάπτυξη βιοφίλμ στις εσωτερικές επιφάνειες των υλικών, ενισχύει περαιτέρω τη διαβρωτική διαδικασία. Επιπρόσθετα, μια διαβρωμένη εξωτερική επιφάνεια αγωγού, επιτρέπει τη μικροβιακή επιμόλυνση του

νερού μέσω του φαινομένου της διαπέρασης, αναλόγως του υλικού κατασκευής (Wagner, 1994).

Η ηλεκτροχημική διάβρωση λαμβάνει κατά κύριο λόγο χώρα στις επιφάνειες των δικτύων διανομής πόσιμου νερού, ενώ η παρουσία απολυμαντικού μέσου και οργανικού φορτίου στο νερό ενισχύουν παράλληλα και την πιθανότητα εμφάνισης βιολογικής (μικροβιακά επηρεαζόμενης) διάβρωσης. Μηχανική διάβρωση ενδέχεται να συμβεί στα τοιχώματα των αγωγών λόγω της ροής του νερού (ειδικά εάν στο νερό υπάρχουν έντονα φυσαλίδες και αιωρήματα), ενώ υπό συνεχή μηχανική καταπόνηση η διαβρωτική διαδικασία επισπεύδεται, οδηγώντας ενίοτε το υλικό του δικτύου σε ψαθυρή θραύση (Rajeev et al., 2014).

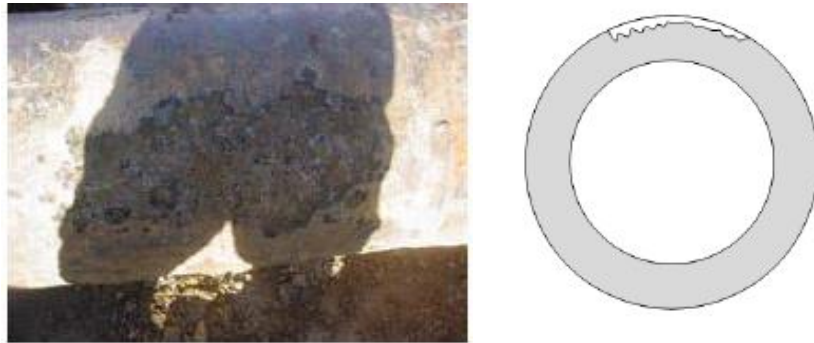
## **6.2 Διαβρωτικότητα του νερού**

Η ικανότητα απόθεσης αλάτων ασβεστίου, κυρίως ανθρακικών ( $\text{CaCO}_3$ ), αλλά και η διαβρωτικότητα του νερού που ρέει στο δίκτυο, εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το pH, το διαλυμένο οξυγόνο και η ταχύτητα ροής του νερού. Ο δείκτης κορεσμού (SI), ή αλλιώς και δείκτης Langelier, αποτελεί μέγεθος το οποίο υποδηλώνει την τάση του νερού να εναποθέτει άλατα στα υλικά του δικτύου, ή να τα διαβρώνει. Εκφράζεται μαθηματικά με τη διαφορά μεταξύ μετρούμενου και pH κορεσμού του νερού, σύμφωνα με τον τύπο:  $SI = pH - pH_s$ . Για τιμές  $SI > 0$ , το υπερκορεσμένο νερό έχει την τάση να αποθέτει άλατα ανθρακικού ασβεστίου, ενώ για  $SI < 0$ , το νερό θεωρείται διαβρωτικό και διαλύει τα ανθρακικά άλατα. Για  $SI = 0$ , το νερό θεωρείται κορεσμένο σε  $\text{CaCO}_3$  (Asghari et al., 2018).

## **6.3 Είδη διάβρωσης**

Στις εικόνες 6.1, 6.2 και 6.3 που ακολουθούν, απεικονίζονται τα τρία βασικότερα είδη διάβρωσης (ως προς την έκταση και τη γεωμετρία του φαινομένου) που δύνανται να εμφανιστούν στις επιφάνειες των υλικών ενός δικτύου διανομής πόσιμου νερού.

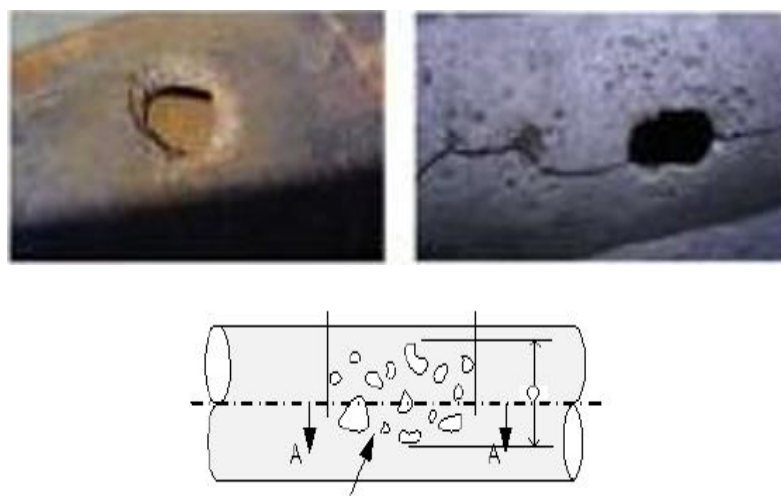
**Εικόνα 6.1:** Τοπική διάβρωση στην εξωτερική επιφάνεια μεταλλικού αγωγού, και σχηματική αναπαράσταση (Rajeev et al., 2013).



**Εικόνα 6.2:** Γενικευμένη διάβρωση στην εξωτερική επιφάνεια μεταλλικού αγωγού, και σχηματική αναπαράσταση (Rajeev et al., 2013).



**Εικόνα 6.3:** Σημειακή διάβρωση με οπές στην εξωτερική επιφάνεια μεταλλικού αγωγού, και σχηματική αναπαράσταση (Rajeev et al., 2013).



## 6.4 Διάβρωση μεταλλικών υλικών

### 6.4.1 Υλικά από κράματα σιδήρου

Η ηλεκτροχημική διάβρωση του σιδήρου, περιλαμβάνει τον σχηματισμό ιόντων σιδήρου, μέσω της οξειδωσης του στοιχειακού σιδήρου, όπως περιγράφεται στην εξίσωση 1 ακολούθως:



Παρουσία διαλυμένου οξυγόνου στο νερό, και τιμές ουδέτερου pH, η καθοδική αντίδραση αναγωγής του οξυγόνου απεικονίζεται στην εξίσωση 2:

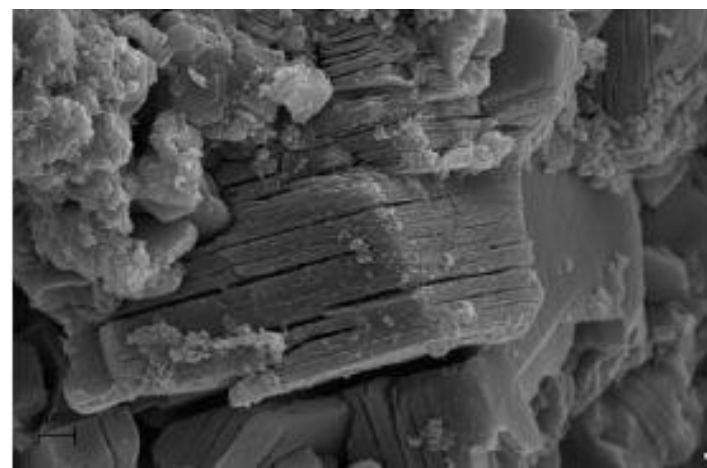
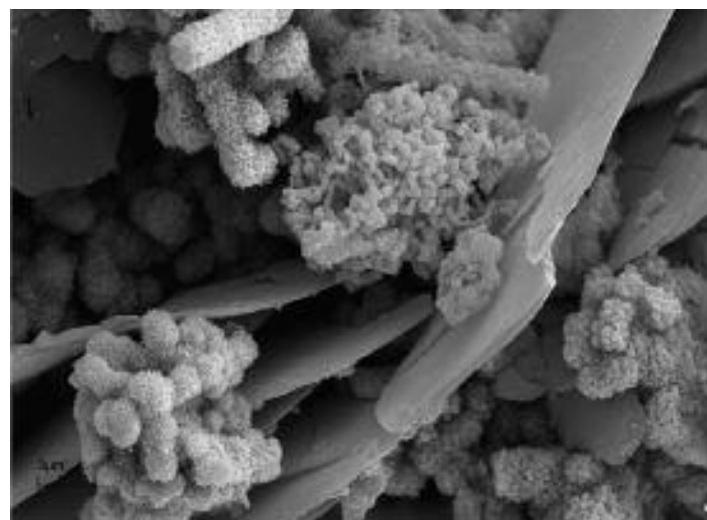
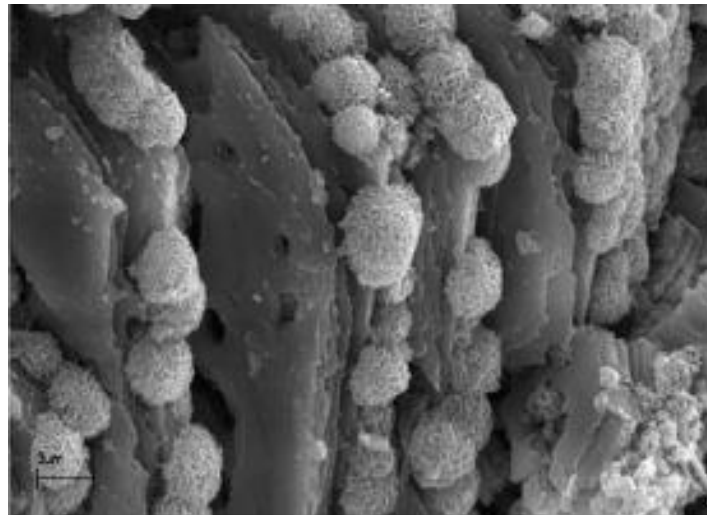


