



«Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας»

«Διαχείριση Τεχνικών Έργων (ΔΧΤ)»

Διπλωματική Εργασία

«Βιώσιμα υλικά σε έργα ύδρευσης-αποχέτευσης»

Ευαγγελία Δεμέτζου

Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Παπακωνσταντίνου

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Βιώσιμα υλικά σε έργα ύδρευσης-αποχέτευσης»

Ευαγγελία Δεμέτζου

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:
Χρήστος Παπακωνσταντίνου
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:
Μιχάλης Φραγκιαδάκης
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους Γιώργο, Λίτσα, Fabien, Γιώργο, Αυγουστίνο, Μαρία, Μιχάλη, Νεκτάριο και Ραφαηλία. Ο καθένας με τον τρόπο του, είτε αυτό ήταν απλό ενδιαφέρον, είτε ενθαρρυντικά λόγια, είτε πρακτική βοήθεια, είτε χιούμορ και τρέλα, με στήριξε να ολοκληρώσω το μεταπτυχιακό μου.

Περίληψη

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εξετάζει την εφαρμογή βιώσιμων υλικών σε έργα ύδρευσης και αποχέτευσης, εστιάζοντας στη σύνδεση της τεχνικής καταλληλότητας με την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα σε επίπεδο κύκλου ζωής.

Η έρευνα επικεντρώνεται στην ανάγκη εκσυγχρονισμού των υποδομών νερού, λόγω της γήρανσης των δικτύων, των απωλειών, των αυξημένων απαιτήσεων συντήρησης και των σύγχρονων περιβαλλοντικών προκλήσεων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή και τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος.

Αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της αειφορίας στις κατασκευές και αναλύονται τα βασικά κριτήρια που χαρακτηρίζουν ένα υλικό ως βιώσιμο και εξετάζονται τα βασικά εργαλεία αξιολόγησης, όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) και οι Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντος (EPD).

Στη συνέχεια αναλύονται δομικά υλικά χαμηλού αποτυπώματος, σύγχρονα υλικά σωληνώσεων ύδρευσης και αποχέτευσης, προηγμένα πολυμερή, σύνθετα υλικά και τεχνολογίες αδιατάρακτης αποκατάστασης δικτύων.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανθεκτικότητα, τη στεγανότητα, τη διάβρωση, τις απώλειες νερού, τις εισροές και διηθήσεις, το ανθρακικό αποτύπωμα, την ανακυκλωσιμότητα και τις ανάγκες συντήρησης, ενώ πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση βάσει δεικτών LCA, LCC και GWP.

Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, τη συγκριτική ανάλυση και τις μελέτες περίπτωσης, η εργασία καταλήγει ότι η επιλογή υλικών σε έργα ύδρευσης και αποχέτευσης δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στο αρχικό κόστος κατασκευής, αλλά απαιτεί ολοκληρωμένη αξιολόγηση τεχνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών παραμέτρων σε ορίζοντα κύκλου ζωής. Η υιοθέτηση βιώσιμων υλικών και σύγχρονων τεχνολογιών μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των υποδομών, να μειώσει το λειτουργικό κόστος και να συμβάλει στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Λέξεις – Κλειδιά

Βιώσιμα υλικά, ύδρευση, αποχέτευση, ανάλυση κύκλου ζωής, κόστος κύκλου ζωής, σκυρόδεμα χαμηλού άνθρακα, βιώσιμες υποδομές.

«Sustainable materials in water supply and sewerage pipeline projects»

by Evangelia Demetzou

Abstract

This Master's Dissertation examines the application of sustainable materials in potable water and sewerage projects, focusing on the relationship between technical suitability and environmental and economic sustainability from a life-cycle perspective.

The study focuses on the need to develop new water infrastructure systems due to network aging, water losses, increasing maintenance requirements, and current environmental challenges related to climate change and carbon footprint reduction.

Initially, it presents the theoretical approach of sustainability in construction, it analyses the main criteria that characterize a material as sustainable and examines the principal assessment tools, such as Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC), and Environmental Product Declarations (EPD). Furthermore, the study analyses low-impact construction materials, modern pipe materials for water supply and sewerage systems, advanced polymers, composite materials, and trenchless rehabilitation technologies.

Emphasis is also given on durability, watertightness, corrosion resistance, water losses, infiltration and inflow, carbon footprint, recyclability, and maintenance requirements, while a comparative evaluation based on LCA, LCC and GWP indicators is carried out.

The dissertation, through literature review, comparative analysis and case studies, concludes that material selection for potable water and sewerage projects cannot be based solely on initial construction cost, but requires an integrated assessment of technical, environmental, and economic parameters throughout the infrastructure life cycle. The usage of sustainable materials and modern technologies can enhance infrastructure resilience, reduce operational costs, and contribute to the sustainable management of water resources.

Keywords

Sustainable materials, water supply, sewerage, life cycle assessment, life cycle costing, low-carbon concrete, sustainable infrastructure.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract	3
Περιεχόμενα	4
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	6
Κατάλογος Πινάκων	7
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	8
1. Εισαγωγή.....	10
1.1. Πλαίσιο και αναγκαιότητα της εργασίας	10
1.2. Σημασία του αντικειμένου της εργασίας.....	11
1.3. Διατύπωση του προβλήματος	11
1.4. Σκοπός και στόχοι της εργασίας	12
1.5. Μεθοδολογική προσέγγιση και δεδομένα.....	13
1.6. Δομή της εργασίας	14
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	15
2.1. Βιώσιμα Υλικά και Αειφορία στις κατασκευές	15
2.1.1. Ορισμός βιώσιμων υλικών και αρχές βιώσιμης ανάπτυξης.....	15
2.1.2. Τι καθιστά ένα υλικό βιώσιμο.....	16
2.1.3. Μέθοδοι τεκμηρίωσης της βιωσιμότητας υλικών.....	18
2.1.4. Κύριες προκλήσεις εφαρμογής βιώσιμων υλικών σε έργα υποδομής	19
2.2. Υφιστάμενη κατάσταση των υποδομών ύδρευσης και αποχέτευσης	20
2.2.1. Υλικά και τεχνικές απαιτήσεις στα δίκτυα ύδρευσης	20
2.2.2. Υλικά και μηχανισμοί φθοράς στα δίκτυα αποχέτευσης	21
2.2.3. Υφιστάμενη κατάσταση δικτύων	22
2.3. Θεσμικό και Κανονιστικό Πλαίσιο	23
2.3.1. Ευρωπαϊκή πολιτική και απαιτήσεις ποιότητας πόσιμου νερού	23
2.3.2. Ελληνικό πλαίσιο: ενσωμάτωση οδηγιών και τεχνικές προδιαγραφές.....	23
2.3.3. Κανονιστικό Πλαίσιο αστικών λυμάτων	24
2.3.4. Δημόσιες συμβάσεις έργων.....	25
2.3.5. Εργαλεία αξιολόγησης βιωσιμότητας υποδομών.....	25
2.4. Προηγούμενες Μελέτες και Έρευνες.....	25
2.4.1. Μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) για υλικά σωληνώσεων.....	25
2.4.2. Life Cycle Cost (LCC) και ολοκλήρωση με LCA σε υποδομές νερού.....	27
2.4.3. Εγκατάσταση υπογείων δικτύων χωρίς διάνοιξη ορύγματος (trenchless) ..	28
2.4.4. Εξελεγμένα υλικά, έξυπνες τεχνολογίες και κατευθύνσεις έρευνας	28
2.4.5. Μελέτες σε Ελλάδα.....	29
3. Βιώσιμα Δομικά Υλικά για Έργα Ύδρευσης και Αποχέτευσης	31
3.1. Εισαγωγή.....	31
3.2. Σκυρόδεμα και τσιμεντοειδή υλικά σε έργα νερού.....	31
3.2.1. Ο ρόλος του σκυροδέματος στις υποδομές ύδρευσης και αποχέτευσης.....	31
3.2.2. Περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συμβατικού σκυροδέματος	32
3.2.3. Σκυρόδεμα με μειωμένο ποσοστό κλίνκερ και χρήση συμπληρωματικών τσιμεντοειδών (Supplementary Cementitious Materials – SCM).....	33
3.2.4. Γεωπολυμερή και αλκαλικά ενεργοποιημένα τσιμεντοειδή υλικά	34
3.3. Μεταλλικά Δομικά Στοιχεία και Αντιδιαβρωτική Προστασία	34
3.3.1. Εφαρμογές και κυκλικότητα χάλυβα και χυτοσίδηρου	34
3.3.2. Ενεργειακό και περιβαλλοντικό κόστος παραγωγής	35
3.3.3. Αντιδιαβρωτική προστασία ως παράγοντας βιωσιμότητας	35

3.4.	Πολυμερή και Σύνθετα Υλικά σε Δομικά/Βοηθητικά Στοιχεία	36
3.4.1.	Προκατασκευασμένα στοιχεία από πολυμερή υλικά.....	36
3.4.2.	Καλύμματα, σχάρες και ειδικά βοηθητικά στοιχεία από σύνθετα υλικά....	37
3.4.3.	Κυκλικότητα πολυμερών/σύνθετων και θέματα τέλους ζωής.....	37
3.5.	Υλικά Στεγανοποίησης, Επενδύσεις Δομικών Στοιχείων.....	38
3.5.1.	Μεμβράνες και γεωμεμβράνες πολυαιθυλενίου για στεγανοποίηση.....	38
3.5.2.	Επενδύσεις και προστατευτικά συστήματα στην αποχέτευση.....	38
3.5.3.	Στεγανοποιητικά κονιάματα, επιστρώσεις και υλικά αρμών	39
3.6.	Υλικά Έδρασης, Εγκιβωτισμού και Επίχωσης Δικτύων.....	39
3.6.1.	Ο ρόλος των υλικών έδρασης και εγκιβωτισμού	39
3.6.2.	Ανακυκλωμένα αδρανή από ΑΕΚΚ	39
3.6.3.	Περιβαλλοντικό όφελος, μείωση αποβλήτων και μεταφορών.....	40
3.7.	Σύνοψη-Κριτήρια επιλογής δομικών υλικών για έργα νερού.....	40
4.	Βιώσιμα υλικά σωληνώσεων Ύδρευσης.....	42
4.1.	Εισαγωγή.....	42
4.2.	Παραδοσιακά Υλικά Ύδρευσης και Προκλήσεις	42
4.3.	Σύγχρονες Βιώσιμες Επιλογές για Αγωγούς Ύδρευσης	45
4.3.1.	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)	46
4.3.2.	Όλκιμος χυτοσίδηρος (Ductile Iron)	48
4.3.3.	Σύνθετα υλικά και αγωγοί GRP	50
4.3.4.	Νέες τεχνολογίες και αυτο-επουλωτικές επιστρώσεις.....	51
4.4.	Αποτίμηση των σύγχρονων βιώσιμων επιλογών και πλαίσιο σύγκρισης.....	51
4.4.1.	Περιβαλλοντική επίδοση και ανθρακικό αποτύπωμα.....	52
4.4.2.	Ενεργειακό κόστος λειτουργίας και υδραυλική απόδοση.....	54
4.4.3.	Διάρκεια ζωής, συντήρηση και συμπεριφορά σε βάθος χρόνου.....	55
4.5.	Συνολική αποτίμηση και συμπέρασμα της συγκριτικής αξιολόγησης	56
5.	Βιώσιμα Υλικά Σωληνώσεων Αποχέτευσης.....	58
5.1.	Εισαγωγή.....	58
5.2.	Υλικά βαρυτικών και υπό πίεση αγωγών αποχέτευσης.....	59
5.3.	Προηγμένα Πλαστικά και Σύνθετα Υλικά.....	61
5.4.	Τεχνολογίες Αναβάθμισης και Επισκευής Δικτύων Αποχέτευσης.....	64
6.	Μελέτες Περίπτωσης Εφαρμογής Βιώσιμων Υλικών	67
6.1.	Εισαγωγή.....	67
6.2.	Υποθαλάσσιος Αγωγός Ύδρευσης Ν. Αίγινας	67
6.3.	Bonneuil-en-France και σωλήνες από ultra-low-carbon concrete EXEGY®.....	69
6.4.	Συμπέρασμα	70
7.	Οικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση	71
7.1.	Εισαγωγή.....	71
7.2.	Ανάλυση Κόστους και Οφέλους	71
7.3.	Αποτύπωμα Άνθρακα και Περιβαλλοντική Επίδοση	74
7.4.	Συμπέρασμα	76
8.	Συμπεράσματα και Προτάσεις	77
8.1.	Συμπεράσματα	77
8.2.	Προτάσεις για περαιτέρω ενέργειες	78
9.	Βιβλιογραφία.....	81

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 2.1: Αγωγοί PVC-u σειρά 41 με χρήση στην αποχέτευση	21
Εικόνα 3.1-3.2 : Προκατασκευασμένα φρεάτια επίσκεψης από πολυαιθυλένιο	36
Εικόνα 4.1-4.2: Σωληνώσεις HDPE σε ευθύγραμμη μήκη και ρολά	46
Εικόνα 5.1-5.2: Σωλήνες με λεία εσωτερική επιφάνεια και δομημένο εξωτερικό τοίχωμα	62
Εικόνα 6.1: Όδευση υποθαλάσσιου αγωγού ύδρευσης Αίγινας	68
Εικόνα 6.2: Προετοιμασίας/πόντισης συγκολλημένων τμημάτων HDPE για υποθαλάσσια εφαρμογή.....	68
Εικόνα 6.3: Τοποθέτηση προκατασκευασμένου σωλήνα σκυροδέματος χαμηλού άνθρακα.	69
Εικόνα 6.4: Σχηματική απεικόνιση της λογικής μικροσήραγγας σε έργο	69
Σχήμα 2.1: Στάδια κύκλου ζωής κατασκευαστικών προϊόντων κατά EN 15804	19
Σχήμα 5.1: Βασικοί μηχανισμοί φθοράς σε παραδοσιακά υλικά αγωγών αποχέτευσης	61
Σχήμα 5.2:Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου CIPP σε αγωγό αποχέτευσης.....	65