Ο σχηματισμός υδροξειδίου του σιδήρου πραγματοποιείται σύμφωνα με την εξίσωση 3:



Οι ρίζες υδροξυλίου αντιδρούν με τα κατιόντα σιδήρου και σχηματίζουν αρχικά υδροξειδία  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ , ενδιάμεσα υδροξυοξειδία ( $\text{FeOOH}$ ) και τελικώς οξειδία του σιδήρου, τα οποία αποτελούν και τα κύρια προϊόντα διάβρωσης των σιδηρούχων υλικών ενός δικτύου ύδρευσης (Εικ. 6.4). Η εναπόθεση των παραπάνω ενώσεων στα τοιχώματα του υλικού, πραγματοποιείται με τη μορφή πορωδών στρώσεων (Wang et al., 2012). Εκτός από τον σίδηρο που ανευρίσκεται κατά κόρον στις στρωματώσεις των στερεών προϊόντων διάβρωσης, άλλα χημικά στοιχεία που εντοπίζονται εντός τους είναι μέταλλα όπως ασβέστιο, μαγγάνιο, μαγνήσιο, αλουμίνιο και ψευδάργυρος, και αμέταλλα όπως θείο, φώσφορος, οργανικός κι ανόργανος άνθρακας (Peng et al., 2010).

**Εικόνα 6.4:** Απεικόνιση διαφόρων σχηματισμών οξειδίων του σιδήρου ως προϊόντα διάβρωσης εσωτερικής επιφάνειας σιδηροσωλήνα, με τη μέθοδο της μικροσκοπίας ηλεκτρονικής σάρωσης (Swietlik et al., 2012).



Οι αγωγοί από κράματα σιδήρου χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πολλές χώρες για την κατασκευή δικτύων διανομής πόσιμου νερού. Οι αγωγοί αυτοί είναι επιρρεπείς σε εξωτερική και εσωτερική διάβρωση, η οποία με τη σειρά της προκαλεί οικονομικές, υδραυλικές και αισθητικές απώλειες στη λειτουργία του δικτύου. Οι διαρροές νερού και το αυξημένο κόστος συντήρησης και λειτουργίας του δικτύου, είναι ενδεικτικές του προβλήματος της διάβρωσης. Επιπρόσθετα όμως, η διάβρωση εκτός από την καταστροφή του υλικού των αγωγών, ευθύνεται κυρίως για την υποβάθμιση της ποιότητας του προς κατανάλωση πόσιμου νερού, εξαιτίας ανεπιθύμητων χημικών και βιοχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του δικτύου, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα την απελευθέρωση σιδήρου, ως φαινόμενο του κόκκινου νερού (Edwards, 2004).

Η χημική σύσταση του νερού της πηγής παίζει σημαντικό ρόλο στην υποβάθμιση των υλικών κατασκευής του δικτύου διανομής πόσιμου νερού. Πιο συγκεκριμένα, νερό με χαμηλή αλκαλικότητα και pH, μπορεί να αποβεί διαβρωτικό σε ορισμένα υλικά του δικτύου, όπως οι μη επενδεδυμένοι εσωτερικά σιδηροσωλήνες. Η διάβρωση των τελευταίων αποτελεί συνάρτηση της ποιότητας του νερού και των υδραυλικών χαρακτηριστικών ροής του δικτύου, ενώ αποτελεί και τον κύριο λόγο εμφάνισης κόκκινου νερού στους καταναλωτές, λόγω της απελευθέρωσης σιδήρου στο δίκτυο (Imran et al., 2005).

Οι σιδηροσωλήνες θα εμφανίσουν προβλήματα διάβρωσης των εσωτερικών τοιχωμάτων τους, εφόσον εκτεθούν σε νερό οποιασδήποτε ποιότητας. Τα προϊόντα της διάβρωσης σχηματίζονται στα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού με την πάροδο του χρόνου, φτάνοντας σε σταθερή κατάσταση και έχοντας δημιουργήσει ένα σταθερό στρώμα. Η αποσταθεροποίηση αυτού του στρώματος λόγω των υδραυλικών χαρακτηριστικών του δικτύου, ευθύνεται για την απελευθέρωση προϊόντων διάβρωσης εντός του πόσιμου νερού, με επακόλουθη αλλαγή στο χρώμα του. Επομένως, ο βαθμός εμφάνισης κόκκινου νερού, πρέπει να διαχωρίζεται από το βαθμό εσωτερικής διάβρωσης του υλικού του αγωγού (AWWA, 2005).

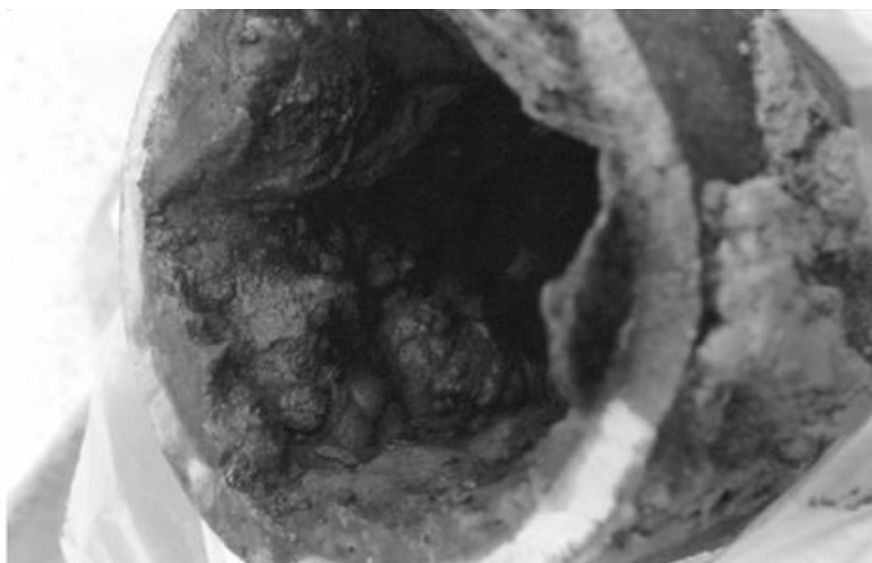
Εκτός από τον σίδηρο που απελευθερώνεται στο νερό λόγω σχηματισμού διαφόρων οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου, μέσω της διάβρωσης ενδέχεται να σχηματιστεί και η λεγόμενη πράσινη σκουριά. Το διαβρωτικό στρώμα του εσωτερικού των αγωγών, αποτελεί αρκετά ανομοιογενή σχηματισμό, που συνήθως



περιλαμβάνει ένα σκληρό αλλά συχνά εύθραυστο κέλυφος, ενώ κάτω από αυτό, το υλικό βρίσκεται κυρίως σε υγρή κατάσταση, περιέχοντας ποικίλες κρυσταλλικές μορφές σκωρίας. Το διαβρωτικό στρώμα μπορεί να αντιδράσει με παραπροϊόντα της χλωρίωσης (κυρίως τριαλογονομένα παράγωγα του μεθανίου), αλλά και με ανθρακικές και θειϊκές ρίζες, κι έτσι να σχηματιστούν κρύσταλλοι αλάτων σκουριάς. Οι πράσινες σκουριές (ειδικά οι μορφές που περιέχουν χλώριο), θεωρούνται ασταθείς οξειδοαναγωγικά ενώσεις, και εύκολα μπορούν να ανευρεθούν στα αιωρούμενα εντός του νερού προϊόντα διάβρωσης (Swietlik et al., 2012).

Τα τελευταία χρόνια η χρήση τεχνολογιών ηλεκτροστατικών επιμεταλλώσεων παρέχουν ένα πιο αποδεκτό αισθητικά εξωτερικό φινίρισμα, αλλά ελάχιστη ή και μηδενική προστασία από διάβρωση στο εσωτερικό των σωληνώσεων. Ως εκ τούτου, η χρήση των γαλβανισμένων σιδηροκραμάτων στην κατασκευή σωληνώσεων δικτύων πόσιμου νερού, έχει μειωθεί σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ περιορίζεται περαιτέρω στις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα ροής του νερού στο δίκτυο είναι χαμηλή ή στατική για μεγάλη χρονική περίοδο (National Research Council – Washington DC, 2006). Οι εικόνες 6.5 και 6.6 που ακολουθούν, αποτυπώνουν χαρακτηριστικά την όψη έντονα διαβρωμένων σιδηρούχων υλικών δικτύου διανομής πόσιμου νερού.

**Εικόνα 6.5:** Εσωτερική διάβρωση και εναποθέσεις σε χυτοσιδηρό αγωγό δικτύου ύδρευσης (National Research Council – Washington DC, 2006).





**Εικόνα 6.6:** Εσωτερική διάβρωση και εξογκώσεις αποθέσεων σε σιδηροσωλήνα δικτύου διανομής νερού (Swietlik et al., 2012).