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1: Συγκριτική καταγραφή παραδοσιακών υλικών αγωγών αποχέτευσης ως προς την εφαρμογή, τους μηχανισμούς φθοράς και τη συνολική τους επίδοση από πλευράς βιωσιμότητας.....	60
Πίνακας 5.2: Συγκριτική αξιολόγηση προηγμένων υλικών αποχέτευσης	64
Πίνακας 5.3: Σύγκριση ανοικτής εκσκαφής και trenchless αποκατάστασης σε δίκτυα αποχέτευσης	66
Πίνακας 7.1: Σύγκριση Τιμών μονάδας υλικών.....	72
Πίνακας 7.2: Συγκριτική οικονομική λογική των βασικών υλικών σωληνώσεων σε όρους αρχικού κόστους και κόστους κύκλου ζωής.	73
Πίνακας 7.3: Συγκριτική περιβαλλοντική επίδοση βασικών υλικών σωληνώσεων ανά στάδιο κύκλου ζωής.	75

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΑΕΚΚ	Απόβλητα Εκσκαφών, Κατασκευών και Κατεδαφίσεων	Construction and Demolition Waste
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	Renewable Energy Sources
CAPEX	Κεφαλαιουχικές Δαπάνες	Capital Expenditure
CIPP	Επένδυση σωλήνα επιτόπου ωρίμανσης	Cured-In-Place Pipe
CPR	Κανονισμός Δομικών Προϊόντων	Construction Products Regulation
DN	Ονομαστική Διάμετρος	Nominal Diameter
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο	Hellenic Open University
ΕΛΟΤ	Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης	Hellenic Organization for Standardization
ΕΠΑ / EPD	Περιβαλλοντική Δήλωση Προϊόντος	Environmental Product Declaration
FRP	Ινοπλισμένα Πολυμερή	Fiber Reinforced Polymer
GRP	Πλαστικό Ενισχυμένο με Υαλονήματα	Glass Reinforced Plastic
GWP	Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη	Global Warming Potential
H ₂ S	Υδροθείο	Hydrogen Sulfide
HDPE	Πολυαιθυλένιο Υψηλής Πυκνότητας	High-Density Polyethylene
I/I	Εισροές και Διηθήσεις	Infiltration and Inflow
ISO	Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης	International Organization for Standardization
LCA	Ανάλυση Κύκλου Ζωής	Life Cycle Assessment

LCC	Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής	Life Cycle Costing
LCIA	Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής	Life Cycle Impact Assessment
LCI	Απογραφή Κύκλου Ζωής	Life Cycle Inventory
MICC	Μικροβιολογικά Επαγόμενη Διάβρωση Σκυροδέματος	Microbiologically Induced Concrete Corrosion
NRW	Μη Τιμολογούμενο Νερό	Non-Revenue Water
OPEX	Λειτουργικές Δαπάνες	Operating Expenditure
PCR	Κανόνες Κατηγορίας Προϊόντος	Product Category Rules
PE	Πολυαιθυλένιο	Polyethylene
PE100	Πολυαιθυλένιο Υψηλής Αντοχής	High-Performance Polyethylene Pipe Grade
PE100RC	Πολυαιθυλένιο Υψηλής Αντοχής σε Ρηγμάτωση	Polyethylene Resistant to Crack
PP	Πολυπροπυλένιο	Polypropylene
PVC-U	Μη Πλαστικοποιημένο Πολυβινυλοχλωρίδιο	Unplasticized Polyvinyl Chloride
REACH	Καταχώριση, Αξιολόγηση, Αδειοδότηση και Περιορισμός Χημικών Ουσιών	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
SCM	Συμπληρωματικά Τσιμεντοειδή Υλικά	Supplementary Cementitious Materials
TCO	Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας	Total Cost of Ownership
UV	Υπεριώδης Ακτινοβολία	Ultraviolet Radiation
ΔΕΥΑ	Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης	Municipal Water and Sewerage Utility

1. Εισαγωγή

1.1. Πλαίσιο και αναγκαιότητα της εργασίας

Οι υποδομές ύδρευσης και αποχέτευσης αποτελούν αλληλένδετο κομμάτι με τη δημόσια υγεία, την περιβαλλοντική προστασία και την κοινωνικοοικονομική ευημερία. Ωστόσο, σε μεγάλο μέρος τους χαρακτηρίζονται από γήρανση, συχνές αστοχίες και περιορισμένη λειτουργική απόδοση. Η υφιστάμενη κατάσταση πολλών δικτύων συνεπάγεται σημαντικές απώλειες νερού και αυξημένη ανάγκη παρεμβάσεων συντήρησης/αντικατάστασης, με υψηλό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος.

Παράλληλα, οι σύγχρονες πιέσεις που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, τη λειψυδρία και τη μετάβαση σε πιο αποδοτικά και «πράσινα» πρότυπα υποδομών εντείνουν την ανάγκη για λύσεις που δεν περιορίζονται στη βραχυπρόθεσμη τεχνικοοικονομική επάρκεια, αλλά ενσωματώνουν μετρήσιμη βιωσιμότητα σε επίπεδο κύκλου ζωής.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτά, επίσης, η ύπαρξη ιστορικά χρησιμοποιημένων υλικών που σήμερα θεωρούνται προβληματικά ή μη βιώσιμα. Χαρακτηριστική είναι η παρουσία σωλήνων αμιαντοτσιμέντου σε τμήματα δικτύων που εξακολουθούν να υφίστανται, με συνακόλουθους τεχνικούς, περιβαλλοντικούς και υγειονομικούς προβληματισμούς.

Στο παραπάνω πλαίσιο, η επιλογή υλικών και τεχνικών κατασκευής/αποκατάστασης αποκτά στρατηγικό χαρακτήρα. Η μετάβαση σε βιώσιμα υλικά και τεχνολογίες μπορεί να μειώσει απώλειες, να βελτιώσει τη λειτουργική αξιοπιστία, να περιορίσει εκπομπές και να μειώσει συνολικά το κόστος κύκλου ζωής (Life-Cycle Costing), ιδίως όταν συνυπολογιστούν τα λειτουργικά κόστη (ενέργεια άντλησης, επισκευές, διακοπές λειτουργίας) και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την εφαρμογή βιώσιμων υλικών σε έργα ύδρευσης και αποχέτευσης και πώς η ενσωμάτωση νέων, περιβαλλοντικά φιλικότερων λύσεων μπορεί να συμβάλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και του κόστους κύκλου ζωής των έργων.

1.2. Σημασία του αντικειμένου της εργασίας

Η σημασία της παρούσας έρευνας εδράζεται στη σύνδεση τεχνικών επιλογών (τύπος υλικού, μέθοδος εγκατάστασης ή αποκατάστασης) με την περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση σε ορίζοντα κύκλου ζωής. Στη διεθνή βιβλιογραφία, τα βιώσιμα υλικά συσχετίζονται άμεσα με κριτήρια όπως η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές CO₂ κατά την παραγωγή, η αυξημένη αντοχή/διάρκεια ζωής, η μη τοξικότητα και δυνατότητα ανακύκλωσης ή/και επαναχρησιμοποίησης.

Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές αξιολογήσεις (Life Cycle Assessment – LCA) αναδεικνύουν ότι η επιλογή υλικού δεν είναι ουδέτερη ως προς το αποτύπωμα άνθρακα και λοιπές κατηγορίες επίπτωσης και προκύπτει ανάγκη μετάβασης από τα παραδοσιακά υλικά, όπως ο συμβατικός χάλυβας και το PVC, προς υλικά με βελτιωμένα χαρακτηριστικά βιωσιμότητας, όπως τα ανακυκλωμένα πολυαιθυλένια υψηλής πυκνότητας (HDPE), τα σύνθετα πολυμερή και τα γεωπολυμερή (σχετικά νέα δομικά υλικά).

Τέλος, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal) και των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ, η χρήση βιώσιμων υλικών στα δημόσια έργα αποτελεί στρατηγική προτεραιότητα. Η βιωσιμότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα συμβάλλει άρρηκτα και στην ολιστική προσέγγιση που έχει ξεκινήσει να εφαρμόζεται πιλοτικά στην Ελλάδα (Δ.Ε.Υ.Α. Ρεθύμνου, Αλεξανδρούπολης κτλ) στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 21-27.

1.3. Διατύπωση του προβλήματος

Το βασικό πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα Εργασία είναι η επιλογή βιώσιμων υλικών και όπου απαιτείται, τεχνολογιών αποκατάστασης, για έργα ύδρευσης και αποχέτευσης, υπό πραγματικούς τεχνικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς.

Συγκεκριμένα, η επιλογή υλικού/μεθόδου καλείται να ισορροπήσει μεταξύ:

- της τεχνικής απόδοσης (αντοχή, στεγανότητα, ανθεκτικότητα σε διάβρωση/χημικές προσβολές),
- της λειτουργικής αξιοπιστίας (μείωση βλαβών/διαρροών, σταθερότητα παροχής υπηρεσιών),

- του οικονομικού αποτελέσματος σε βάθος χρόνου (CAPEX, OPEX, κόστος συντήρησης και τέλους ζωής),
- και των περιβαλλοντικών/κοινωνικών επιπτώσεων (εκπομπές, απόβλητα, όχληση από έργα, υγειονομικοί κίνδυνοι).

Ιδιαίτερη πτυχή του προβλήματος συνδέεται με τον τρόπο υλοποίησης παρεμβάσεων. Η ανοικτή εκσκαφή (open-cut) μπορεί να συνεπάγεται σημαντικές εκπομπές και κοινωνική όχληση, ενώ αδιατάρακτες μέθοδοι (trenchless) συχνά εμφανίζουν συγκριτικά πλεονεκτήματα ως προς εκπομπές και απόβλητα, ακόμη και όταν το άμεσο κόστος ανά μέτρο είναι υψηλότερο. Ενδεικτικά, σύμφωνα με μελέτες συγκριτικής αξιολόγησης, οι αδιατάρακτες μέθοδοι αποκατάστασης, όπως το pipe bursting (τεχνική αντικατάστασης αγωγού), μπορούν να εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με την ανοικτή εκσκαφή, λόγω μειωμένων εκσκαφών, μεταφορών και απαιτήσεων αποκατάστασης επιφανειών (Joshi, 2012)

1.4. Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση της εφαρμογής βιώσιμων υλικών σε έργα ύδρευσης-αποχέτευσης και η διαμόρφωση τεκμηριωμένων κατευθύνσεων επιλογής, οι οποίες να λαμβάνουν υπόψη τόσο τις τεχνικές απαιτήσεις όσο και την περιβαλλοντική και οικονομική επίδοση σε επίπεδο κύκλου ζωής.

Για την επίτευξη του σκοπού, τίθενται οι ακόλουθοι επιμέρους στόχοι:

- Να παρουσιαστεί η σύγχρονη κατάσταση των δικτύων ύδρευσης/αποχέτευσης και τα βασικά προβλήματα που συνδέονται με συμβατικά υλικά (π.χ. διάβρωση, διαρροές, υγειονομικοί κίνδυνοι).
- Να οριστούν, βάσει βιβλιογραφίας, τα κριτήρια με τα οποία ένα υλικό δύναται να χαρακτηριστεί «βιώσιμο» στον κατασκευαστικό τομέα.
- Να εξεταστούν βιώσιμα δομικά υλικά που υποστηρίζουν έργα ύδρευσης-αποχέτευσης, καθώς και η συμβολή τους στη συνολική επίδοση του έργου.
- Να πραγματοποιηθεί συγκριτική αξιολόγηση υλικών σωληνώσεων και δικτύων (παραδοσιακών και σύγχρονων) ως προς τεχνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές παραμέτρους.

- Να αξιολογηθούν τεχνολογίες αδιατάρακτης αποκατάστασης ή αντικατάστασης δικτύων [π.χ. sliplining (νέος αγωγός εντός υφιστάμενου), pipe bursting (θραύση παλαιού με έλξη νέου αγωγού), CIPP (εσωτερική επένδυση)], με έμφαση στην περιβαλλοντική και οικονομική τους διάσταση σε σύγκριση με την πλήρη αντικατάσταση.
- Να παρουσιαστούν μελέτες περίπτωσης (ελληνικές/διεθνείς), ώστε τα συμπεράσματα να είναι εφαρμόσιμα και επιχειρησιακά χρήσιμα.

Με βάση τους παραπάνω στόχους, η εργασία οργανώνεται γύρω από τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Ποια κριτήρια (τεχνικά, περιβαλλοντικά, υγειονομικά και οικονομικά) είναι τα πλέον κατάλληλα για τον χαρακτηρισμό και τη συγκριτική αξιολόγηση «βιώσιμων» υλικών σε έργα ύδρευσης-αποχέτευσης
- Πώς διαφοροποιούνται οι απαιτήσεις επιλογής υλικών μεταξύ δικτύων πόσιμου νερού και δικτύων αποχέτευσης
- Ποια είναι τα πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα μεταξύ εναλλακτικών υλικών σωληνώσεων ως προς το αποτύπωμα κύκλου ζωής (LCA), τη διάρκεια ζωής και το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (LCC)
- Σε ποιο βαθμό οι αδιατάρακτες μέθοδοι αποκατάστασης (trenchless) υπερέχουν περιβαλλοντικά και οικονομικά έναντι της ανοικτής εκσκαφής, όταν συνυπολογιστούν εκπομπές, απόβλητα και κοινωνική όχληση
- Πώς μεταφράζονται τα παραπάνω ευρήματα σε πρακτικές κατευθύνσεις/προτάσεις για φορείς ύδρευσης-αποχέτευσης

Η συμβολή αυτής της εργασίας έγκειται στη σύνδεση της θεωρητικής προσέγγισης της βιώσιμης ανάπτυξης με την πρακτική εφαρμογή της σε έργα, αναδεικνύοντας τον ρόλο της επιλογής υλικών ως κρίσιμο παράγοντα για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα των υποδομών ύδρευσης και αποχέτευσης στην Ελλάδα.

1.5. Μεθοδολογική προσέγγιση και δεδομένα

Η εργασία υιοθετεί συνδυαστική προσέγγιση στην αξιοποίηση δεδομένων από

- Βιβλιογραφική ανασκόπηση για (α) τα τεχνικά χαρακτηριστικά υλικών, (β) την έννοια και τα κριτήρια βιωσιμότητας υλικών, (γ) τη διεθνή εμπειρία σε LCA/LCC

εφαρμογές σε δίκτυα ύδρευσης-αποχέτευσης, (δ) τις τεχνολογίες αποκατάστασης δικτύων και τα αποτελέσματά τους, (δ) στοιχεία κόστους. Με τον όρο υλικά αναφερόμαστε τόσο στα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή/αποκατάσταση δικτύων, όσο και στα υλικά κατασκευής σωληνώσεων ανάλογα με την χρήση τους.

- Μελέτες περίπτωσης (case studies) που αναδεικνύουν την εφαρμογή, τα εμπόδια και τα επιτεύγματα οφέλη.