Ειδικότερα για τους μικροοργανισμούς, έχει υπάρξει ιδιαίτερη μελέτη για την επίδρασή τους στη διαβρωτική φθορά των υλικών, μιας και μπορούν να επιταχύνουν ή και να αναστείλουν τη διαδικασία, μέσω πολύπλοκων αντιδράσεων και μηχανισμών (μικροβιολογικά επηρεασμένη διάβρωση). Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των υλικών του δικτύου από ελατό σίδηρο και χυτοσίδηρο, ο μικροβιακά υποβοηθούμενος οξειδοαναγωγικός κύκλος του σιδήρου, οδηγεί στη δέσμευση ιόντων σιδήρου από βακτήρια, ενισχύοντας έτσι τον σχηματισμό σταθερότερων και συμπαγέστερων διαβρωτικών στρωμάτων. Ως συνέπεια αυτού, αναστέλλεται η περαιτέρω διάβρωση του σιδηρούχου υλικού του δικτύου, και η απελευθέρωση των διαβρωτικών προϊόντων στο πόσιμο νερό. Στον αντίποδα, και στις επιφάνειες από ανοξείδωτο χάλυβα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα σιδηροβακτήρια ανάγουν τον σίδηρο που βρίσκεται στα οξειδία του προστατευτικού στρώματος οξείδωσης, με συνέπεια αυτό το στρώμα παθητικοποίησης να απομακρύνεται και να αντικαθίσταται με ασταθέστερες μεμβράνες, οι οποίες παύουν να προστατεύουν από περαιτέρω διάβρωση (Wang et al., 2014).

#### **6.4.2 Υλικά από χαλκό**

Ο χαλκός αποτελεί μεταλλικό υλικό που μπορεί να διαβρωθεί είτε γενικευμένα στην επιφάνειά του, ή σημειακά. Κι ενώ η γενικευμένη διάβρωση μιας χάλκινης επιφάνειας αγωγού του δικτύου διανομής νερού δεν φαίνεται να αυξάνει την πιθανότητα θραύσης ή διαρροής του, δε συμβαίνει το ίδιο όταν ο χάλκινος αγωγός διαβρωθεί σημειακά – τοπικά. Οι ακαθαρσίες άνθρακα που μπορεί να ανευρίσκονται στα χάλκινα υλικά, ευθύνονται πιθανότατα για την εμφάνιση σημειακού τύπου διάβρωσης, και τα σοβαρά προβλήματα που η τελευταία επιφέρει. Ο άνθρακας των ακαθαρσιών ενδέχεται μέσω αντιδράσεων με το νερό του δικτύου να παράξει ανθρακικές ρίζες, οι οποίες δεσμεύουν τα ιόντα χαλκού και σχηματίζουν έτσι διαλυτά ανθρακικά άλατα του χαλκού (Broo et al., 1997).

#### **6.4.3 Γαλβανική διάβρωση**

Η γαλβανική διάβρωση εμφανίζεται όταν διαφορετικά μεταλλικά υλικά έρχονται σε απευθείας επαφή, όπως συμβαίνει με τα συνδεδεμένα εξαρτήματα ενός δικτύου ύδρευσης. Πιο χαρακτηριστική είναι η περίπτωση επαφής μεταξύ κραμάτων χαλκού και σιδήρου. Η διαφορά στην ηλεκτροχημικότητα των δύο ανόμοιων μετάλλων οδηγεί στην φθορά του λιγότερο ευγενούς (ανοδικού) μετάλλου, μέσω της δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος (κίνηση ηλεκτρονίων). Ρόλο ηλεκτρολύτη παίζει το νερό του δικτύου (ειδικά όταν η αγωγιμότητά του είναι αυξημένη), το οποίο με την κίνησή του διασπείρει το φαινόμενο σε όλη την έκταση του αγωγού (Κανακούδης, 1998).

#### **6.5 Η διάβρωση σε αμίαντο – τσιμέντο και σκυρόδεμα**

Οι αγωγοί από αμιαντοτσιμέντο, αλλά και οι αντίστοιχοι από σκυρόδεμα ή με τσιμεντένια εσωτερική επένδυση, υφίστανται διαβρωτική φθορά όταν το πόσιμο νερό που ρέει εντός τους έχει χαμηλό pH ή αυξημένες συγκεντρώσεις θειικών αλάτων. Σαν αποτέλεσμα, μεταλλικά στοιχεία όπως ασβέστιο, αλουμίνιο, σίδηρος, μαγγάνιο, αλλά και πιο τοξικά μέταλλα όπως κάδμιο και χρώμιο μπορούν να διαφύγουν από την τσιμεντένια μήτρα του υλικού κατασκευής και να καταλήξουν στο νερό (Asghari et al., 2018).

## **7. ΒΙΟΦΙΛΜ**

### **7.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά των βιοφίλμ**

Ένας τυπικός ορισμός των βιοφίλμ (ή αλλιώς βιοϋμενίων) που σχηματίζονται στα δίκτυα ύδρευσης, περιλαμβάνει «μια περίπλοκη μίξη βακτηρίων, μικροβίων, οργανικών και ανόργανων ουσιών, τα οποία συσσωρεύονται σε μικροβιακά παραγόμενες οργανικές πολυμερικές μήτρες, προσκολλημένες στις εσωτερικές επιφάνειες του δικτύου διανομής». Τα βιοφίλμ μπορούν να αποικιστούν από παθογόνους μικροοργανισμούς, οι οποίοι ενδέχεται να προκαλέσουν ασθένειες σε υγιή αλλά και ευάλωτα άτομα. Τα εν λόγω παθογόνα απελευθερώνονται στο νερό μέσω ενός κύκλου που λαμβάνει χώρα εντός του δικτύου, μέσω της συσσώρευσης, ανάπτυξης και θανάτου των μικροοργανισμών (Momba et al., 2000).

Οι αγωγοί μεταφοράς νερού των δικτύων ύδρευσης, προσφέρουν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών, με τις εσωτερικές επιφάνειες των αγωγών και δεξαμενών να αποτελούν τα χαρακτηριστικότερα σημεία μικροβιακού αποικισμού. Καθίσταται λοιπόν πολύτιμη η μελέτη της ποσοτικής και ποιοτικής σύστασης των σχηματιζόμενων βιοφίλμ, υπό το πρίσμα της δημόσιας υγείας. Η δημιουργία βιοφίλμ στο εσωτερικό ενός δικτύου διανομής πόσιμου νερού, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα οσμής και γεύσης στο νερό, απελευθέρωση επικίνδυνων για την υγεία των καταναλωτών παθογόνων μικροοργανισμών, μείωση της απολυμαντικής ικανότητας του μέσου και ενίσχυση της διαβρωτικής φθοράς των υλικών του δικτύου.

### **7.2 Παράγοντες σχηματισμού βιοφίλμ**

Ο σχηματισμός βιοφίλμ στο εσωτερικό των δικτύων, επηρεάζεται κατά κανόνα από τα φυσικοχημικά αλλά και βιολογικά χαρακτηριστικά του προς διανομή νερού, ήτοι τη θερμοκρασία, το pH, αλλά και την παρουσία φυσικά απαντώμενων μικροοργανισμών στο νερό, είτε από την πηγή, ή και μετά την έξοδό του από τη μονάδα επεξεργασίας προς το δίκτυο διανομής (Kelly et al., 2014).

Επιπρόσθετα όμως, ο βαθμός (έκταση) ανάπτυξης βιοφίλμ στις επιφάνειες του δικτύου διανομής νερού από διαφορετικά είδη μικροοργανισμών, εξαρτάται κι από

τα χαρακτηριστικά του ίδιου του δικτύου, όπως τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του, τις μεθόδους συντήρησης, και φυσικά από το υλικό κατασκευής του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, οι επιφανειακές ιδιότητες των υλικών επιδρούν στο βαθμό προσκόλλησης διαφόρων βακτηριακών ειδών στις επιφάνειες, μιας και οι τελευταίες δύνανται να παρέχουν πρόσφορο έδαφος και θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη βακτηρίων. Το βιοφίλμ αποτελεί ουσιαστικά το επίκεντρο αλληλεπίδρασης βακτηριακών πληθυσμών, όπου και προκαλείται μεταβολή των επιφανειακών συνθηκών, με σκοπό τη συντήρηση και διαδοχή των πληθυσμών αυτών (USEPA, 2010). Τα τυπικά στάδια σχηματισμού των βιοφίλμ, απεικονίζονται ακολούθως (Εικόνα 7.1).

**Εικόνα 7.1:** Σχηματικό διάγραμμα τριών βασικών σταδίων σχηματισμού βιοφίλμ. 1: Αρχικώς αντιστρεπτή και ακολούθως αναντίστρεπτη προσκόλληση των μικροοργανισμών στην επιφάνεια, 2: ωρίμανση και ανάπτυξη της αρχικής μήτρας, 3: αποκόλληση και διασκόρπιση στο περιβάλλον (Montana State University - Center of Biofilm Engineering, 2017).



### 7.3 Σχηματισμός βιοφίλμ στις οικιακές δεξαμενές αποθήκευσης πόσιμου νερού

Τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή οικιακών δεξαμενών αποθήκευσης πόσιμου νερού, ως μέρους του δικτύου διανομής, είναι ο χυτοσίδηρος, το πολυαιθυλένιο και ο υαλοβάμβακας (Evison et al., 2001).

Το βασικότερο πρόβλημα που εμφανίζεται κατά τη χρήση οικιακών δεξαμενών πόσιμου νερού, είναι η επιμόλυνση του νερού λόγω συσσώρευσης βακτηρίων εντός της δεξαμενής, με αποτέλεσμα την πρόκληση υδατογενών ασθενειών και το ξέσπασμα μολυσματικών ασθενειών στην κοινότητα. Ασθένειες όπως η χολέρα, ο τυφοειδής πυρετός και η δυσεντερία, διαδίδονται μέσω της κατανάλωσης του νερού. Το βακτήριο *Escherichia Coli* θεωρείται τις περισσότερες φορές υπεύθυνο για τις προαναφερθείσες ασθένειες, με την παρουσία του να θεωρείται ο κυριότερος δείκτης επιμόλυνσης του πόσιμου νερού. Άλλα βακτήρια που εμφανίζονται σε μικροβιολογικές αναλύσεις δειγμάτων πόσιμου νερού οικιακών δεξαμενών είναι τα *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella gallinarum* και *Enterobacter aerogenes* (WHO – Geneva, 2008 και Khan et al., 2017).