1.6. Δομή της εργασίας

Η Εργασία οργανώνεται σε κεφάλαια που επιτρέπουν την προοδευτική μετάβαση από το θεωρητικό υπόβαθρο στην εφαρμοσμένη αξιολόγηση και στα τελικά συμπεράσματα. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση και το θεωρητικό πλαίσιο της βιωσιμότητας στις υποδομές ύδρευσης και αποχέτευσης, με αναφορά στα βασικά υλικά, στις σύγχρονες περιβαλλοντικές απαιτήσεις, στα εργαλεία αξιολόγησης LCA και LCC, καθώς και στις σχετικές προηγούμενες έρευνες και τεχνολογικές εξελίξεις. Το Κεφάλαιο 3 εξετάζει βιώσιμα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε έργα νερού, όπως σκυροδέματα χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος, μεταλλικά και πολυμερικά στοιχεία, υλικά στεγανοποίησης και ανακυκλωμένα αδρανή. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα σύγχρονα βιώσιμα υλικά σωληνώσεων ύδρευσης, με έμφαση στη συγκριτική αξιολόγηση της τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής τους επίδοσης. Το Κεφάλαιο 5 επικεντρώνεται στα υλικά σωληνώσεων αποχέτευσης και στις τεχνολογίες αποκατάστασης δικτύων, συμπεριλαμβανομένων αδιατάρακτων μεθόδων. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται ενδεικτικές ελληνικές και διεθνείς μελέτες περίπτωσης εφαρμογής βιώσιμων υλικών σε έργα ύδρευσης και αποχέτευσης. Ακολουθεί το Κεφάλαιο 7, στο οποίο πραγματοποιείται οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων και περιβαλλοντικής επίδοσης. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις για τη βελτίωση της εφαρμογής βιώσιμων υλικών και τεχνολογιών στα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την βιβλιογραφική ανασκόπηση της Εργασίας με τίτλο «Βιώσιμα υλικά σε έργα ύδρευσης-αποχέτευσης». Στόχος είναι να τεκμηριωθεί (α) τι σημαίνει «βιώσιμο υλικό» στον κατασκευαστικό κλάδο και πως αξιολογείται, (β) ποια είναι η παρούσα κατάσταση και οι κύριες τεχνικές προκλήσεις των υποδομών ύδρευσης και αποχέτευσης, (γ) ποιο είναι το θεσμικό/κανονιστικό πλαίσιο που καθορίζει την καταλληλότητα των υλικών και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης κριτηρίων βιωσιμότητας σε δημόσια έργα και (δ) ποιες είναι οι βασικές τάσεις της πρόσφατης διεθνούς έρευνας (LCA/LCC συγκρίσεις υλικών, trenchless τεχνολογίες, αναπτυσσόμενα υλικά και διαχείριση δικτύων).

Η ανασκόπηση λαμβάνει υπόψη ότι η επιλογή υλικού/τεχνολογίας σε έργα ύδρευσης/αποχέτευσης δεν μπορεί να κριθεί επαρκώς μόνο με κριτήρια αρχικού κόστους ή μεμονωμένων τεχνικών ιδιοτήτων. Αντίθετα, απαιτείται ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης της τεχνικής επίδοσης, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και του κόστους κύκλου ζωής, ώστε να προκύπτουν αποφάσεις που είναι τεχνικά ορθές, θεσμικά συμβατές και οικονομικά αποδοτικές σε βάθος χρόνου.

2.1. Βιώσιμα Υλικά και Αειφορία στις κατασκευές

2.1.1. Ορισμός βιώσιμων υλικών και αρχές βιώσιμης ανάπτυξης

Η αειφορία στις κατασκευές αναφέρεται στην ικανότητα των έργων να παρέχουν τη ζητούμενη λειτουργική υπηρεσία με ελάχιστη κατανάλωση πόρων και ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χωρίς να υπονομεύεται η τεχνική ασφάλεια, η ανθεκτικότητα και η οικονομική βιωσιμότητα. Ο κατασκευαστικός κλάδος είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, καθώς ενσωματώνει μεγάλες ροές πρώτων υλών, ενέργειας και νερού και παράγει σημαντικό ποσοστό στερεών αποβλήτων. Σε υποδομές νερού, η αειφορία παίρνει άλλη διάσταση γιατί οι αστοχίες (διαρροές, θραύσεις, εισροές) μετατρέπονται άμεσα σε απώλεια υδατικών πόρων και σε πρόσθετο ενεργειακό φορτίο λειτουργίας.

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, η βιωσιμότητα δεν αντιμετωπίζεται ως μονοσήμαντο χαρακτηριστικό ενός υλικού. Αντίθετα, προκύπτει ως συνάρτηση του κύκλου ζωής και της πραγματικής χρήσης συμπεριλαμβάνοντας την παραγωγή, μεταφορά, εγκατάσταση, λειτουργία, συντήρηση και τέλος ζωής. Το ίδιο το υλικό μπορεί να εμφανίζει διαφορετική

περιβαλλοντική επίδοση ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή του, ανάλογα με το ποσοστό ενέργειας και την προέλευση της από ορυκτά καύσιμα ή από ανανεώσιμες πηγές, καθώς και ανάλογα με τις αποστάσεις μεταφοράς, την τεχνολογία εγκατάστασης (open-cut ή trenchless) και την ανάγκη μελλοντικών επεμβάσεων.

Η ευρωπαϊκή τυποποίηση για τη βιωσιμότητα των έργων κατασκευής (π.χ. EN 15643 Sustainability of construction works. Framework for assessment of buildings and civil engineering works) θέτει την αξιολόγηση σε τρεις διαστάσεις, την περιβαλλοντική, την κοινωνική και την οικονομική. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει να ενσωματωθούν σε ενιαίο πλαίσιο (α) οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, κατανάλωση πόρων, ρύπανση), (β) οι κοινωνικές επιδράσεις (δημόσια υγεία, όχληση, ασφάλεια, πρόσβαση/ανθεκτικότητα υπηρεσίας) και (γ) οι οικονομικές συνέπειες σε κύκλο ζωής (CAPEX, OPEX, συντήρηση, αντικαταστάσεις, τέλος ζωής).

Στο πλαίσιο αυτό, ένα υλικό χαρακτηρίζεται «βιώσιμο» όταν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, ικανοποιεί ταυτόχρονα (i) τεχνική καταλληλότητα και συμμόρφωση με πρότυπα/κανονισμούς, (ii) βελτιωμένη περιβαλλοντική επίδοση σε κύκλο ζωής και (iii) ευνοϊκό κόστος κύκλου ζωής. Παρόλα αυτά, μπορεί και να μην είναι αλληλένδετα μεταξύ τους καθώς ένα υλικό μπορεί να είναι κατάλληλο για ύδρευση (π.χ. ως προς την υγιεινή και στεγανότητα), αλλά να μην είναι η βέλτιστη επιλογή για αποχέτευση εάν δεν αντέχει σε συγκεκριμένους χημικούς/βιολογικούς μηχανισμούς φθοράς.

2.1.2. Τι καθιστά ένα υλικό βιώσιμο

Η βιβλιογραφία συγκλίνει ότι η αξιολόγηση βιώσιμων υλικών πρέπει να στηρίζεται σε μετρήσιμα κριτήρια και επαληθεύσιμα δεδομένα, ώστε να αποφεύγονται γενικές ή μη συγκρίσιμες αξιολογήσεις. Η σύγκριση πρέπει να γίνεται σε σαφές πλαίσιο αναφοράς όπως την λειτουργική μονάδα (functional unit), τον ορίζοντα ανάλυσης και οριοθέτηση συστήματος. Για δίκτυα ύδρευσης-αποχέτευσης, τυπική λειτουργική μονάδα θα μπορούσε να είναι «1 km αγωγού» συγκεκριμένης διαμέτρου/κατηγορίας, με καθορισμένη διάρκεια λειτουργίας (π.χ. 50 έτη ή ενδεικτική διάρκεια) ανεξάρτητα με το υγρό μεταφοράς.

Οι βασικές κατηγορίες κριτηρίων βιωσιμότητας των υλικών στον κατασκευαστικό κλάδο είναι:

- Ενσωματωμένος άνθρακας (embodied carbon) και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (kg CO₂-eq) σε κύκλο ζωής.
- Ενσωματωμένη ενέργεια (embodied energy) και κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MJ ή kWh).
- Κατανάλωση φυσικών πόρων (ορυκτών, μετάλλων, ορυκτών καυσίμων) και αποτύπωμα ύδατος.
- Κυκλικότητα μέσω της χρήσης ανακυκλωμένου περιεχομένου, δυνατότητα ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης.
- Τοξικότητα και χημική ασφάλεια με πιθανή έκλυση ουσιών, εκπομπές στην παραγωγή/χρήση/τέλος ζωής, συμμόρφωση με REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals - EK 1907/2006).
- Ανθεκτικότητα και διάρκεια λειτουργικής επάρκειας (Reference service life) σε πραγματικές συνθήκες.
- Απαιτήσεις συντήρησης και ρυθμός αστοχιών (failure rate), που καθορίζουν τον αριθμό επεμβάσεων στο χρόνο.
- Συνολικό κόστος κύκλου ζωής (LCC) και όπου απαιτείται, αποτίμηση κοινωνικών επιπτώσεων (όχληση, διακοπές υπηρεσίας).

Η διάκριση μεταξύ ενσωματωμένων και λειτουργικών επιπτώσεων έχει ιδιαίτερη σημασία σε υποδομές νερού. Σε ορισμένα έργα, η παραγωγή του υλικού κυριαρχεί στο περιβαλλοντικό ισοζύγιο. Σε άλλα, η λειτουργία μπορεί να είναι καθοριστική, ιδίως όταν συνυπολογιστούν απώλειες νερού (NonRevenue water-NRW) ή αυξημένες εισροές-διηθήσεις (Infiltration/Inflow) που οδηγούν σε επιπλέον άντληση και επεξεργασία. Έτσι, η «βιωσιμότητα» ενός υλικού δεν είναι απλώς θέμα χαμηλού αρχικού αποτυπώματος, αλλά και θέμα αξιοπιστίας και λειτουργικής απόδοσης του συστήματος.

Στην ύδρευση, η χημική ασφάλεια και η υγιεινή καταλληλότητα αποτελούν προαπαιτούμενα. Υλικό με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα δεν μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμο αν δεν πληροί απαιτήσεις για υλικά σε επαφή με πόσιμο νερό. Στην αποχέτευση, αντίστοιχα, η αντοχή σε χημικές/βιολογικές προσβολές (π.χ. Microbiologically Induced Concrete Corrosion MICC σε σκυρόδεμα) και η στεγανότητα (I/I) είναι καθοριστικές, διότι επιδρούν άμεσα στο κόστος και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λειτουργίας.

Η κυκλικότητα, τέλος, πρέπει να εξετάζεται με τρόπο τεχνικά ρεαλιστικό. Η δυνατότητα ανακύκλωσης ενός υλικού, εφόσον δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί, εξαρτάται από την

ύπαρξη πρακτικών και συστημάτων συλλογής/διαχείρισης που επιτρέπουν την αξιοποίηση του.

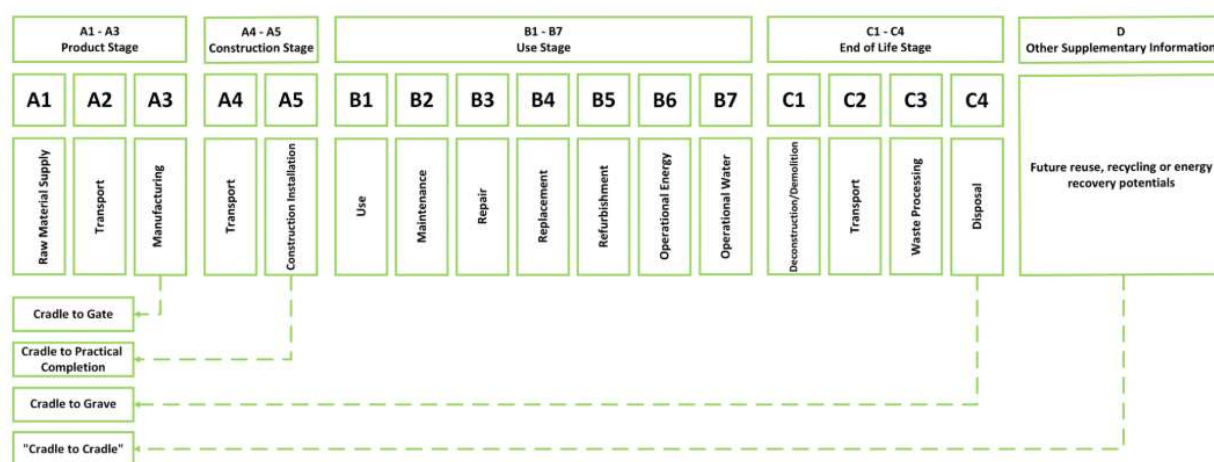
Επιπλέον, στα γραμμικά έργα των δικτύων, προκύπτει σημαντικό ποσοστό αποβλήτων από εκσκαφές και αποκαταστάσεις επιφανειών. Επομένως, η επιλογή αδιατάρακτων μεθόδων μπορεί να έχει συγκρίσιμη ή και μεγαλύτερη σημασία από τη διαφορά περιβαλλοντικού αποτυπώματος μεταξύ δύο διαφορετικού υλικού σωλήνων.

2.1.3. Μέθοδοι τεκμηρίωσης της βιωσιμότητας υλικών

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) αποτελεί μία από τις βασικότερες μεθόδους αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο κύκλου ζωής προϊόντων και υποδομών (ISO 14040, 2006). Τα ISO 14040 και ISO 14044 ορίζουν επιμέρους φάσεις της LCA όπως (α) καθορισμός στόχου και πεδίου, (β) απογραφή κύκλου ζωής (LCI), (γ) αξιολόγηση επιπτώσεων (LCIA) και (δ) ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η φάση της ερμηνείας αφορά την πολύπλευρη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων σταδίων, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων, τον εντοπισμό κρίσιμων σημείων και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των παραδοχών. Η Life Cycle Inventory συγκεντρώνει τις ροές υλικών/ενέργειας όπως κατανάλωση πρώτων υλών, καύσιμα εργοταξίου, μεταφορές, ασφατικά, βοηθητικά υλικά. Στην συνέχεια μέσω της αξιολόγησης επιπτώσεων LCIA, οι ροές των υλικών/ενέργειας συνδέονται με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η κλιματική αλλαγή, ο ευτροφισμός, η οξίνιση και η εξάντληση των φυσικών πόρων.

Οι Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντος (Environmental Product Declarations - EPD) αποτελούν τυποποιημένη μορφή δημοσιοποίησης αποτελεσμάτων LCA (Type III, ISO 14025). Για κατασκευαστικά προϊόντα, το EN 15804 αποτελεί το ευρωπαϊκό πρότυπο για τις Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων (EPD) και παρέχει τους βασικούς κανόνες κατηγορίας προϊόντος (Product Category Rules – PCR) και τη διάρθρωση των σταδίων του κύκλου ζωής. Ειδικότερα, τα στάδια A1–A3 αφορούν την παραγωγή του προϊόντος, τα A4–A5 τη μεταφορά και εγκατάσταση, τα B1–B7 τη φάση χρήσης, τα C1–C4 το τέλος ζωής και το D τα πιθανά οφέλη ή φορτία πέρα από τα όρια του συστήματος.

Για τη διευκόλυνση της κατανόησης της διάρθρωσης του κύκλου ζωής κατά EN 15804, παρατίθεται συνοπτικό διάγραμμα των σταδίων A1–A3, A4–A5, B1–B7, C1–C4 και D.



Σχήμα 2.1: Στάδια κύκλου ζωής κατασκευαστικών προϊόντων κατά EN 15804

(<https://circularecology.com/en15804-modules-explained.html>)

Η αξία των EPD σε έργα ύδρευσης-αποχέτευσης είναι ότι επιτρέπουν σύγκριση προϊόντων σε κοινή βάση, υπό την προϋπόθεση ότι η λειτουργική μονάδα, οι τεχνικές απαιτήσεις (π.χ. πίεση/διάμετρος/κλάση) και οι παραδοχές είναι ισοδύναμες.

Η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Costing - LCC) συμπληρώνει τη LCA, εξετάζοντας το συνολικό κόστος σε ορίζοντα ζωής. Σε δίκτυα ύδρευσης-αποχέτευσης, το αρχικό κόστος ανά μέτρο δεν επαρκεί, διότι το κόστος επισκευών/αποκαταστάσεων, η αποκατάσταση επιφανειών και οι διακοπές υπηρεσίας μπορούν να κυριαρχήσουν σε βάθος χρόνου. Η LCC απαιτεί παραδοχές όπως ορίζοντα ανάλυσης, ρυθμό αστοχιών, κόστος επισκευής ανά γεγονός, πιθανές αντικαταστάσεις εντός ορίζοντα και κόστος τέλους ζωής.

2.1.4. Κύριες προκλήσεις εφαρμογής βιώσιμων υλικών σε έργα υποδομής

Παρά τη σαφή κατεύθυνση προς βιώσιμες λύσεις, η εφαρμογή βιώσιμων υλικών σε έργα υποδομών συναντά πρακτικά και θεσμικά εμπόδια. Πρώτον, η πρόσβαση σε αξιόπιστα δεδομένα LCA/EPD για συγκεκριμένα προϊόντα δεν είναι πάντα δεδομένη, ειδικά για εξαρτήματα, συνδέσεις και υλικά εργοταξίου. Δεύτερον, η σύγκριση μεταξύ EPD μπορεί να είναι περιορισμένη λόγω διαφορετικών Product Category Rules (PCR), δηλαδή διαφορετικών κανόνων κατηγορίας προϊόντος, καθώς και λόγω διαφορετικών γεωγραφικών παραδοχών και σεναρίων τέλους ζωής. Τρίτον, η τεχνική συμπεριφορά σε πραγματικές συνθήκες (διάβρωση, ερπυσμός, ρηγμάτωση) εισάγει αβεβαιότητα στη διάρκεια ζωής. Τέταρτον, η ενσωμάτωση κριτηρίων βιωσιμότητας σε προκηρύξεις απαιτεί σαφή, ελέγξιμα

και μη-διακριτικά κριτήρια ώστε να διασφαλίζεται ανταγωνιστικότητα και συμβατότητα με το Ν. 4412/16 των δημοσίων συμβάσεων.

Η βιβλιογραφία προτείνει ως βέλτιστη πρακτική τον συνδυασμό (α) τεχνικής συμμόρφωσης μέσω προτύπων, (β) ποσοτικής τεκμηρίωσης μέσω LCA/EPD και LCC και (γ) πολυκριτηριακής απόφασης που ενσωματώνει παραμέτρους λειτουργίας (στεγανότητα, failure rate, NRW, I/I) και παραμέτρους κατασκευής (διάρκεια έργου, εκσκαφές, αποκαταστάσεις επιφανειών).

2.2. Υφιστάμενη κατάσταση των υποδομών ύδρευσης και αποχέτευσης

2.2.1. Υλικά και τεχνικές απαιτήσεις στα δίκτυα ύδρευσης

Τα δίκτυα ύδρευσης είναι υποδομές υπό πίεση, με λειτουργικό στόχο την ασφαλή μεταφορά και διανομή νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Οι βασικές τεχνικές απαιτήσεις αφορούν την μηχανική επάρκεια (εσωτερική πίεση, εξωτερικά φορτία, σεισμικότητα), την υδραυλική επάρκεια (απώλειες πίεσης, διατήρηση διατομής), την στεγανότητα (περιορισμός διαρροών), την ανθεκτικότητα (διάβρωση/γήρανση) και υγιεινή καταλληλότητα. Η επιλογή υλικού και συνδέσεων οφείλει να επιβεβαιώνεται μέσω συμμόρφωσης σε πρότυπα και δοκιμές που να εξασφαλίζουν τα παραπάνω.

Παραδοσιακά υλικά σε δίκτυα ύδρευσης περιλαμβάνουν αμιαντοτσιμεντοσωλήνες, χάλυβα, χυτοσίδηρο/ελατό χυτοσίδηρο και πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), ενώ τις τελευταίες δεκαετίες έχει διευρυνθεί η χρήση πολυαιθυλενίου (PE). Οι μεταλλικοί αγωγοί προσφέρουν υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε φορτία, αλλά είναι ευάλωτοι σε εξωτερική διάβρωση. Η διάβρωση επηρεάζεται από τη χημεία του εδάφους, την υγρασία, τη διαθεσιμότητα οξυγόνου, την ύπαρξη παρασιτικών ρευμάτων και τη διακοπή προστατευτικών επιστρώσεων. Στην πράξη, η επιλογή υλικού είναι αυστηρά συνδεδεμένη με την επιλογή συστήματος προστασίας (επενδύσεις, περιβλήματα, καθοδική προστασία) και με την ποιοτική επίβλεψη εγκατάστασης.



Εικόνα 2.1: Αγωγοί PVC-u σειρά 41 με χρήση στην αποχέτευση

Τα πολυμερή υλικά (PVC-U, PE) χαρακτηρίζονται από ανθεκτικότητα στη διάβρωση και μειωμένη μάζα, η οποία μεταφράζεται σε ευκολότερη μεταφορά και ταχύτερη εγκατάσταση. Ωστόσο, η τεχνική τους συμπεριφορά είναι διαφορετική από τα μεταλλικά, καθώς το PE εμφανίζει ερπυσμό (creep) και απαιτεί μακροχρόνια αξιολόγηση αντοχής (π.χ. MRS και δοκιμές αντοχής σε χρόνο), ενώ το PVC-U έχει υψηλότερη ακαμψία και διαφορετική συμπεριφορά σε κρούση/θερμοκρασία. Επιπλέον, η ακεραιότητα του δικτύου εξαρτάται κρίσιμα από τις συνδέσεις, είτε πρόκειται για συγκολλήσεις αγωγών PE (μετωπική, ηλεκτροσύντηξη) είτε για δακτύλιους/μούφες αγωγών PVC. Επομένως, η ποιότητα εγκατάστασης και οι διαδικασίες ελέγχου αποτελούν μέρος της τεχνικής αξιολόγησης βιωσιμότητας.

2.2.2. Υλικά και μηχανισμοί φθοράς στα δίκτυα αποχέτευσης

Τα δίκτυα αποχέτευσης, κατά κανόνα βαρυτικά, λειτουργούν σε περιβάλλον με χημικές και βιολογικές προσβολές, μεταβαλλόμενες παροχές και πιθανή παρουσία αερίων. Οι βασικοί μηχανισμοί υποβάθμισης περιλαμβάνουν (α) χημική προσβολή και μικροβιολογικά υποκινούμενη διάβρωση (MICC) ειδικά σε σκυρόδεμα, (β) εισροές-διηθήσεις (I/I) από υπόγεια ύδατα και φόρτιση ομβρίων υδάτων, (γ) παραμορφώσεις/καθιζήσεις λόγω εδαφικών κινήσεων και ανεπαρκούς έδρασης, (δ) φθορά αρμών, συνδέσεων και φρεατίων και (ε) αποθέσεις/απόφραξη που αυξάνουν την τραχύτητα και μειώνουν τη διαθέσιμη διατομή.

Η στεγανότητα είναι κρίσιμο ζητούμενο στην αποχέτευση, διότι οι εισροές-διηθήσεις αυξάνουν την παροχή προς άντληση και επεξεργασία, άρα και το ενεργειακό αποτύπωμα του συστήματος. Επιπλέον, οι εισροές μπορούν να δημιουργήσουν υδραυλική υπερφόρτιση σε έντονες βροχοπτώσεις και να οδηγήσουν σε υπερχειλίσες είτε στο δίκτυο είτε στην

Εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, με σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συνεπώς, η επιλογή βιώσιμων υλικών στην αποχέτευση πρέπει να συνεκτιμά χημική ανθεκτικότητα, στεγανότητα, διάρκεια ζωής και σωστή τοποθέτηση.

2.2.3. Υφιστάμενη κατάσταση δικτύων

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι μεγάλο μέρος των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης είναι παλαιό, με αυξανόμενη συχνότητα βλαβών. Στην ύδρευση, η γήρανση εκδηλώνεται μέσω διαρροών και θραύσεων, οι οποίες επηρεάζουν την αξιοπιστία παροχής υπηρεσίας και αυξάνουν το μη τιμολογούμενο νερό NRW. Η προέλευση αυτών οφείλεται στην διάβρωση, υδραυλικές παρεμβάσεις, εδαφικές κινήσεις, φορτίσεις από κυκλοφορία, αστοχίες συνδέσεων, ανεπαρκής ποιότητα εγκατάστασης και διακυμάνσεις στην πίεση λειτουργίας.

Ο δείκτης NRW (Non-Revenue Water) χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της επιχειρησιακής απόδοσης και περιλαμβάνει πραγματικές απώλειες (διαρροές) και φαινομενικές απώλειες. Η μείωση NRW προϋποθέτει (α) σύσταση ζωνών δικτύου και ισοζύγια νερού, (β) ενεργή ανίχνευση διαρροών, (γ) διαχείριση πίεσης, (δ) αντικατάσταση τμημάτων με συχνές αστοχίες και (ε) αναβάθμιση μέτρησης/τηλεμετρίας.

Στην αποχέτευση, η παλαίωση δικτύων εκδηλώνεται με ρωγμές, καθιζήσεις, αστοχίες αρμών και φθορά φρεατίων. Οι εισροές-διηθήσεις (I/I) αυξάνουν το υδραυλικό φορτίο προς άντληση/επεξεργασία, ενώ σε αστικό περιβάλλον η ανοικτή εκσκαφή πέραν του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και της παραγωγής αποβλήτων, δημιουργεί υψηλό κοινωνικό κόστος (κυκλοφοριακή όχληση, θόρυβος, καθυστερήσεις). Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν τις trenchless λύσεις ιδιαίτερα ελκυστικές, λόγω των μειωμένων εκσκαφών και αποκαταστάσεων, δεδομένου ότι είναι τεχνικά εφαρμόσιμες.

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η βελτίωση της ανθεκτικότητας είναι κρίσιμη συνιστώσα βιωσιμότητας, δηλαδή υλικά με αυξημένη αντοχή σε διάβρωση/χημικές προσβολές και χαμηλότερο δείκτη αστοχίας οδηγούν σε σταθερότερη λειτουργία, μικρότερο κίνδυνο διακοπών και χαμηλότερο συνολικό κόστος. Επομένως, η επιλογή υλικών και μεθόδων πρέπει να γίνεται με ορίζοντα κύκλου ζωής και με ρητή συνεκτίμηση του αριθμού μελλοντικών επεμβάσεων.

2.3. Θεσμικό και Κανονιστικό Πλαίσιο

2.3.1. Ευρωπαϊκή πολιτική και απαιτήσεις ποιότητας πόσιμου νερού

Το θεσμικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθορίζει τόσο τις απαιτήσεις ποιότητας όσο και τις ελάχιστες τεχνικές υποχρεώσεις για τις υποδομές νερού. Η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα (2000/60/EK) θεσπίζει την ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκανών απορροής, με στόχο την «καλή κατάσταση» επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Η διαχείριση αυτή επηρεάζει τις προτεραιότητες έργων ύδρευσης-αποχέτευσης, καθώς συνδέεται με την προστασία υδατικών σωμάτων και μείωση πιέσεων.

Η Οδηγία (ΕΕ) 2020/2184 για την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (αναδιατύπωση) εκσυγχρονίζει το πλαίσιο παρακολούθησης και εισάγει προσέγγιση με αξιολόγηση σε όλη την αλυσίδα (πηγή-επεξεργασία-δίκτυο-καταναλωτής). Ειδικά για τις επιλογές υλικών, η Οδηγία περιλαμβάνει πρόβλεψη για ελάχιστες απαιτήσεις υγιεινής για υλικά και προϊόντα σε επαφή με πόσιμο νερό (Article 11). Η κατεύθυνση αυτή είναι κομβική για την αξιολόγηση βιωσιμότητας ειδικά για δίκτυα ύδρευσης, διότι προϋποθέτει αρχικά την συμμόρφωση/καταλληλότητα για πόσιμο νερό, έπειτα την τεχνική αξιοπιστία και τέλος την ποσοτική τεκμηρίωση LCA/LCC.