Η ανάπτυξη βιοφίλμ και η μικροβιακή αναγέννηση παθογόνων μικροοργανισμών εντός των οικιακών δεξαμενών δύναται να αποτελέσει μείζον πρόβλημα για τη δημόσια υγεία. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και ο χρόνος παραμονής του νερού στη δεξαμενή, ενώ δυσμενείς παράγοντες είναι επίσης ο σχηματισμός ιζήματος εντός της δεξαμενής, η διακοπτόμενη ροή δικτύου και η παρουσία ελάχιστου ή μηδενικού υπολειμματικού χλωρίου στο νερό (Schoenen, 1990).

Το υλικό κατασκευής μιας οικιακής δεξαμενής επηρεάζει την ποιότητα του παρεχόμενου πόσιμου νερού. Πιο συγκεκριμένα, αναλόγως του υλικού κατασκευής, υπάρχει διαφοροποίηση στην βακτηριακή ποικιλομορφία εντός των δεξαμενών, με αποτέλεσμα τα μικροβιολογικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά (οσμή, γεύση) του νερού να μεταβάλλονται. Οι δεξαμενές από υαλοβάμβακα, και σε μικρότερο βαθμό από πολυαιθυλένιο, αναπτύσσουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό τους (λόγω της υψηλότερης διαπερατότητας του φωτός σε αυτές) σε σχέση με τις αντίστοιχες χυτοσιδηρές. Λόγω και της διαφορετικής φύσης του υποστρώματος (μεγαλύτερο πορώδες, άρα και διαθέσιμη επιφάνεια), στις δεξαμενές από

υαλοβάμβακα και πολυαιθυλένιο εμφανίζεται μεγαλύτερη ποικιλομορφία στα είδη βακτηρίων που αναπτύσσονται εντός της δεξαμενής, και ακολούθως ανευρίσκονται στο πόσιμο νερό (Evison et al., 2001). Επίσης, έχει παρατηρηθεί πως τα υλικά από πολυαιθυλένιο, μπορούν να απελευθερώσουν φώσφορο στο πόσιμο νερό. Ο φώσφορος χρησιμοποιείται στην κατασκευή υλικών πολυαιθυλενίου, κι όταν διαφύγει στο νερό, αποτελεί θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών (Lehtola et al., 2005).

#### **7.4 Σχηματισμός βιοφίλμ στους αγωγούς των δικτύων διανομής πόσιμου νερού**

Από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής αγωγών δικτύου, οι επιφάνειες από ανοξείδωτο χάλυβα εμφανίζουν τον μικρότερο βαθμό σχηματισμού βιοφίλμ, σε σχέση με τις πλαστικές επιφάνειες από PE και PVC, όπου η βιορύπανση είναι αυξημένη. Πιθανή εξήγηση αποτελεί το γεγονός πως τα πλαστικά υλικά, λόγω του τρόπου κατασκευής τους, εμφανίζουν μικρορωγμές και πορώδεις, περιοχές που λειτουργούν προστατευτικά για τον ταχύ βακτηριακό αποικισμό και ευνοούν συνεπώς τον σχηματισμό πυκνού βιοϋμενίου στην επιφάνεια του υλικού. Για όλα τα υλικά κατασκευής, το σχηματιζόμενο βιοφίλμ αποτελείται από ένα εύρος μικροοργανισμών, όπως ποικιλία βακτηρίων, αμοιβάδων και πρωτοζώων (Rogers et al., 1994).

Όπως και τα περισσότερα πολυμερή, το πολυαιθυλένιο εμφανίζει μειωμένη αντοχή έναντι φυσικοχημικών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία και η μηχανική φόρτιση. Η προσθήκη ορισμένων συστατικών κατά την παραγωγή αγωγών πολυαιθυλενίου, βοηθά στην αναστολή της φθοράς του υλικού, κι έτσι επιμηκύνεται ο χρόνος ζωής του εξαρτήματος. Παρόλα αυτά, οι ουσίες αυτές που προστίθενται συνεισφέρουν στη δημιουργία οργανικών αρωματικών παραπροϊόντων (όπως φαινόλες), ειδικά υπό την επίδραση οξειδωτικού περιβάλλοντος. Η έκλυση των παραπροϊόντων στο πόσιμο νερό συντελεί στην υποβάθμισή του, καθώς οι μικροοργανισμοί που βρίσκονται στο νερό χρησιμοποιούν αυτά τα παραπροϊόντα σαν θρεπτικό μέσο για την ανάπτυξή τους, επηρεάζοντας έτσι τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του νερού (Kowalska et al., 2013).



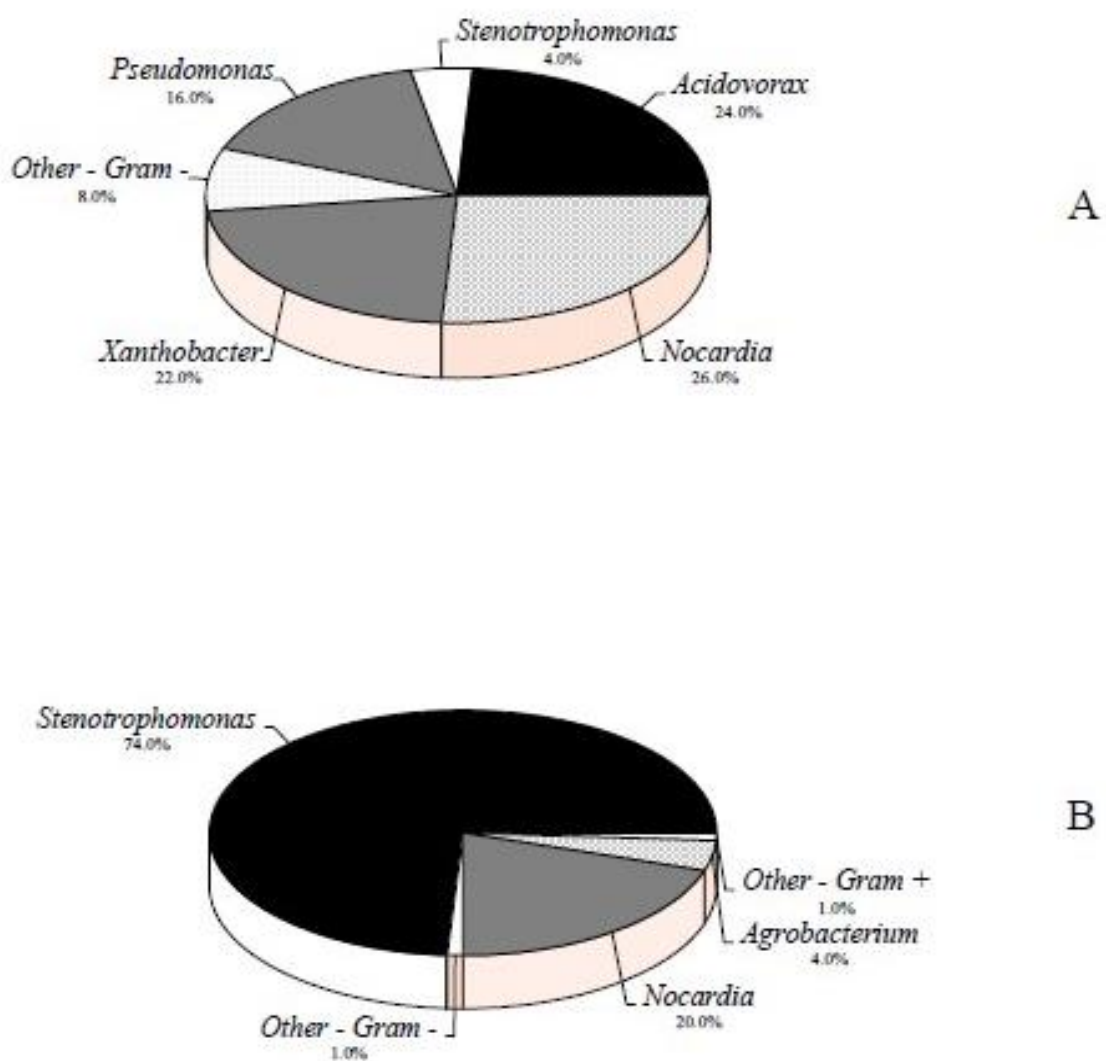
Σημαντική παράμετρος που καθορίζει την πυκνότητα αλλά και τη σύσταση του σχηματιζόμενου βιοφίλμ στις εσωτερικές επιφάνειες των αγωγών του δικτύου, είναι η τραχύτητα και το πορώδες των εσωτερικών επιφανειών. Όσο τραχύτερη και πορώδης είναι μια επιφάνεια, τόσο περισσότερα πιθανά σημεία για αποικισμό από μικροοργανισμούς προσφέρει, μιας και οι μικροκοιλότητες μιας τέτοιας επιφάνειας λειτουργούν σαν 'καταφύγιο' για το σχηματιζόμενο βιοφίλμ. Το παραπάνω φαινόμενο αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της συνέργειας δύο προβλημάτων που εμφανίζουν τα δίκτυα διανομής πόσιμου νερού: της διάβρωσης και της ανάπτυξης βιοφίλμ. Οι αγωγοί από κράματα σιδήρου, όντας πιο επιρρεπείς στη διάβρωση από τους αντίστοιχους πλαστικούς, εμφανίζουν εσωτερικά αυξημένη τραχύτητα και πορώδες λόγω της διαβρωτικής φθοράς, συνεπώς παρέχουν πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη βακτηριακών πληθυσμών (Niquette et al., 2000).