2.3.2. Ελληνικό πλαίσιο: ενσωμάτωση οδηγιών και τεχνικές προδιαγραφές

Σε εθνικό επίπεδο, η συμμόρφωση με την Οδηγία (ΕΕ) 2020/2184 προωθείται μέσω της Υπουργικής Απόφασης Δ1(δ)/ΓΠ οικ. 27829/2023 (ΦΕΚ Β 3525/25.5.2023) για την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Παράλληλα, ο εθνικός προγραμματισμός έργων ύδρευσης αποτυπώνεται στο Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο για το Πόσιμο Νερό (2021-2030), το οποίο περιλαμβάνει χαρτογράφηση αναγκών, κανόνες προτεραιοποίησης και προβλέπει την σύνταξη Γενικών Σχεδίων Ύδρευσης (Master plans) και Σχεδίων Ασφάλειας Νερού (ΣΑΝ), στοιχείο που υποδεικνύει μετάβαση από αποσπασματικές παρεμβάσεις σε συστηματικό σχεδιασμό.

Στον χώρο των δημοσίων έργων, οι ελληνικές τεχνικές προδιαγραφές (ΕΛΟΤ ΤΠ/ΠΕΤΕΠ) εξειδικεύουν την κατασκευή δικτύων και συνδέουν την εκτέλεση εργασιών με αντίστοιχα ευρωπαϊκά πρότυπα. Ενδεικτικά, η ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-06-02-01:2009 αφορά δίκτυα υπό πίεση από σωλήνες u-PVC και περιγράφει απαιτήσεις για υλικά, ελέγχους και δοκιμές. Η ύπαρξη σαφών προδιαγραφών διευκολύνει την ενσωμάτωση νέων υλικών, υπό την προϋπόθεση ότι τεκμηριώνεται ισοδύναμη ή βελτιωμένη τεχνική επίδοση.

2.3.3. Κανονιστικό Πλαίσιο αστικών λυμάτων

Στον τομέα της αποχέτευσης, η Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 για την επεξεργασία αστικών λυμάτων (αναδιατύπωση της 91/271/ΕΟΚ) ενισχύει τις υποχρεώσεις συλλογής και επεξεργασίας και ενσωματώνει ισχυρότερη κατεύθυνση για περιβαλλοντική και ενεργειακή επίδοση. Η εξέλιξη αυτή επηρεάζει έμμεσα αλλά ουσιαστικά τις επιλογές υλικών και μεθόδων στα δίκτυα καθώς η στεγανότητα και ο περιορισμός I/I μειώνουν το υδραυλικό φορτίο προς επεξεργασία και κατά συνέπεια την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές.

Επιπλέον, το ευρωπαϊκό πλαίσιο για επαναχρησιμοποίηση ύδατος (π.χ. Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 για ελάχιστες απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης) ενισχύει την ανάγκη αξιόπιστων δικτύων και ελέγχου ποιότητας, διότι η επαναχρησιμοποίηση προϋποθέτει σταθερή ποιότητα και διαχείριση των ροών. Συνεπώς απαιτείται ο έλεγχος παραγόντων όπως η διάβρωση, τα υδραυλικά πλήγματα, οι εδαφικές κινήσεις, οι αστοχίες συνδέσεων και τοποθέτησης και η διακύμανση στην πίεση λειτουργίας.

Η τεκμηρίωση βιωσιμότητας υλικών βασίζεται σε διεθνή πρότυπα και ευρωπαϊκή τυποποίηση. Τα ISO 14040/14044 παρέχουν το πλαίσιο για LCA, ενώ το ISO 14025 καθορίζει τις Type III περιβαλλοντικές δηλώσεις. Στον κατασκευαστικό κλάδο, το EN 15804 ορίζει τους βασικούς κανόνες (Product Category Rules-PCR) για EPD, με σαφή διάκριση σταδίων κύκλου ζωής (A1-A3, A4-A5, B, C και D) και τυποποιημένους δείκτες.

Η διάθεση δομικών προϊόντων στην αγορά της ΕΕ διέπεται από τον Κανονισμό για τα Δομικά Προϊόντα (Construction Products Regulation-CPR). Η πρόσφατη εξέλιξη του CPR (Κανονισμός (ΕΕ) 2024/3110) ενισχύει την κατεύθυνση για δομημένες πληροφορίες επιδόσεων και για καλύτερη διαφάνεια στην αλυσίδα προϊόντων. Η εξέλιξη αυτή συνδέεται λειτουργικά με την ανάγκη για τεκμηρίωση περιβαλλοντικής επίδοσης (π.χ. EPD) και για αποφυγή «πράσινων» ισχυρισμών χωρίς δεδομένα.

Σε επίπεδο χημικής ασφάλειας, ο Κανονισμός REACH (1907/2006 Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) καθορίζει κανόνες για καταχώριση, αξιολόγηση, αδειοδότηση και περιορισμό χημικών ουσιών με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος. Στα έργα νερού, ο REACH επηρεάζει άμεσα την επιλογή υλικών, επικαλύψεων, πολυμερών και χημικών προσθέτων που χρησιμοποιούνται σε αγωγούς.

2.3.4. Δημόσιες συμβάσεις έργων

Η επιλογή υλικών σε δημόσια έργα καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το πλαίσιο δημοσίων συμβάσεων. Η Οδηγία 2014/24/ΕΕ που έχει ενσωματωθεί στην Ελλάδα στον Ν. 4412/16 (Άρθρο 87), επιτρέπει τη χρήση κοστολόγησης του κύκλου ζωής LCC ως κριτήριο ανάθεσης, ενσωματώνοντας κόστος απόκτησης, χρήσης, συντήρησης και τέλους ζωής. Για υποδομές νερού, η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι τα λειτουργικά κόστη και οι επισκευές μπορούν να υπερβούν το αρχικό CAPEX.

Η πρακτική ενσωμάτωση LCC και περιβαλλοντικών κριτηρίων (π.χ. EPD) σε διαγωνισμούς απαιτεί σαφή μεθοδολογία, ώστε τα κριτήρια να είναι ελέγξιμα και συγκρίσιμα. Συχνά, η βιβλιογραφία προτείνει «ιεραρχία» κριτηρίων θέτοντας πρώτα την τεχνική συμμόρφωση (πρότυπα, δοκιμές), έπειτα τις ελάχιστες απαιτήσεις βιωσιμότητας (π.χ. EPD ή ανώτατο όριο GWP ανά λειτουργική μονάδα) και τέλος την αξιολόγηση βάσει LCC ή πολυκριτηριακής ανάλυσης.

2.3.5. Εργαλεία αξιολόγησης βιωσιμότητας υποδομών

Πέραν των προτύπων προϊόντος, έχουν αναπτυχθεί εργαλεία αξιολόγησης βιωσιμότητας έργων υποδομής που λειτουργούν ως πλαίσιο για σχεδιασμό, τεκμηρίωση και επαλήθευση βιώσιμων πρακτικών. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι το Envision (Institute for Sustainable Infrastructure) και το BREEAM Infrastructure (πρώην CEEQUAL), δύο από τα πλέον διαδεδομένα. Καλύπτουν θεματικές όπως διαχείριση πόρων, κλιματική προσαρμογή, ανθεκτικότητα, οικοσυστήματα και κοινωνική αξία. Σε έργα ύδρευσης-αποχέτευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως η αρχική βάση τεκμηρίωσης, ώστε οι επιλογές υλικών και μεθόδων να εντάσσονται σε συνολική στρατηγική βιωσιμότητας κύκλου ζωής.

2.4. Προηγούμενες Μελέτες και Έρευνες

2.4.1. Μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) για υλικά σωληνώσεων

Η διεθνής βιβλιογραφία των τελευταίων ετών παρουσιάζει αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) σε αγωγούς ύδρευσης και αποχέτευσης. Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα αφορούν την επιλογή του υλικού με χαμηλότερο αποτύπωμα ανά λειτουργική μονάδα (π.χ. 1km αγωγού), την φάση του κύκλου ζωής που κυριαρχεί στις

επιπτώσεις και πώς μεταβάλλονται τα αποτελέσματα όταν ενσωματώνονται παραδοχές διάρκειας ζωής, συντήρησης, μεταφορών και τέλους ζωής.

Για τους σκοπούς της σύγκρισης εναλλακτικών υλικών/τεχνολογιών σε δίκτυα ύδρευσης–αποχέτευσης, στην βιβλιογραφία υιοθετούνται δείκτες που αποτυπώνουν (i) αξιοπιστία, (ii) λειτουργικότητα/υδραυλική επίδοση και (iii) απωλειο-ενεργειακή αποτελεσματικότητα. Οι σημαντικότεροι δείκτες που χρησιμοποιούνται ευρέως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.1 Συνοπτική παρουσίαση των συνηθέστερων δεικτών αξιολόγησης

	Περιγραφή	Δείκτης	Μονάδα μέτρησης	Χρήση
ΤΕΧΝΙΚΑ	Διάρκεια ζωής	Reference Service Life (RSL)	έτη	Καθορίζει ορίζοντα αντικατάστασης/υποβάθμισης, επηρεάζει LCC/LCA μέσω αριθμού επεμβάσεων
	Ρυθμός αστοχιών	Failure Rate (FR)	βλάβες/(km·έτος)	Εισαγόμενο μέγεθος για μοντελοποίηση O&M κόστους και εκπομπών επισκευών
	Στεγανότητα	Non Revenue Water (NRW)	%	Ποσοτικοποιεί απώλειες/διηθήσεις· συνδέεται με ποιότητα υλικού/συνδέσεων/μεθόδου
	Στεγανότητα	Leakage Intensity (LI)	m ³ /(km·ημέρα)	Ποσοτικοποιεί απώλειες/διηθήσεις· συνδέεται με ποιότητα υλικού/συνδέσεων/μεθόδου
	Στεγανότητα	Inflow/Infiltration (I/I)		Ποσοτικοποιεί απώλειες/διηθήσεις· συνδέεται με ποιότητα υλικού/συνδέσεων/μεθόδου
	Αντοχή σε διάβρωση			Κρίσιμο για αποχέτευση (χημικά, H ₂ S) και για διάρκεια ζωής
	Υδραυλική επίδοση	Energy intensity (EI)	kWh/m ³	Κρίσιμο για το λειτουργικό κόστος
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	Κόστος αγοράς	CAPEX	€/m ή €/km	
	Κόστος Συντήρησης	OPEX	€/έτος ή €/km·έτος	Εξαρτάται από FR, πρόσβαση, απαιτούμενες επεμβάσεις
	Κόστος Κύκλου Ζωής	LCC	NPV (€)	Συγκρίνει υλικά/μεθόδους στον ίδιο ορίζοντα
	Όχληση		€/km ή ποιοτικός δείκτης	Ανάλογα με την μέθοδο τοποθέτησης (εκσκαφές ή μη)
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ	Ανθρακικό αποτύπωμα		kg CO ₂ -eq ανά FU	Συνδέεται με παραγωγή/μεταφορές/εγκατάσταση
	Αποβλήτα εκσκαφών		t ή m ³	Ανάλογα με την μέθοδο τοποθέτησης (εκσκαφές ή μη)
	Ενεργειακό αποτύπωμα		MJ ή kWh	Συνδέεται με παραγωγή/μεταφορές/εγκατάσταση

Στην ύδρευση, μελέτες LCA συγκρίνουν υλικά όπως PE, PVC-U, χυτοσίδηρο, χάλυβα και σύνθετα υλικά, εφαρμόζοντας το πλαίσιο φάσεων σύμφωνα με τα ISO 14040/14044. Ένα επαναλαμβανόμενο εύρημα είναι ότι η φάση παραγωγής υπερτερεί στους δείκτες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το δυναμικό υπερθέρμανσης (Global Warming Potential-GWP) που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση του ανθρακικού αποτυπώματος, για υλικά υψηλής ενεργειακής απαίτησης. Αντίθετα, σε αστικά έργα η φάση εγκατάστασης

(εκσκαφές, μεταφορές, αποκατάσταση οδοστρώματος) μπορεί να αποκτήσει αντίστοιχη ή και μεγαλύτερη σημασία. Έτσι, το αποτέλεσμα μιας τέτοιας σύγκρισης εξαρτάται συχνά από το αν η LCA είναι cradle-to-gate (από την εξόρυξη έως την πύλη του εργοστασίου) ή cradle-to-grave (από την εξόρυξη έως την τελική διάθεση/ταφή) (EN 15804:2012+A2:2019).

Μεθοδολογικά, τρεις παράμετροι αναφέρονται ως ιδιαίτερα «ευαίσθητες», (α) η διάρκεια ζωής (Reference Service Life) και οι κανόνες αντικατάστασης εντός του ορίζοντα, (β) ο ρυθμός αστοχιών και οι ροές συντήρησης/επισκευών και (γ) τα σενάρια τέλους ζωής. Λαμβάνοντας υπόψη και το ποσοστό επισκευών, το συνολικό αποτέλεσμα μπορεί να μεταβληθεί, διότι οι επισκευές εμπεριέχουν εκσκαφές, καύσιμα, αποκαταστάσεις επιφανειών και πρόσθετα υλικά. Αντίστοιχα, στο πλαίσιο EN 15804, το module D μπορεί να αποδώσει πιστώσεις από ανακύκλωση ή ανάκτηση, οι οποίες όμως εξαρτώνται από περιπτώσεις συλλογής και πραγματικής αξιοποίησης.

Στην αποχέτευση, η LCA βιβλιογραφία αναδεικνύει τη σημασία της διάβρωσης σκυροδέματος και της ανάγκης προστατευτικών συστημάτων. Αν και στην ελληνική πρακτική η πλήρης αντικατάσταση αγωγών αποκλειστικά λόγω MICC δεν τεκμηριώνεται ως συχνό φαινόμενο, η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι σε περιβάλλοντα με έντονη ανάπτυξη Η₂S η ανάγκη προστατευτικών επεμβάσεων ή τοπικών αποκαταστάσεων μπορεί να αυξήσει σημαντικά το περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος του κύκλου ζωής.

2.4.2. Life Cycle Cost (LCC) και ολοκλήρωση με LCA σε υποδομές νερού

Η οικονομική αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCC) χρησιμοποιείται για να αποτιμήσει το συνολικό κόστος ενός δικτύου ή μιας λύσης αποκατάστασης. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η LCC είναι συχνά καθοριστική, διότι τα λειτουργικά κόστη και οι επισκευές μπορούν να υπερβούν σημαντικά το αρχικό CAPEX. Στην ύδρευση, υψηλό NRW συνεπάγεται επιπλέον κόστος άντλησης/επεξεργασίας και συχνά συνδέεται με υψηλότερο ποσοστό αστοχίας. Στην αποχέτευση, υψηλό I/I μεταφράζεται σε μεγαλύτερο κόστος άντλησης/επεξεργασίας και αυξημένο κίνδυνο υπερχειλίσεων, με έμμεσες περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες.

Η ολοκλήρωση LCA και LCC προτείνεται ως βέλτιστη πρακτική, διότι επιτρέπει να εντοπιστούν περιπτώσεις όπου μια λύση μπορεί να έχει χαμηλότερο αποτύπωμα αλλά υψηλότερο κόστος (ή το αντίστροφο). Σε τέτοιες περιπτώσεις, η λήψη απόφασης απαιτεί

σαφή στάθμιση κριτηρίων ή πολυκριτηριακή ανάλυση, ιδίως όταν υπάρχουν δεσμευτικοί στόχοι (π.χ. μείωση εκπομπών) ή περιορισμοί προϋπολογισμού.

Σημαντικό είναι ότι η LCC πρέπει να στηρίζεται σε ρεαλιστικά δεδομένα συντήρησης και ρυθμών αστοχιών. Η βιβλιογραφία συχνά διαχωρίζει προληπτική και διορθωτική συντήρηση και χρησιμοποιεί περιπτώσεις επισκευής με τυποποιημένες ροές κόστους και επιπτώσεων. Αυτό το πλαίσιο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για να συνδεθούν οι τεχνικοί δείκτες (FR, RSL, NRW, I/I) με τις ροές LCA/LCC.

2.4.3. Εγκατάσταση υπογείων δικτύων χωρίς διάνοιξη ορύγματος (trenchless)

Η βιβλιογραφία για τεχνολογίες εγκατάστασης υπόγειων δικτύων χωρίς διάνοιξη ορύγματος (CIPP, pipe bursting, sliplining) έχει ενισχυθεί σημαντικά. Κύριο συμπέρασμα των ποσοτικών συγκρίσεων είναι ότι η αποφυγή εκσκαφών και αποκαταστάσεων επιφανειών μπορεί να μειώσει ουσιαστικά τόσο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα όσο και το κοινωνικό κόστος που προκαλείται από την όχληση.

Ωστόσο, οι trenchless τεχνολογίες δεν είναι «καθολική λύση». Η επιλογή επηρεάζεται από την κατάσταση του υφιστάμενου αγωγού (δομική ακεραιότητα, παραμορφώσεις), τη διάμετρο, τα σημεία πρόσβασης, την ύπαρξη πολλών συνδέσεων, καθώς και από απαιτήσεις υδραυλικής ικανότητας. Επιπλέον, για τεχνολογίες όπως CIPP, απαιτείται προσεκτική διαχείριση της εγκατάστασης (σκλήρυνση, έλεγχοι ποιότητας, διαχείριση εκπομπών/οσμών) και κατάλληλη επιλογή ρητινών.

Η βιβλιογραφία προτείνει η σύγκριση της τεχνολογίας trenchless έναντι open-cut (ανοιγμα ορύγματος) να γίνεται σε κύκλο ζωής και ανά σενάριο εφαρμογής, με σαφή δήλωση (α) των εργασιών εργοταξίου που συμπεριλαμβάνονται, (β) του επιπέδου αποκατάστασης επιφανειών, (γ) των ρυθμών αστοχιών πριν/μετά την επέμβαση και (δ) της εκτιμώμενης διάρκειας ζωής (RSL) της ανακαινισμένης λύσης. Αυτό το πλαίσιο επιτρέπει αξιόπιστες συγκρίσεις και αποφυγή υπεραπλουστεύσεων.

2.4.4. Εξελεγχμένα υλικά, έξυπνες τεχνολογίες και κατευθύνσεις έρευνας

Η έρευνα σε εξελεγχμένα υλικά στοχεύει κυρίως σε αύξηση ανθεκτικότητας και μείωση του ποσοστού αστοχίας. Σε τσιμεντοειδή υλικά, τα self-healing (αυτό-ιάσιμα) συστήματα (χημικά ή βιολογικά) επιδιώκουν να κλείνουν ρωγμές και να μειώνουν διείδυση επιθετικών παραγόντων, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό σε αποχέτευση με MICC. Παράλληλα,

αναπτύσσονται αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις, υβριδικά liners και βελτιωμένες συνθέσεις σκυροδέματος, π.χ. με πρόσθετα, με στόχο χαμηλότερο αποτύπωμα και καλύτερη ανθεκτικότητα.

Στην ύδρευση, η ψηφιοποίηση και η τηλεμετρία αναδεικνύονται ως κρίσιμος άξονας βιωσιμότητας, διότι επιτρέπουν μείωση NRW και καλύτερο προγραμματισμό αντικαταστάσεων. Η χρήση αισθητήρων πίεσης/παροχής, ποιοτικών χαρακτηριστικών, ανάλυσης δεδομένων και αλγορίθμων ανίχνευσης διαρροών μπορεί να μειώσει πραγματικές απώλειες και να αυξήσει την επιχειρησιακή αξιοπιστία. Η σύνδεση των επιλογών υλικού με δεδομένα λειτουργίας επιτρέπει στοχευμένη αντικατάσταση τμημάτων με υψηλό ποσοστό αστοχίας (FR) και αποφυγή υπερ-επενδύσεων σε τμήματα με χαμηλή κρισιμότητα.

Τέλος, η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι η βιωσιμότητα υποδομών νερού απαιτεί συνδυασμό υλικών, τεχνολογιών κατασκευής/αποκατάστασης και διαχείρισης. Ένα υλικό υψηλής ανθεκτικότητας δεν αποδίδει πλήρως χωρίς ορθή εγκατάσταση και επιτήρηση, ενώ η καλύτερη τεχνολογία αποκατάστασης δεν μεγιστοποιεί το όφελος χωρίς λειτουργική στρατηγική μείωσης απωλειών και προληπτική συντήρηση.

2.4.5. Μελέτες σε Ελλάδα

Η διαθέσιμη βιβλιογραφία για ελληνικά δίκτυα περιλαμβάνει θεσμικές πηγές (εθνικός σχεδιασμός, ενσωμάτωση οδηγιών) και επιμέρους ερευνητικές εργασίες για δείκτες απωλειών και επιχειρησιακές πρακτικές. Το Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο για το Πόσιμο Νερό (2021-2030) αποτελεί σημαντικό πλαίσιο, διότι καταγράφει ανάγκες, έργα και κανόνες προτεραιοποίησης. Ωστόσο, η παραγωγή πρωτογενών δεδομένων LCA/LCC ειδικά για ελληνικές συνθήκες (εργοτάξιο, μεταφορές, κόστη συντήρησης, ιστορικά βλαβών) παραμένει σχετικά περιορισμένη.

Η παρούσα Εργασία αξιοποιεί τη διεθνή βιβλιογραφία ώστε να διαμορφώσει εφαρμόσιμο πλαίσιο κριτηρίων επιλογής υλικών και μεθόδων για έργα ύδρευσης-αποχέτευσης, με συνεκτίμηση θεσμικών απαιτήσεων, τεχνικής καταλληλότητας και κύκλου ζωής.

Αρχικά, η βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι η «βιωσιμότητα» στα έργα ύδρευσης-αποχέτευσης είναι μια ιδιότητα όπου το υλικό, η μέθοδος εγκατάστασης/αποκατάστασης και η λειτουργική διαχείριση καθορίζουν από κοινού τις τεχνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις. Ένα υλικό με χαμηλό ενσωματωμένο αποτύπωμα ενδέχεται να μην αποδώσει ως βιώσιμη λύση εάν η εγκατάσταση είναι ποιοτικά ανεπαρκής ή εάν ο ρυθμός

αστοχιών οδηγήσει σε συχνές επισκευές. Αντίστροφα, ένα υλικό με υψηλότερο αποτύπωμα παραγωγής μπορεί να εμφανίσει χαμηλότερο συνολικό αποτύπωμα σε κύκλο ζωής εφόσον αυξάνει τη διάρκεια ζωής και μειώνει τις επεμβάσεις.

Επιπλέον οι LCA υλικών σωληνώσεων πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή, δεδομένου ότι η χρήση διαφορετικών λειτουργικών μονάδων (π.χ. ανά kg υλικού αντί ανά km αγωγού), η παράλειψη της φάσης εγκατάστασης ή η μη συμπερίληψη συντήρησης μπορεί να οδηγήσουν σε συμπεράσματα που δεν είναι εφαρμόσιμα σε έργα πραγματικού κόσμου. Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία συστήνει σαφή δήλωση παραδοχών και, όπου είναι δυνατό, χρήση δεδομένων EPD με κοινά χαρακτηριστικά προϊόντος (PCR) και συμβατά όρια συστήματος.

Παράλληλα, χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη ότι η οικονομική αξιολόγηση (LCC) είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην αξιοπιστία. Για παράδειγμα, μικρή αύξηση του ποσοστού αστοχίας μπορεί να επιφέρει δυσανάλογη αύξηση κόστους λόγω εκσκαφών, αποκατάστασης οδοστρώματος και έμμεσων δαπανών (διακοπές υπηρεσίας, κυκλοφοριακές ρυθμίσεις). Συνεπώς, η βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι η συλλογή ιστορικών δεδομένων βλαβών και η τυποποίηση των επεμβάσεων/επισκευών είναι κρίσιμη για ρεαλιστική LCC και για σύνδεση τεχνικών δεικτών με ροές κόστους/εκπομπών.

Τέλος, οι trenchless τεχνολογίες εμφανίζουν σημαντικά οφέλη σε αστικό περιβάλλον, αλλά η επιλογή τους πρέπει να γίνεται με βάση την δυνατότητα και όρια εφαρμογής. Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι παράγοντες όπως η δομική κατάσταση του υφιστάμενου αγωγού, η διάμετρος, οι συνδέσεις παροχών και οι απαιτήσεις υδραυλικής ικανότητας καθορίζουν την καταλληλότητα της κάθε μεθόδου. Επομένως, η σύγκριση trenchless έναντι open-cut πρέπει να είναι βασισμένη στις πραγματικές εργασίες εργοταξίου και αποκατάστασης.

Με βάση τα παραπάνω, η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στην επιλογή υλικών/τεχνολογιών έχοντας λάβει υπόψη (α) την τεχνική συμμόρφωση και καταλληλότητα για τη συγκεκριμένη χρήση (ύδρευση ή αποχέτευση), (β) την ποσοτικοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων με LCA/EPD και σαφή όρια συστήματος, (γ) την ποσοτικοποίηση οικονομικής επίδοσης με LCC σε κοινό ορίζοντα και (δ) την σύνθεση αποτελεσμάτων σε πολυκριτηριακό πλαίσιο που περιλαμβάνει αξιοπιστία, ανθεκτικότητα, κατασκευασιμότητα και κοινωνικές επιπτώσεις.

3. Βιώσιμα Δομικά Υλικά για Έργα Ύδρευσης και Αποχέτευσης

3.1. Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στα δομικά και βοηθητικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε έργα ύδρευσης και αποχέτευσης, πέραν των ίδιων των σωληνώσεων. Εξετάζονται, ειδικότερα, τα υλικά που ενσωματώνονται σε δεξαμενές, αντλιοστάσια, φρεάτια, θαλάμους δικτύων, βάσεις και πλάκες έδρασης, καλύμματα, σχάρες, συστήματα στεγανοποίησης και προστασίας, καθώς και στα υλικά έδρασης, εγκιβωτισμού και επίχωσης. Η ανάλυση βασίζεται στην παραδοχή ότι η βιωσιμότητα των έργων νερού δεν προσδιορίζεται μόνο από το υλικό του αγωγού, αλλά από το σύνολο των επιμέρους υλικών που καθορίζουν τη διάρκεια ζωής, τη στεγανότητα, την ανθεκτικότητα, την ευχέρεια συντήρησης και το συνολικό αποτύπωμα κύκλου ζωής του έργου.

Στο πλαίσιο αυτό, το κεφάλαιο οργανώνεται σε έξι βασικούς άξονες. Αρχικά εξετάζονται το σκυρόδεμα και τα τσιμεντοειδή υλικά, τα οποία αποτελούν τον κορμό πολλών δομικών στοιχείων. Στη συνέχεια αναλύονται τα μεταλλικά υλικά και η σημασία της αντιδιαβρωτικής προστασίας. Ακολουθούν τα πολυμερή και σύνθετα υλικά, τα οποία κερδίζουν έδαφος με εφαρμογές σε φρεάτια, καλύμματα και ειδικές κατασκευές. Έπειτα παρουσιάζονται τα υλικά στεγανοποίησης και επενδύσεων, τα οποία είναι κρίσιμα για τη μακροχρόνια απόδοση των δομών, εξετάζονται τα υλικά έδρασης, εγκιβωτισμού και επίχωσης, με έμφαση σε λύσεις κυκλικής οικονομίας και συνοψίζονται τα βασικά κριτήρια επιλογής δομικών υλικών για έργα νερού.

3.2. Σκυρόδεμα και τσιμεντοειδή υλικά σε έργα νερού.

3.2.1. Ο ρόλος του σκυροδέματος στις υποδομές ύδρευσης και αποχέτευσης

Το σκυρόδεμα αποτελεί το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό σε έργα ύδρευσης και αποχέτευσης. Η χρήση του εκτείνεται σε δεξαμενές αποθήκευσης νερού, σε αντλιοστάσια, σε φρεάτια επίσκεψης, σε θαλάμους δικλείδων, σε έργα αγκυρώσεων και βάσεων, σε κανάλια και αυλάκια ροής, σε πλακοσκεπείς κατασκευές, καθώς και σε πλήθος προκατασκευασμένων στοιχείων. Η κυριαρχία του οφείλεται στη δυνατότητα προσαρμογής του σε ποικίλες γεωμετρίες, στην υψηλή θλιπτική αντοχή, στη διαθεσιμότητα πρώτων υλών και στην τεχνολογική ωριμότητα που διαθέτει σε επίπεδο προδιαγραφών, εργαστηριακού ελέγχου και κατασκευαστικής εμπειρίας.

Ωστόσο, το γεγονός ότι το σκυρόδεμα είναι σχεδόν αναπόφευκτο σε πολλά έργα νερού δεν σημαίνει ότι όλες οι μορφές του είναι ισοδύναμες από πλευράς βιωσιμότητας. Στην πραγματικότητα, η σύνθεσή του, η ποσότητα τσιμέντου, το είδος των προσθέτων, το ποσοστό νερού, η ποιότητα των αδρανών, η διαδικασία παραγωγής, η απόσταση μεταφοράς και οι συνθήκες ωρίμανσης επηρεάζουν σημαντικά την τεχνική και περιβαλλοντική του επίδοση. Συνεπώς, η επιλογή υλικών σκυροδέματος/τσιμεντοειδών δεν μπορεί να κρίνεται μόνο σε όρους μηχανικής αντοχής σε 28 ημέρες, αλλά οφείλει να περιλαμβάνει και τη συμπεριφορά σε μακροχρόνια λειτουργία.