Όσον αφορά στους χάλκινους αγωγούς, έχει παρατηρηθεί πως απαιτείται περισσότερος χρόνος για τον σχηματισμό βιοφίλμ στην εσωτερική επιφάνειά τους σε σχέση με τους πλαστικούς. Πιθανή εξήγηση αποτελεί το γεγονός πως ο χαλκός που ανευρίσκεται στο νερό του δικτύου, αδρανοποιεί βακτήρια και μικροοργανισμούς (Lehtola et al., 2004). Ο κύριος μηχανισμός αυτής της δράσης του χαλκού πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Αρχικά υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της χάλκινης επιφάνειας και της εξωτερικής βακτηριακής μεμβράνης, όπου και προκαλείται ρήξη αυτής. Στη συνέχεια, μέσω των οπών που δημιουργούνται, διαφεύγουν από το κύτταρο νερό και βασικά θρεπτικά συστατικά, με αποτέλεσμα την αποδυνάμωση του κυττάρου. Παρουσία οξυγόνου, τα κατιόντα χαλκού δύνανται να οξειδώσουν δομικά στοιχεία της κυτταρικής μεμβράνης, όπως πρωτεΐνη και λιπαρά οξέα, ενώ ισχυρό είναι και το ενδεχόμενο τα κατιόντα χαλκού να διαταράσσουν κατά την επαφή το ηλεκτρικό δυναμικό που αναπτύσσεται μεταξύ των τοιχωμάτων της κυτταρικής μεμβράνης (Copperhealth, 2020).

Μια τυπική κατάταξη επομένως των υλικών των αγωγών ως προς την πυκνότητα των σχηματιζόμενων βιοφίλμ στις εσωτερικές επιφάνειες (από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη), είναι με βάση τα παραπάνω τα κράματα σιδήρου (με μόνη εξαίρεση τον ανοξείδωτο χάλυβα), έπονται το αμιαντοσιμέντο και τα πολυμερή υλικά, ενώ στις χάλκινες επιφάνειες, ο σχηματισμός βιοφίλμ καθυστερεί περισσότερο από τα υπόλοιπα υλικά. Στις παρακάτω εικόνες (Εικ. 7.2 και 7.3), απεικονίζονται οι

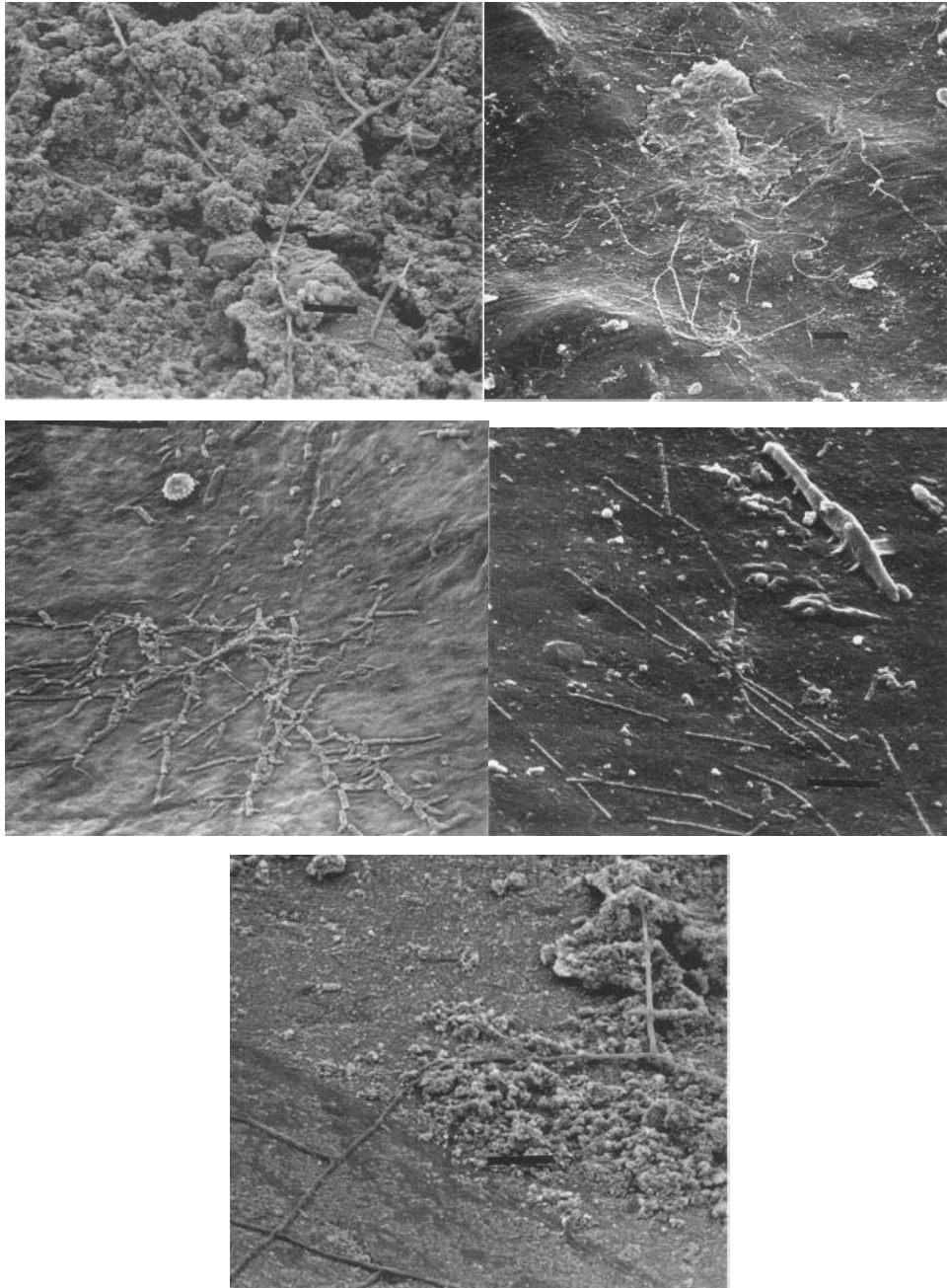
χαρακτηριστικότερες μορφές και είδη μικροβιακών σχηματισμών, στις επιφάνειες αγωγών των κυριότερων υλικών κατασκευής δικτύων διανομής πόσιμου νερού.

**Εικόνα 7.2:** Παρουσία μικροβιακών πληθυσμών στην εσωτερική επιφάνεια αγωγού από Α) ελατό σίδηρο και Β) από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) (National Research Council – Washington DC, 2006).





**Εικόνα 7.3:** Φωτογραφίες σχηματισμών βιοφίλμ σε επιφάνειες διαφόρων υλικών κατασκευής αγωγών μέσω μικροσκοπίας ηλεκτρονικής σάρωσης (κατά σειρά, από δεξιά προς αριστερά: κοινός χάλυβας, πολυαιθυλένιο, μη πλαστικοποιημένο πολυβινυλοχλωρίδιο, χλωριωμένο πολυβινυλοχλωρίδιο και ανοξείδωτος χάλυβας) (Rogers et al., 1994).



## **7.5 Επιπτώσεις του σχηματισμού βιοφίλμ στην απολυμαντική ικανότητα του δικτύου**

Μικροβιακή αναγέννηση και περαιτέρω ενίσχυση της ανάπτυξης βιοφίλμ στην εσωτερική επιφάνεια των υλικών του δικτύου, λαμβάνει χώρα και στην περίπτωση που το ίδιο το υλικό κατασκευής του δικτύου επηρεάζει τη δράση του απολυμαντικού μέσου. Παρόλο που πλαστικά υλικά όπως το πολυαιθυλένιο, αναπτύσσουν εντονότερα βιοφίλμ στις εσωτερικές επιφάνειές τους σε σχέση με μεταλλικά υλικά όπως ο χαλκός, εντούτοις τα απολυμαντικά μέσα ανταποκρίνονται καλύτερα στη μείωση των μικροβιακών πληθυσμών στις πλαστικές επιφάνειες από ότι στις μεταλλικές (Lehtola et al., 2005).

Οι χάλκινοι αγωγοί χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή του δικτύου διανομής πόσιμου νερού που βρίσκεται εντός των κτηρίων και των κατοικιών. Ως εκ τούτου, το νερό μπορεί να παραμείνει εντός των χάλκινων σωληνώσεων για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα πριν καταναλωθεί. Αυτός ο χρόνος έχει διπλή επίδραση, διότι αφενός ευνοεί την ανάπτυξη βιοφίλμ (σε συνδυασμό και με τη μεγάλη αναλογία επιφάνειας αγωγού – όγκου νερού, λόγω μικρής διαμέτρου), αφετέρου δίνει τη δυνατότητα στον χαλκό του αγωγού να αντιδράσει με το χλώριο του απολυμαντικού μέσου (National Research Council – Washington DC, 2006).

Η ενδεχόμενη αντίδραση του χλωρίου του απολυμαντικού μέσου (ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται υποχλωριώδες νάτριο ή χλωραμίνη σαν απολυμαντικό), με τον χαλκό του υλικού του δικτύου, οδηγεί στον σχηματισμό διαλυτών και αδιάλυτων στο νερό αλάτων χαλκού. Αυτό συμβαίνει συνήθως στους χάλκινους αγωγούς νεότερης ηλικίας, όπου δεν έχει προλάβει να δημιουργηθεί το προστατευτικό φιλμ οξειδωσης (παθητικοποίηση) της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού. Με αυτόν τον τρόπο δεσμεύεται κι ελαττώνεται η ποσότητα του διαθέσιμου χλωρίου, άρα και η αποτελεσματικότητα απολυμαντικής δράσης του μέσου (Nguyen et al., 2012). Κατά τον ίδιο τρόπο, τα υλικά του δικτύου από κράματα σιδήρου μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του απολυμαντικού μέσου, μιας και δύναται να συμβεί σειρά από αντιδράσεις μεταξύ του χλωρίου και των προϊόντων διάβρωσης στις εσωτερικές επιφάνειες των αγωγών (AWWA, 2006). Πιο συγκεκριμένα, το χλώριο του απολυμαντικού μπορεί να αντιδράσει με τα οξειδία του σιδήρου που δημιουργούνται

λόγω διάβρωσης, αφού το χλώριο αντικαθιστά το οξυγόνο, σαν πιο οξειδωτικό στοιχείο.