3.2.2. Περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συμβατικού σκυροδέματος

Παρά τη χρηστικότητά του, το συμβατικό σκυρόδεμα θεωρείται διεθνώς ένα από τα πιο κοινά υλικά περιβαλλοντικής επιβάρυνσης στα έργα υποδομής, λόγω του τσιμέντου Portland που περιέχει. Η μεγαλύτερη επιβάρυνση σχετίζεται με την παραγωγή κλίνκερ, καθώς αυτή απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, σημαντική κατανάλωση ενέργειας και ταυτόχρονα προκαλεί εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τη χημική αποανθράκωση των ανθρακικών πρώτων υλών. Ως αποτέλεσμα, ακόμη και σχετικά μικρές αυξήσεις στο ποσοστό τσιμέντου ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος μπορούν να μεταβάλουν αισθητά το ανθρακικό του αποτύπωμα.

Από την άλλη πλευρά, τα αδρανή υλικά, αν και συνιστούν τη μεγαλύτερη μαζική συνιστώσα του σκυροδέματος, εμφανίζουν συνήθως χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση ανά μονάδα μάζας. Ωστόσο, το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα δεν είναι αμελητέο, ιδιαίτερα όταν οι αποστάσεις μεταφοράς είναι μεγάλες ή όταν απαιτούνται εκτεταμένες διαδικασίες θραύσης, πλύσης και επεξεργασίας.

Παράλληλα, σε ορισμένα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης, οι εργοταξιακές συνθήκες, η ανάγκη αντλιών σκυροδέματος, οι δυσπρόσιτες θέσεις, οι κυκλοφοριακές επιβαρύνσεις και η αποκατάσταση επιφανειών προσθέτουν δευτερογενείς επιπτώσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η περιβαλλοντική αξιολόγηση του σκυροδέματος δεν πρέπει να περιορίζεται στην αρχική φάση παραγωγής. Ένα σκυρόδεμα που εμφανίζει μεν χαμηλότερο αποτύπωμα κατά την παραγωγή του, αλλά παρουσιάζει μικρότερη διάρκεια ζωής ή αυξημένη ευαισθησία σε διάβρωση και ρηγμάτωση, μπορεί τελικά να οδηγήσει σε μεγαλύτερο συνολικό κόστος και μεγαλύτερο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Αντίθετα, ένα ανθεκτικότερο σύστημα, ακόμη και αν εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερο αρχικό κόστος ή μεγαλύτερο αρχικό αποτύπωμα, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ ευνοϊκότερο ισοζύγιο σε βάθος χρόνου.

Συνεπώς, η αξιολόγηση του σκυροδέματος σε έργα νερού δεν πρέπει να περιορίζεται στο αρχικό περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, αλλά να συνδέεται με την αναμενόμενη περιβαλλοντική έκθεση, τη διαπερατότητα, τη χημική αντοχή και τη δυνατότητα συνεργασίας με προστατευτικές επενδύσεις ή επιχρίσματα. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στην αποχέτευση και σε μικρότερο βαθμό σε έργα ύδρευσης όπως δεξαμενές, υπόγειοι θάλαμοι και δομές που εκτίθενται σε παραθαλάσσιο ή χημικά επιβαρυνόμενο περιβάλλον.

3.2.3. Σκυρόδεμα με μειωμένο ποσοστό κλίνκερ και χρήση συμπληρωματικών τσιμεντοειδών (Supplementary Cementitious Materials – SCM)

Μια βασική στρατηγική μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των τσιμεντοειδών υλικών είναι η μερική αντικατάσταση του κλίνκερ με συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά, όπως η ιπτάμενη τέφρα, οι σκωρίες υψικαμίνου (πυριτικά και αργιλοπυριτικά άλατα ασβεστίου και άλλων βάσεων που προκύπτουν κατά την παραγωγή χυτοσιδήρου), οι φυσικές ποζολάνες (φυσικά πετρώματα ή ηφαιστειακά υλικά που όταν αλεστούν και αναμιχθούν με ασβέστη ή τσιμέντο παρουσία νερού, αντιδρούν χημικά και συμβάλλουν στη δημιουργία ανθεκτικού τσιμεντοειδούς υλικού) και άλλα ορυκτά πρόσθετα. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα ελκυστική, διότι μειώνει το ποσοστό της πλέον επιβαρυντικής φάσης παραγωγής, ενώ παράλληλα αξιοποιεί υλικά που προέρχονται από βιομηχανικά παραπροϊόντα ή φυσικούς δευτερογενείς πόρους.

Από τεχνική άποψη, τα συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά δεν λειτουργούν αποκλειστικά ως «αραιωτικά» του τσιμέντου αλλά σε πολλές περιπτώσεις συμβάλλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της μικροδομής του, στη μείωση της διαπερατότητας και στην αύξηση της ανθεκτικότητας του σε επιθετικά περιβάλλοντα. Για έργα ύδρευσης και ιδιαίτερα στην αποχέτευση, αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, επειδή τα δομικά στοιχεία εκτίθενται συστηματικά σε υγρασία, σε κύκλους διαβροχής-ξήρανσης, σε θειικά, σε διαλυμένα άλατα και σε περιβάλλοντα που μπορούν να επιταχύνουν τη φθορά.

Η πραγματική επίδοση των τσιμεντοειδών υλικών εξαρτάται από τη χημική φύση του πρόσθετου, το ποσοστό υποκατάστασης, το λόγο νερού προς τσιμεντοειδές υλικό, τις

συνθήκες ωρίμανσης και τη συμβατότητα με τις απαιτήσεις του έργου. Για παράδειγμα, υψηλά ποσοστά αντικατάστασης μπορεί να επηρεάσουν τον ρυθμό ανάπτυξης πρώιμων αντοχών, κάτι που μπορεί να έχει σημασία σε έργα με σφιχτά χρονοδιαγράμματα ή σε προκατασκευασμένα στοιχεία. Επομένως, τα τσιμεντοειδή ωφελούν τόσο στην αρχική φάση κατασκευής όσο και στον κύκλο ζωής δεδομένης της ορθής χρήσης τους.

3.2.4. Γεωπολυμερή και αλκαλικά ενεργοποιημένα τσιμεντοειδή υλικά

Πέρα από το σκυρόδεμα μειωμένου κλίνκερ, τα γεωπολυμερικά και γενικότερα τα αλκαλικά ενεργοποιημένα υλικά αποτελούν μία πιο ριζική προσέγγιση προς τη μείωση των εκπομπών. Τα υλικά αυτά βασίζονται σε διαφορετικό μηχανισμό πήξης και σκλήρυνσης σε σχέση με το κλασικό τσιμέντο Portland και υπό προϋποθέσεις, εμφανίζουν αισθητά μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα. Η θεωρητική τους αξία είναι υψηλή, καθώς δεν περιορίζονται απλώς στη βελτίωση του συμβατικού τσιμέντου, αλλά βασίζονται σε διαφορετικό μηχανισμό σύνδεσης και σκλήρυνσης του υλικού.

Σε εφαρμογές έργων ύδρευσης και αποχέτευσης, τα γεωπολυμερικά υλικά παρουσιάζουν ενδιαφέρον κυρίως για προκατασκευασμένα στοιχεία, μικρότερες δομές και ειδικές εφαρμογές όπου οι συνθήκες παραγωγής μπορούν να ελεγχθούν καλύτερα. Η εργοστασιακή προετοιμασία, η δυνατότητα ποιοτικού ελέγχου και η τυποποίηση βοηθούν στην αξιοποίηση αυτών των υλικών περισσότερο απ' ό,τι οι μεγάλες επιτόπιες σκυροδετήσεις. Παρά τα πλεονεκτήματα, η χρήση τους στην καθημερινή τεχνική πρακτική παραμένει περιορισμένη καθώς υπάρχουν ακόμη ζητήματα τυποποίησης, διαθεσιμότητας πρώτων υλών, κόστους, μακροχρόνιας τεκμηρίωσης και θεσμικής αποδοχής.

3.3. Μεταλλικά Δομικά Στοιχεία και Αντιδιαβρωτική Προστασία

3.3.1. Εφαρμογές και κυκλικότητα χάλυβα και χυτοσίδηρου

Ο χάλυβας και ο χυτοσίδηρος εξακολουθούν να παίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλά δομικά και βοηθητικά στοιχεία των έργων νερού. Χρησιμοποιούνται σε μεταλλικές σκάλες, πλατφόρμες, κιγκλιδώματα, βάσεις εξοπλισμού, καλύμματα, πλαίσια, αγκυρώσεις, φορείς μικρών ανοιγμάτων και σε ειδικές περιπτώσεις σε δομικές συνδέσεις που απαιτούν μεγάλη μηχανική αξιοπιστία. Η τεχνολογική ωριμότητα, η δυνατότητα τυποποίησης και η καλή γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς καθιστούν τα υλικά αυτά ιδιαίτερα χρήσιμα σε τεχνικές εφαρμογές όπου η ακρίβεια, η αντοχή και η ευκολία συναρμολόγησης είναι

κρίσιμες. Η ορθή επιλογή τους εξαρτάται από τη χρήση που καλούνται να εξυπηρετήσουν και από το περιβάλλον έκθεσης.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μεταλλικών υλικών είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης ανακυκλωμένου περιεχομένου και η επαναχρησιμοποίηση/ανακύκλωση τους στην παραγωγική αλυσίδα, μετά το τέλος ζωής. Ο χάλυβας, ειδικότερα, μπορεί να παραχθεί σε μεγάλο βαθμό από ανακυκλωμένο σκραπ, ενώ οι τεχνολογίες τήξης και χύτευσης εκ νέου είναι πλέον διαδεδομένες. Στα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης, όπου ο σχεδιασμός έχει συχνά ορίζοντα δεκαετιών, η δυνατότητα ανάκτησης του υλικού μετά την παύση λειτουργίας αποτελεί ουσιαστικό στοιχείο βιωσιμότητας καθώς βελτιώνει τόσο το οικονομικό όσο και το περιβαλλοντικό ισοζύγιο της επιλογής.

3.3.2. Ενεργειακό και περιβαλλοντικό κόστος παραγωγής

Εάν ένα στοιχείο απαιτεί περισσότερο άνθρακα κατά την παραγωγή του, αλλά διαθέτει πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και σαφώς χαμηλότερες ανάγκες συντήρησης, τότε η συνολική του επίδοση σε επίπεδο κύκλου ζωής μπορεί να αποδειχθεί θετικότερη από εναλλακτικές λύσεις με χαμηλότερο αρχικό αποτύπωμα αλλά μικρότερη ανθεκτικότητα.

Για τον λόγο αυτό, σε μια ώριμη τεχνική αξιολόγηση δεν αρκεί να λαμβάνεται ότι η πρωτογενής παραγωγή μετάλλων είναι ενεργοβόρα με σημαντικό αποτύπωμα. Πρέπει να εξετάζεται πού χρησιμοποιείται, για πόσο χρόνο, υπό ποιες συνθήκες και με ποιο σύστημα προστασίας. Μόνο έτσι προκύπτει μια πραγματική αξιολόγηση βιωσιμότητας και όχι μια απλοποιημένη περιβαλλοντική κατάταξη.

3.3.3. Αντιδιαβρωτική προστασία ως παράγοντας βιωσιμότητας

Η αντιδιαβρωτική προστασία είναι καθοριστική για τη βιωσιμότητα των μεταλλικών στοιχείων σε έργα νερού. Σε υγρό περιβάλλον, σε παράκτιες ζώνες, σε ατμόσφαιρα πλούσια σε χημικούς ρύπους ή σε περιοχές με παρουσία διαβρωτικών αερίων από λύματα, η έλλειψη επαρκούς προστασίας μπορεί να μειώσει δραστικά τη διάρκεια ζωής ενός στοιχείου. Αντίθετα, η σωστή επιλογή επιστρώσεων, γαλβανισμού, ανοξειδωτων κραμάτων ή ακόμη και συστημάτων καθοδικής προστασίας, όπου δύναται να εφαρμοστεί, μπορεί να μετατρέψει ένα ευάλωτο στοιχείο σε εξαιρετικά ανθεκτική τεχνική λύση.

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση οφείλει να λαμβάνει υπόψη ότι μια προστατευτική στρώση, αν και ενσωματώνει επιπλέον υλικό και κόστος, μπορεί να μειώσει δραστικά τη συχνότητα

επεμβάσεων, αποκαταστάσεων και αντικαταστάσεων. Επομένως, η ορθά επιλεγμένη προστασία αποτελεί μέσο μείωσης του κόστους κύκλου ζωής και του περιβαλλοντικού φορτίου.

3.4. Πολυμερή και Σύνθετα Υλικά σε Δομικά/Βοηθητικά Στοιχεία

3.4.1. Προκατασκευασμένα στοιχεία από πολυμερή υλικά

Τα πολυμερή υλικά, ιδίως το πολυαιθυλένιο και άλλα θερμοπλαστικά, χρησιμοποιούνται ολοένα συχνότερα σε φρεάτια και μικρούς θαλάμους δικτύων, ιδιαίτερα στην αποχέτευση. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η υψηλή στεγανότητα και η ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά φρεάτια σκυροδέματος, όπου οι αρμοί και οι αστοχίες σύνδεσης μπορούν να οδηγήσουν σε εισροές ή εκροές, τα πολυμερή φρεάτια προσφέρουν μεγαλύτερη στεγανότητα, εφόσον η τοποθέτηση και συγκόλληση με το δίκτυο γίνεται ορθά.

Παράλληλα, το χαμηλό βάρος τους διευκολύνει τη μεταφορά και την τοποθέτηση, περιορίζει την ανάγκη βαρέων ανυψωτικών μέσων και επιταχύνει τις εργασίες στο εργοτάξιο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμων, λιγότερο χρόνο εκσκαφών και ταχύτερη αποκατάσταση οδοστρωμάτων, άρα και σε βελτίωση του συνολικού περιβαλλοντικού προφίλ του έργου.