Όσον αφορά στους αγωγούς από κράματα σιδήρου, ο σχηματισμός βιοφίλμ στις επιφάνειες από ανοξείδωτο χάλυβα, αναμένεται να συμβεί με πιο αργούς ρυθμούς σε σχέση με τις επιφάνειες αγωγών από ελατό σίδηρο ή χυτοσίδηρο. Βασική αιτία αυτού αποτελεί το γεγονός πως οι ανοξείδωτοι χάλυβες διαβρώνονται δυσκολότερα από τα υπόλοιπα σιδηρούχα υλικά, επομένως παράγονται σημαντικά λιγότερα προϊόντα διάβρωσης σιδήρου που θα μπορούσαν να αναχαιτίσουν τη δράση του απολυμαντικού μέσου του δικτύου (Donlan et al., 1994).

## **8. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ**

### **8.1 Φαινόμενα διείσδυσης και έκπλυσης ουσιών**

Τα πρότυπα ποιότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δικτύων διανομής νερού οφείλουν να αναθεωρούνται, ώστε να προβλέπεται η επίπτωσή τους στην ποιότητα του νερού, με την έρευνα να επικεντρώνεται προς την κατεύθυνση της χρήσης νέων υλικών με ελάχιστο αντίκτυπο στην ποιότητα του παρεχόμενου νερού. Κι ενώ μέχρι σήμερα η έρευνα στοχεύει κυρίως στη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, θα πρέπει να επεκταθεί και στον έλεγχο της αντοχής σε διείσδυση/διαπέραση των υλικών του δικτύου από μολυσματικές ουσίες (permeation), αλλά και την πιθανότητα έκπλυσης (leaching) υλικών του δικτύου στο νερό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι πλαστικοί σωλήνες, για τους οποίους προτείνεται βάσει οδηγιών ο αποκλεισμός της χρήσης τους σε περιοχές που υπόκεινται σε μόλυνση από αποστάγματα πετρελαίου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα εμφάνισης διείσδυσης (California Code of Regulations). Το φαινόμενο της διείσδυσης (ή διαπέρασης) εμφανίζεται κυρίως στους αμιγώς πλαστικούς σωλήνες και συνδέσμους του δικτύου διανομής, όταν μολυσματικά υλικά και ρυπαντές από το εξωτερικό περιβάλλον διαπερνούν το υλικό κατασκευής του δικτύου και εισέρχονται στο πόσιμο νερό. Τα μολυσματικά υλικά που συνήθως διαπερνούν τους πλαστικούς αγωγούς είναι λιπόφιλα και μη πολικά οργανικά υλικά, όπως οργανικοί διαλύτες και ισχυρά πτητικοί υδρογονάνθρακες. Τα υλικά αυτά διαχέονται εύκολα μέσω της πολυμερικής μήτρας του υλικού κατασκευής και καταλήγουν στο πόσιμο νερό του αγωγού (Holsen et al., 1991).

Και τα δύο προαναφερθέντα φαινόμενα αποτελούν ζητήματα δημόσιας υγείας, μιας και μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητη γεύση και οσμή στο νερό, απελευθέρωση ανεπιθύμητων μετάλλων με αύξηση της συγκέντρωσής τους στο νερό, καθώς και την καταστροφή του απολυμαντικού μέσου λόγω αλληλεπίδρασης με το υλικό του δικτύου (National Research Council – Washington DC, 2006).

## 8.2 Αμίαντος

Η καταπόνηση και η φθορά εκτριβής των προϊόντων αμιάντου, δύνανται να απελευθερώσουν ίνες αμιάντου, οι οποίες μέσω της αναπνοής εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό. Η σταδιακή κατάργηση των προϊόντων που περιέχουν αμίαντο, έχει προέλθει κατά κύριο λόγο από την τεκμηριωμένη πλέον έρευνα πως οι εισπνεόμενες μικροσκοπικές του ίνες αποτελούν καρκινογόνο ουσία και ευθύνονται για καρκινογενέσεις, ιδιαίτερα του αναπνευστικού συστήματος, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO, 2006).

Παρόλα αυτά, ο Π.Ο.Υ. υποστηρίζει πως «δεν υπάρχουν ενδείξεις δυσμενών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία με την κατάποση ινών αμιάντου». Όσον αφορά στο πόσιμο νερό, ο Οργανισμός το 2004 εξέδωσε αναθεωρημένη οδηγία για την ποιότητα του πόσιμου νερού, όπου και αναφέρεται πως «παρά την καλή μελέτη του θέματος, υπάρχουν ελάχιστες ικανοποιητικές αποδείξεις για καρκινογένεση λόγω κατάποσης αμιάντου, σε επιδημιολογικές μελέτες επί πληθυσμών που καταναλώνουν πόσιμο νερό με υψηλές συγκεντρώσεις αμιάντου. Επομένως δεν υπάρχουν πειστικές αποδείξεις πως ο καταπινόμενος αμίαντος αποτελεί κίνδυνο για τη δημόσια υγεία, συνεπώς δεν υπάρχει ανάγκη θεσμοθέτησης ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής για τον αμίαντο στο πόσιμο νερό, βάσει υγειονομικών κριτηρίων».

Η αποσάθρωση των φυσικών πετρωμάτων που περιέχουν αμίαντο οδηγούν στην ανεύρεση ινών αμιάντου στο νερό, των οποίων οι τιμές δεν εμφανίζονται προσαυξημένες στο πόσιμο νερό του δικτύου, με βάση έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε Η.Π.Α., Καναδά και Μ. Βρετανία, περιοχές όπου και χρησιμοποιούνται αγωγοί από αμιαντοσιμέντο στα δίκτυα διανομής πόσιμου νερού. Επομένως, η σταδιακή κατάργηση των αμιαντοσιμεντοσωλήνων στα δίκτυα, βασίστηκε σχεδόν αποκλειστικά στους κινδύνους για την υγεία που προκύπτουν κατά την παραγωγή και τοποθέτησή τους (ΕΥΔΑΠ, 2020).

## 8.3 Έλεγχος της διάβρωσης

Η χρήση μεταλλικών αγωγών στην κατασκευή δικτύων διανομής πόσιμου νερού, τα οποία καλούνται να λειτουργήσουν κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, καθιστούν τα φαινόμενα εξωτερικής και εσωτερικής διάβρωσης των

αγωγών μείζονος σημασίας για τους παρόχους πόσιμου νερού ανά την υφήλιο. Η κατανόηση όμως των παραγόντων που οδηγούν στη διάβρωση, και η χρήση κατάλληλων μεθόδων ελέγχου αυτής μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των εξόδων συντήρησης και λειτουργίας (Romer et al., 2004).

Ο βαθμός εξωτερικής διάβρωσης των υλικών του δικτύου διανομής νερού, εξαρτάται κυρίως από τις περιβάλλουσες συνθήκες (pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα, υγρασία και βακτηριακή δραστηριότητα του εδάφους) και την επαφή μεταξύ διαφορετικών μεταλλικών υλικών. Στις μεθόδους ελέγχου της εξωτερικής διάβρωσης των υλικών του δικτύου διανομής νερού, περιλαμβάνονται παρεμβάσεις όπως η επιλογή κατάλληλου υλικού ανθεκτικού στη διάβρωση (π.χ. πλαστικοί σωλήνες), η εφαρμογή προστατευτικών επικαλύψεων εξωτερικά των υλικών κατά την φάση παραγωγής τους (π.χ. ασφαλική ή σκυροδεμάτινη επίστρωση, μανδύας πολυαιθυλενίου) και η καθοδική προστασία θυσιαζόμενων μεταλλικών ανόδων, συνήθως μαγνησίου και ψευδαργύρου (Kanakoudis, 2004).

Η διάβρωση του δικτύου εσωτερικά, προκαλείται από το νερό που ρέει στους αγωγούς, το οποίο είναι διαβρωτικό προς τα υλικά κατασκευής με τα οποία έρχεται σε επαφή. Η εσωτερική διάβρωση εμφανίζεται συνηθέστερα σε μη επενδεδυμένους εσωτερικά χαλύβδινους και χυτοσιδηρούς αγωγούς, όπως επίσης και στο εσωτερικό χαλύβδινων δεξαμενών νερού. Οι σωλήνες από τσιμέντο και σκυρόδεμα είναι επίσης επιρρεπείς σε εσωτερική διάβρωση όταν το νερό του δικτύου είναι χαμηλής αλκαλικότητας και σκληρότητας. Ιδιαίτερα στην περίπτωση των μεταλλικών σωλήνων ενδέχεται να προκληθεί απελευθέρωση χαλκού, μολύβδου και σιδήρου στο πόσιμο νερό. Ο έλεγχος της εσωτερικής διάβρωσης επιτυγχάνεται με την προσθήκη χημικών ουσιών με ανασταλτική δράση, όπως ορθοφωσφορικά άλατα, σε συνδυασμό με τη ρύθμιση του pH και τον έλεγχο της αλκαλικότητας (NYC - Drinking water supply and quality report, 2020).

Οι μεταλλικοί σωλήνες που κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά, εμφανίζουν ιδιαιτερότητες κατά τη σύνδεσή τους ώστε να αποτελέσουν τμήμα ενός δικτύου ύδρευσης. Είναι λοιπόν ιδιαίτερα σημαντικό να αποκλειστούν οι περιπτώσεις γαλβανικής διάβρωσης που μπορεί να εμφανιστούν στα σημεία σύνδεσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών ενώσεων και την επιλογή σύγχρονων μεθόδων συγκόλλησης, αλλά και με την αποφυγή χρήσης διαφορετικού μεταλλικού υλικού εξαρτημάτων στα σημεία σύνδεσης των αγωγών του δικτύου. Κλείνοντας, κι όσον



αφορά στους χάλκινους αγωγούς, μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται για την τοποθέτηση γειώσεων και λοιπών ηλεκτρικών καλωδιώσεων σε ασφαλή απόσταση από αυτούς, λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού (Romer et al., 2004).

#### **8.4 Καθαρισμός των επιφανειών**

Ο μηχανικός καθαρισμός των εσωτερικών τοιχωμάτων των αγωγών, με σκοπό την απομάκρυνση των συσσωρευμένων υλικών λόγω διάβρωσης, σχηματισμού βιοφίλμ και ιζηματικών επικαθήσεων, πραγματοποιείται με διάφορες τεχνικές απόξεσης. Η απόξεση με ειδικά εργαλεία αποτελεί μια αρκετά «επιθετική» διαδικασία, η οποία απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και δεξιότητες, και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που είναι επιθυμητή η βελτίωση του συντελεστή τραχύτητας του αγωγού, προς αποκατάσταση της επιθυμητής υδραυλικής ροής του δικτύου. Ενέχει όμως την πιθανότητα αποκάλυψης μη επενδεδυμένου υλικού της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού, με όποια επίπτωση μπορεί αυτό να έχει στην ποιότητα του νερού (Ellison et al., 2003). Ο χημικός καθαρισμός των εσωτερικών τοιχωμάτων των αγωγών με τη χρήση ειδικών διαλυμάτων επιφανειοδραστικών ουσιών, δεν αποτελεί διαδεδομένη μέθοδο λόγω του αυξημένου κόστους των χημικών, αλλά και της δυσκολίας στην απόρριψή τους μετά τη χρήση (Estrand et al., 1995).

Ο εσωτερικός καθαρισμός των τοιχωμάτων των αγωγών, συνήθως δεν αποτελεί αυτόνομη διαδικασία, αφού επί το πλείστον ακολουθείται από τεχνικές επανεπένδυσης των αγωγών, στα σημεία που η επένδυση έχει φθαρεί από τον καθαρισμό. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται η τεχνική της εσωτερικής επένδυσης των αγωγών με πολυουρεθάνη, η οποία τείνει να αντικαταστήσει την ευρέως χρησιμοποιούμενη μέχρι σήμερα επένδυση τσιμεντοκονίας, αλλά και με ψεκαστές εποξειδικές ουσίες για αγωγούς δικτύου μεταφοράς νερού χαμηλής σκληρότητας (Deb et al., 1990).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως επιβεβαιώνεται από τις διαθέσιμες μικροβιολογικές, επιδημιολογικές και τεχνικοοικονομικές μελέτες της παγκόσμιας βιβλιογραφίας, το δίκτυο διανομής πόσιμου νερού αποτελεί κάτι περισσότερο από ένα σύστημα μεταφοράς νερού από τη μονάδα επεξεργασίας προς τους καταναλωτές. Τα προβλήματα και οι αστοχίες στη λειτουργία ενός δικτύου, που καθορίζονται από τη συνιστώσα του υλικού κατασκευής των εξαρτημάτων του, επιδρούν σημαντικά στην ποσότητα αλλά πρωτίστως στην ποιότητα του παρεχόμενου πόσιμου νερού. Με βασικό κριτήριο το υλικό κατασκευής, χαρακτηριστικότερα προβλήματα και αστοχίες του δικτύου αποτελούν οι θραύσεις, οι διαρροές, η διάβρωση και η ανάπτυξη βιοφίλμ.

Εκτός από τις οικονομικές απώλειες που προκύπτουν από την ποσότητα νερού που χάνεται ανεκμετάλλετο λόγω θραύσεων και διαρροών στο δίκτυο, οι επιπτώσεις στη δημόσια υγεία είναι εξίσου ή και πιο σημαντικές. Η βιορύπανση που προκαλείται από την ανάπτυξη βιοφίλμ στις εσωτερικές επιφάνειες του δικτύου, αλλά και την είσοδο μολυσματικών ουσιών στο δίκτυο από το εξωτερικό περιβάλλον λόγω ρωγμών, διαρροών και διαπέρασης του υλικού, οδηγεί σε απελευθέρωση παθογόνων μικροοργανισμών στο νερό και πρόκληση υδατογενών ασθενειών στην κοινότητα. Η εξωτερική διάβρωση των υλικών επιταχύνει τη γήρανση και μειώνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, ενώ η εσωτερική διάβρωση, προκαλεί με τη σειρά της απελευθέρωση μετάλλων και ενώσεων τους στο νερό μέσω έκπλυσης, αλλοιώνοντας τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού, με συνέπεια τη δυσαρέσκεια των καταναλωτών. Επιπρόσθετα όμως, τα παραπροϊόντα της διάβρωσης, καθώς και πλήθος μικροοργανισμών που αποικίζουν τα βιοφίλμ, μπορούν να αντιδράσουν με το υπολειμματικό απολυμαντικό μέσο του δικτύου και να μειώσουν την απολυμαντική του ικανότητα, διακινδυνεύοντας έτσι την ποιότητα του πόσιμου νερού στον τελικό αποδέκτη. Τα προαναφερθέντα προβλήματα και αστοχίες συνυπάρχουν στις περισσότερες των περιπτώσεων, ενώ επί το πλείστον επιβαρύνουν συνδυαστικά τη λειτουργία του δικτύου. Για παράδειγμα, ένας έντονα διαβρωμένος αγωγός, θα οδηγηθεί γρηγορότερα σε αστοχία λόγω ρωγμάτωσης και θραύσης υπό την επίδραση εξωτερικών κι εσωτερικών πιέσεων, ενώ η ανάπτυξη



βιοφίλμ στην εσωτερική επιφάνεια ενός αγωγού ή δεξαμενής αποθήκευσης θα υποβοηθήσει τη διαβρωτική διαδικασία και αντιστρόφως.

Όλα ανεξαιρέτως τα διαθέσιμα υλικά κατασκευής δικτύων ύδρευσης θα εμφανίσουν, περισσότερο ή λιγότερο, ένα ή περισσότερα προβλήματα και αστοχίες. Κρίνεται συνεπώς αναγκαία η θέσπιση κριτηρίων στην επιλογή του καταλληλότερου υλικού. Η ποιότητα του νερού που θα διανεμηθεί μέσω του δικτύου, οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες το δίκτυο θα κληθεί να λειτουργήσει, αλλά και οι τεχνικοοικονομικές παράμετροι κατασκευής, τοποθέτησης και συντήρησης του υλικού, είναι οι βασικότεροι πυλώνες της κατάλληλης επιλογής υλικού κατασκευής των δικτύων διανομής πόσιμου νερού παγκοσμίως. Οι δύο μεγάλες διαθέσιμες ομάδες υλικών, τα μεταλλικά υλικά (κράματα σιδήρου και χαλκού), αλλά και τα μη μεταλλικά υλικά (αμίαντος, τσιμέντο, σκυρόδεμα, υαλοβάμβακας, πλαστικά και πολυμερή από πολυβινυλοχλωρίδιο και πολυαιθυλένιο), οφείλουν να τοποθετούνται μονομερώς ή συνδυαστικά στην κατασκευή ενός δικτύου, με σκοπό να μετριάζονται τα μειονεκτήματα και να αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα στη λειτουργία τους. Ιδιαίτερα στη σημερινή εποχή, όπου η τεχνολογία υλικών αλλά και η επιστήμη της δημόσιας υγείας συμβάλλουν τα μέγιστα στον βέλτιστο σχεδιασμό ενός δικτύου διανομής νερού, καθίσταται πιο αναγκαία από ποτέ η κατασκευή νέων και η σωστή συντήρηση των υπαρχόντων δικτύων ύδρευσης, για την επαρκή και ποιοτική κάλυψη του παγκόσμιου πληθυσμού.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- American Water Works Association (1974) 'Water distribution research and applied development needs'. 6:385 – 390, AWWA.
- American Water Works Association (1986) 'Introduction to water distribution principles and practices of water supply operations'. Denver - CO, AWWA.
- American Water Works Association (1998) 'Manual M31: Distribution system requirements for fire protection'. Denver - CO, AWWA.
- American Water Works Association (2001) 'Reinvesting in drinking water structure: Dawn of the replacement era'. Denver – CO, AWWA.
- American Water Works Association (2005) 'Manual M32: Computer modeling of water distribution systems'. Denver - CO, AWWA.
- American Water Works Association (2006) 'Fundamentals and control of nitrification in chloraminated drinking water distribution systems (M56)'. Denver – CO, AWWA.
- American Water Works Service Co. (2002) 'Deteriorating buried infrastructure management challenges and strategies'. AWWSC.
- Aschilean, I., Iliescu, M., Ciont, N., Giurca, I. (2018) 'The unfavourable impact of street traffic on water distribution pipelines'. Water - MDPI, 10, 1086.
- Asghari, F. B., Jaafari, J., Yousefi, M., Mohammadi, A. A., Dehghanzadeh, R. (2018) 'Evaluation of water corrosion, scaling extent and heterotrophic plate count bacteria in asbestos and polyethylene pipes in drinking water distribution system'. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 24:4, 1138 - 1149.
- Boxall, J. B., O'Hagan, A., Pooladsaz, S., Saul, A. J., & Unwin, D. M. (2007) 'Estimation of burst rates in water distribution mains'. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, Vol. 160, No. 2, pp. 73 – 82.
- Broo, A. E., Berghult, B., Hedberg, T. (1997) 'Copper corrosion in drinking water distribution systems - the influence of water quality'. Corrosion Science, Vol. 39, No. 6, pp. 1119 - 1132.
- California Code of Regulations, Title 22, Division 4, Chapter 16, Article 5, Section 64624f.

Deb, A. K., Snyder, J. K., Chelius, J. J., O' Day, D. K. (1990) 'Assessment of existing and developing water main rehabilitation practices. AWWARF, Denver, CO.

Donlan, R. M., Pipes, W. O., Yohe, T. L. (1994) 'Biofilm formation on cast iron substrata in water distribution systems'. *Water Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 1497 – 1503.

Edwards, M., (2004) 'Controlling corrosion in drinking water distribution systems: A grand challenge for the 21<sup>st</sup> century'. *Water Sci. Technol.* 49 (2), 1 - 8.

Ellison, D., Duranceau, S. J., Ancel, S., Deagle, G., McCoy, R. (2003) 'Investigation of pipe cleaning methods'. AWWARF, Denver, CO.

Estrand, C., Hicatt, A., Ludwig, J. (1995) 'Chemical cleaning process for water pipe systems. Proceedings of the Hydraulics of Pipelines Conference, ASCE, Phoenix, AZ.

Evison, L., Sunna, N. (2001) 'Microbial regrowth in household water storage tanks'. *Journal AWWA*.

Holsen, T. M., Park, J. K., Jenkins, D., Selleck, R. E. (1991) 'Contamination of potable water by permeation of plastic pipe'. *AWWA*, 83 (8): 53 – 56.

Imran, S. A., Dietz, J. D., Mutoti, G., Taylor, J. S., Randall, A. A., Cooper, C. D. (2005) 'Red water release in drinking water distribution systems'. *American Water Works Association*, 97:9.

Kanakoudis, V. (2004) 'A troubleshooting manual for handling operational problems in water pipe networks'. *Water Supply: Research & Technology - AQUA*, 53(2), 109 - 124.

Kelly, J. J., Minalt, N., Culotti, A., Pryor, M., Packman, A. (2014) 'Temporal variations in the abundance and composition of biofilm communities colonizing drinking water distribution pipes'. *PLoS One*, Vol. 9, Issue 5.

Khan, M. A., Abdulrahman, A. M., Madani, A. A. (2017) 'Assessment of microbial quality in household water tanks in Dubai, United Arab Emirates'. *Environ. Eng. Res.*, 22(1): 55 – 60.

Kleiner, Y., Rajani, B. (2002) 'Forecasting variations and trends in water - main breaks'. *Journal of Infrastructure Systems* 8, 122-131.

Kowalska, B., Kowalski, D., Kwietniewski, M., Musz, A. (2013) 'Influence of polyethylene pipe on the quality of water in a water distribution system'. *Journal of Sustainable Development*, Vol. 6, No. 2.

Lee, E. J., Schwab, K. J. (2005) 'Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries'. *Journal of Water and Health*, 3.2.

Lehtola, M. J., Miettinen, I. T., Keinänen, M. M., Kekki, T. K., Laine, O., Hirvonen, A., Vartiainen, T., Martikainen, P. J. (2004) 'Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes'. *Water Research* 38, 3769 - 3779.

Lehtola, M. J., Miettinen, I. T., Lampola, T., Hirvonen, A., Vartiainen, T., Martikainen, P. J. (2005) 'Pipeline materials modify the effectiveness of disinfectants in drinking water distribution systems'. *Water Research* 39, 1962 - 1971.

Li, S., Wang, R., Wu, W., Sun, J., Jing, Y. (2015) 'Non - hydraulic factors analysis of pipe burst in water distribution systems'. *Procedia Eng.* 119, 53 - 62.

Maiolo, M., Pantusa, D., Capano, G., Carini, M. (2018) 'The new pipes choice criteria for water distribution system'. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue 1.

Momba, M.N.B., Kfir, R., Venter, S. N., Cloete, T. E. (2000) 'An overview of biofilm formation in distribution systems and its impact on the deterioration of water quality'. *Water SA*, Vol. 26, No. 1.

National Research Council, Washington DC (2005) 'Public water supply distribution systems: Assessing and reducing risks'. The National Academies Press – First Report.

National Research Council, Washington DC (2006) 'Drinking water distribution systems: Assessing and reducing risks'. The National Academies Press.

New York City drinking water supply and quality report (2020), [www.nyc.gov/DEP](http://www.nyc.gov/DEP).

Nguyen, C., Elfland, C., Edwards, M. (2012) 'Impact of advanced water conservation features and new copper pipe on rapid chloramine decay and microbial regrowth'. *Water Research* 46, 611 – 621.

Niquette, P., Servais, P., Savoie, R. (2000) 'Impacts of pipe materials on densities of fixed bacterial biomass in a drinking water distribution system'. *Water Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 1952 – 1956.

Ociepa, E., Mrowiec, M., & Deska, I. (2019) 'Analysis of Water Losses and Assessment of Initiatives Aimed at Their Reduction in Selected Water Supply Systems'. *Water*, 11 (5), 1037.

Peng, C. Y., Korshin, G. V., Valentine, R. L., Hill, A. S., Friedman, M. J., Reiber, S. H. (2010) 'Characterization of elemental and structural composition of corrosion scales and deposits formed in drinking water distribution systems'. *Water Research* 44, 4570 - 4580.

Rajeev, P., Kodikara, J., Robert, D.J., Zeman, P., Rajani, B. (2013) 'Factors contributing to large diameter water pipe failure as evident from failure inspection'. *Water Asset Management International*, Vol. 10, No. 3, pp. 9 – 14.

Rogers, J., Dowsett, A. B., Dennis, P. J., Lee, J. V., Keevil, C. W. (1994) 'Influence of plumbing materials on biofilm formation and growth of *Legionella pneumophila* in potable water systems'. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 60, No 6, p. 1842 - 1851.

Romer, A. E., Bell, G. E. C., Duranceau, S. J., Foreman, S. (2004) 'External corrosion and corrosion control of buried water mains'. AWWARF, Denver, CO.

Schoenen, D. (1990) 'Influence of materials on the microbiological colonization of drinking water'. *Proc. Federation of European Microbiological Societies Sym. UK*.

Swietlik, J., Raczyk – Stanislawiak, U., Piszora, P., Nawrocki, J. (2012) 'Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts'. *Water Research* 46, 1 - 10.

The Water Research Foundation (2015) 'Reduce Pipeline Failures With Effective Corrosion Control. *AWWA - Opflow*, Vol. 41, No. 11, pp. 18 – 20.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) and the Water Research Foundation (2010) 'Priorities of the distribution system research and information collection partnership'.

Wagner, I., (1994) 'International Report: Internal corrosion of pipes in public water distribution networks'. *Wat. Suppl.* 12 (1/2), IR7 - 1 - IR7 - 5.

Wang, H., Hu, C., Hu, X., Yang, M., Qu, J. (2012) 'Effects of disinfectant and biofilm on the corrosion of cast iron pipes in a reclaimed water distribution system'. *Water Research* 46, 1070 - 1078.

- Wang, H., Hu, C., Zhang, L., Li, X., Zhang, Y., Yang, M. (2014) 'Effects of microbial redox cycling of iron on cast iron pipe corrosion in drinking water distribution systems'. *Water Research* 65, 362 - 370.
- WHO (2006) 'Standards for materials used in plumbing systems'.
- WHO: Geneva (2008) 'Guidelines for drinking water quality'.
- Wols, B. A., Daal, K. V., Thienen, P. V. (2014) 'Effects of climate change on drinking water distribution network integrity: Predicting pipe failure resulting from differential soil settlement'. *Procedia Engineering* 70, 1726 - 1734.
- [www.copperhealth.gr](http://www.copperhealth.gr) (2020) 'Μηχανισμός αντιμικροβιακής δράσης του χαλκού'.
- [www.eydap.gr](http://www.eydap.gr) (2020) 'Στοιχεία Ποιότητας Νερού: Αμίαντος'.
- [www.portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/solines/](http://www.portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/solines/) (2005).
- Κανακούδης, Β. (1998) 'Εισαγωγή στη διαχείριση των δικτύων ύδρευσης - Προσδιορισμός προβλημάτων'.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ευστρατιάδης, Α., (2015) 'Σημειώσεις Αστικών Υδραυλικών Έργων – Υδρευτικά Έργα', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μαντσουκίδου, Ρ. (2019) 'Προβλήματα δικτύων διανομής νερού: Προληπτική συντήρηση - Πρόταση εφαρμογής στην Ξάνθη'. Διπλωματική Εργασία.
- Σταυρακαντωνάκης, Ι. (2017) 'Ανάλυση αξιοπιστίας δικτύων διανομής ύδατος έναντι σεισμικής δραστηριότητας'. Διπλωματική Εργασία.
- Τσακίρης, Γ., Αλεξάκης, Δ. (2010) 'Ποιότητα Νερού για Ανθρώπινη Κατανάλωση'. Υδραυλικά Έργα – Σχεδιασμός και Διαχείριση, Τόμος Ι: Αστικά Υδραυλικά Έργα, σελ. 175-244.
- Τσακίρης, Γ., Σπηλιώτης, Μ. (2010) 'Συστήματα Κλειστών Αγωγών υπό Πίεση. Υδραυλικά Έργα – Σχεδιασμός και Διαχείριση, Τόμος Ι: Αστικά Υδραυλικά Έργα, σελ. 37-112.