Εικόνα 3.1-3.2 : Προκατασκευασμένα φρεάτια επίσκεψης από πολυαιθυλένιο

3.4.2. Καλύμματα, σχάρες και ειδικά βοηθητικά στοιχεία από σύνθετα υλικά

Στα έργα νερού, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, τα καλύμματα φρεατίων και οι σχάρες αποτελούν χαρακτηριστικό πεδίο εφαρμογής σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα αυτά προϊόντα εμφανίζουν πλεονεκτήματα όπως αντοχή στη διάβρωση, χαμηλό βάρος, ευκολία χειρισμού και μείωσης της αξίας σκραπ, κάτι που περιορίζει τον κίνδυνο κλοπής. Η λειτουργική σημασία αυτού του τελευταίου στοιχείου είναι μεγαλύτερη απ' όσο φαίνεται, διότι η απώλεια καλυμμάτων πέραν από το κόστος αντικατάστασης, συνεπάγεται κινδύνους για την ασφάλεια πολιτών και οχημάτων.

Η βιωσιμότητα των σύνθετων καλυμμάτων, ωστόσο, δεν μπορεί να κρίνεται μόνο από το χαμηλότερο βάρος τους. Απαιτείται συμμόρφωση με τις προβλεπόμενες κλάσεις φορτίου ανάλογα με την χρήση του, κατάλληλη συμπεριφορά σε θερμικές μεταβολές και εξασφάλιση ότι οι μηχανικές τους ιδιότητες παραμένουν επαρκείς καθ' όλη τη διάρκεια ζωής.

Σε δεξαμενές και αντλιοστάσια, τα σύνθετα και πολυμερή υλικά μπορούν να αξιοποιηθούν σε επενδύσεις, συστήματα πρόσβασης, ελαφρές βοηθητικές κατασκευές και καλύψεις. Η χρήση τους εστιάζεται σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία και αυξημένο κίνδυνο διάβρωσης, όπου οι παραδοσιακές μεταλλικές λύσεις απαιτούν συστηματική συντήρηση. Το πραγματικό όφελος των πολυμερών και σύνθετων υλικών σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ότι μετακινούν το βάρος της τεχνικής λύσης από τη συχνή συντήρηση στη μακροχρόνια αντοχή. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι είναι πάντοτε ανώτερα από άλλα υλικά, αλλά ότι υπό ορισμένες συνθήκες μπορούν να προσφέρουν καλύτερη συνολική επίδοση σε κύκλο ζωής.

3.4.3. Κυκλικότητα πολυμερών/σύνθετων και θέματα τέλους ζωής

Η ανάλυση για τη βιωσιμότητα των πολυμερών και σύνθετων υλικών δεν μπορεί να αγνοήσει το τέλος ζωής τους. Σε σύγκριση με τα μέταλλα, τα υλικά αυτά μπορούν να ανακυκλωθούν σε ικανοποιητικό βαθμό, εφόσον υπάρχει κατάλληλη αλυσίδα συλλογής και διαλογής. Στην περίπτωση σύνθετων υλικών που περιλαμβάνουν πολλαπλές στρώσεις ή ενισχύσεις, η διαδικασία ανακύκλωσης εμφανίζει μεγαλύτερες δυσκολίες.

Επομένως, η βιωσιμότητα των υλικών αυτών πρέπει να εξετάζεται ισορροπώντας από τη μία πλευρά το χαμηλό βάρος, την αντοχή στη διάβρωση και τις μικρές ανάγκες συντήρησης και από την άλλη το περίπλοκο περιβαλλοντικό αποτύπωμα στο τέλος ζωής. Η όποια τεχνική επιλογή πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τις δύο παραμέτρους.

3.5. Υλικά Στεγανοποίησης, Επενδύσεις Δομικών Στοιχείων

3.5.1. Μεμβράνες και γεωμεμβράνες πολυαιθυλενίου για στεγανοποίηση

Οι μεμβράνες και γεωμεμβράνες πολυαιθυλενίου αποτελούν βασική κατηγορία υλικών στεγανοποίησης σε δεξαμενές (water stop) , λεκάνες, ταμιευτήρες και άλλα στοιχεία έργων νερού. Η χρήση τους δικαιολογείται από την πολύ χαμηλή διαπερατότητα, την αντοχή σε υγρασία και τη δυνατότητα δημιουργίας συνεχούς στεγανού φράγματος. Σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν αποτελεσματική εναλλακτική ή συμπληρωματική λύση προς τα τσιμεντοειδή στεγανωτικά συστήματα.

Σε εφαρμογές ύδρευσης, το κρίσιμο ζήτημα είναι η συμβατότητα με πόσιμο νερό. Δεν αρκεί η μεμβράνη να είναι στεγανή, απαιτείται να είναι κατάλληλη από άποψη υγιονομικής ασφάλειας και να μη δημιουργεί κινδύνους εκλύσεων ή αλλοίωσης της ποιότητας του νερού. Επιπλέον, οι λεπτομέρειες εφαρμογής όπως οι αρμοί, οι αγκυρώσεις, οι διελεύσεις σωλήνων, αλλαγές στην γεωμετρία και η προστασία από μηχανικές βλάβες καθορίζουν στην πράξη την επιτυχία ή αποτυχία της λύσης.

3.5.2. Επενδύσεις και προστατευτικά συστήματα στην αποχέτευση

Στις υποδομές αποχέτευσης, οι επενδύσεις και τα προστατευτικά συστήματα χρησιμοποιούνται για να θωρακίσουν δομικά στοιχεία, κυρίως σκυρόδεμα, απέναντι σε χημική και βιολογική προσβολή. Η χρήση επιστρώσεων και ειδικών συστημάτων εσωτερικής και εξωτερικής επένδυσης είναι εξαιρετικά σημαντική από πλευράς βιωσιμότητας, διότι προστατεύει το βασικό δομικό σώμα και παρατείνει τη διάρκεια ζωής του έργου.



Εικόνα 3.3: Εφαρμογή μεμβράνης πολυαιθυλενίου (αυγουλιέρα)

Η βιωσιμότητα τέτοιων συστημάτων δεν έγκειται μόνο στο υλικό, αλλά πρέπει να γίνεται με βάση τον πραγματικό μηχανισμό φθοράς. Η χημική προσβολή, η διάβρωση, η υγρασία, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, οι μηχανικές κρούσεις και οι ανάγκες καθαρισμού είναι παράμετροι που δεν πρέπει να παραβλέπονται.

3.5.3. Στεγανοποιητικά κονιάματα, επιστρώσεις και υλικά αρμών

Τα στεγανοποιητικά κονιάματα, οι επιστρώσεις και τα υλικά αρμών αποτελούν κρίσιμες αλλά συχνά υποτιμημένες συνιστώσες της μακροχρόνιας επίδοσης ενός έργου. Ένας ακατάλληλος αρμός ή ένα σφραγιστικό χαμηλής αντοχής μπορεί να αποτελέσει το πρώτο σημείο αστοχίας ενός φρεατίου ή μιας δεξαμενής. Αντίστοιχα, μια σωστά επιλεγμένη και εφαρμοσμένη λύση αρμολόγησης μπορεί να μειώσει δραστικά τον κίνδυνο διαρροών, διηθήσεων και τοπικών αποκολλήσεων.

Στα έργα ύδρευσης απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην καταλληλότητα για επαφή με νερό, ενώ στα έργα αποχέτευσης η χημική συμβατότητα είναι καθοριστική. Οι μηχανικές απαιτήσεις, η παραμορφωσιμότητα, η ανθεκτικότητα σε κύκλους θερμοκρασίας και η δυνατότητα συντήρησης αποτελούν πρόσθετα κριτήρια επιλογής.

3.6. Υλικά Έδρασης, Εγκιβωτισμού και Επίχωσης Δικτύων

3.6.1. Ο ρόλος των υλικών έδρασης και εγκιβωτισμού

Τα υλικά έδρασης, εγκιβωτισμού και επίχωσης επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά των δικτύων και των συνοδών στοιχείων. Ειδικά για εύκαμπτα συστήματα, η συνεργασία του στοιχείου με το έδαφος είναι βασικός μηχανισμός φέρουσας λειτουργίας. Κακή ποιότητα υλικού, ακατάλληλη κοκκομετρία ή με επαρκής συμπίκνωση μπορεί να οδηγήσουν σε καθιζήσεις, τοπικές παραμορφώσεις, διαρροές σε συνδέσεις ή επιβάρυνση των ίδιων των δομικών στοιχείων. Συνεπώς, η βιωσιμότητα ενός έργου δεν εξαρτάται μόνο από τα ορατά υλικά, αλλά και από τις υποκείμενες υποστηρικτικές αφανείς στρώσεις.

3.6.2. Ανακυκλωμένα αδρανή από ΑΕΚΚ

Η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών από απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) συμβάλει σημαντικά στην κυκλική οικονομία στα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης. Τα υλικά αυτά μπορούν, υπό προϋποθέσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις

συμπύκνωσης, να χρησιμοποιηθούν σε στρώσεις εγκιβωτισμού και επίχωσης, μειώνοντας την ανάγκη εξόρυξης φυσικών αδρανών και ταυτόχρονα περιορίζοντας τον όγκο αποβλήτων που οδηγείται σε διάθεση.

Η αξιοποίησή τους, ωστόσο, δεν μπορεί να βασίζεται μόνο στη διαθεσιμότητα ή στο χαμηλότερο κόστος. Απαιτείται τεχνικός έλεγχος της κοκκομετρίας, της καθαρότητας, της μηχανικής συμπεριφοράς και της συμβατότητας με τα στοιχεία του δικτύου. Εάν αυτά δεν ελεγχθούν, τότε το αρχικό περιβαλλοντικό όφελος μπορεί να αναιρεθεί από μελλοντικές αστοχίες ή ανάγκη επεμβάσεων. Για τον λόγο αυτό, τα υλικά αυτά πρέπει να εισάγονται στο έργο μόνο μέσω σαφών τεχνικών προδιαγραφών και ελέγχου ποιότητας, ώστε η κυκλικότητα να μη λειτουργεί εις βάρος της αξιοπιστίας και να μπορούν να αποτελέσουν πραγματικά βιώσιμη λύση.

3.6.3. Περιβαλλοντικό όφελος, μείωση αποβλήτων και μεταφορών

Η περιβαλλοντική αξία των ανακυκλωμένων υλικών επίχωσης έγκειται όχι μόνο στην αποφυγή εξόρυξης φυσικών πόρων, αλλά και στη μείωση αποβλήτων και μεταφορών. Όταν τα υλικά προέρχονται από τοπικές ή περιφερειακές ροές επεξεργασμένων ΑΕΚΚ, μειώνεται η ανάγκη για μεταφορές μεγάλων αποστάσεων, κάτι που βελτιώνει σημαντικά το ανθρακικό αποτύπωμα. Επιπλέον, η διαχείριση των αποβλήτων εκσκαφής και η επανένταξη των υλικών στην κατασκευαστική αλυσίδα συνδέεται άμεσα με τη λογική των βιώσιμων υποδομών, όπου η τοπική αξιοποίηση υλικών, η μείωση μεταφορών και η αποφυγή διάθεσης αποβλήτων αποτελούν ουσιώδη κριτήρια.

3.7. Σύνοψη-Κριτήρια επιλογής δομικών υλικών για έργα νερού

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι τα δομικά και βοηθητικά υλικά των έργων ύδρευσης και αποχέτευσης πρέπει να αξιολογούνται με ολοκληρωμένο και πολυκριτηριακό τρόπο. Δεν υπάρχει ένα μοναδικό υλικό που να υπερέχει σε όλες τις διαστάσεις. Αντίθετα, κάθε επιλογή αποτελεί συνδυασμό μεταξύ τεχνικής επάρκειας, περιβαλλοντικής επίδοσης, κυκλικότητας, απαιτήσεων συντήρησης και κόστους κύκλου ζωής.

Για τα τσιμεντοειδή υλικά, η κεντρική πρόκληση είναι η μείωση του αποτυπώματος που σχετίζεται με το κλίνκερ, χωρίς να θυσιάζεται η ανθεκτικότητα. Για τα μεταλλικά στοιχεία, το ζητούμενο είναι η ορθή αξιοποίηση της υψηλής μηχανικής αξιοπιστίας και της

ανακυκλωσιμότητας, σε συνδυασμό με αποτελεσματική αντιδιαβρωτική προστασία. Για τα πολυμερή και σύνθετα υλικά, η έμφαση μετατίθεται στη στεγανότητα, στην αντοχή στη διάβρωση και στις χαμηλές ανάγκες συντήρησης. Για τα υλικά στεγανοποίησης και προστασίας, κρίσιμη είναι η αντίληψη ότι αποτελούν ουσιώδες τμήμα του συστήματος και όχι συμπληρωματική λεπτομέρεια. Τέλος, για τα υλικά έδρασης και επίχωσης, η κυκλικότητα είναι επιθυμητή μόνο όταν συνδυάζεται με καλύψη των τεχνικών προδιαγραφών.

Συνοψίζοντας, τα βασικά κριτήρια επιλογής δομικών υλικών για έργα νερού μπορούν να περιοριστούν α) στο χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα, β) στην αυξημένη διάρκεια ζωής, γ) στην στεγανότητα και γενικότερα στην ανθεκτικότητα σε υγρό και διαβρωτικό περιβάλλον, δ) στην καταλληλότητα για νερό ανά περίπτωση, ε) στην δυνατότητα ανακύκλωσης ή αξιοποίησης δευτερογενών πόρων, στ) στην τεχνική συμβατότητα με τη λειτουργία του έργου και το ευνοϊκό ισοζύγιο κύκλου ζωής.

4. Βιώσιμα υλικά σωληνώσεων Ύδρευσης

4.1. Εισαγωγή

Η επιλογή των υλικών σωληνώσεων στα δίκτυα ύδρευσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη συνολική απόδοση, αξιοπιστία και βιωσιμότητα των υποδομών παροχής πόσιμου νερού. Σε αντίθεση με άλλα τεχνικά έργα, στα οποία το υλικό αξιολογείται κυρίως με βάση τη μηχανική του συμπεριφορά ή το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης, στους αγωγούς ύδρευσης η τεχνική καταλληλότητα συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του παρεχόμενου νερού, τη δημόσια υγεία και παράλληλα με τη μακροχρόνια στεγανότητα του δικτύου και τη διατήρηση χαμηλών απωλειών. Συνεπώς, η έννοια του «βιώσιμου υλικού» δεν αφορά μόνο ένα υλικό με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά την παραγωγή, αλλά ένα υλικό που διατηρεί τη συμπεριφορά του στον χρόνο, που περιορίζει τον κίνδυνο διαρροών, που ελαχιστοποιεί τις ανάγκες συντήρησης και που δεν επηρεάζει δυσμενώς τα φυσικοχημικά ή μικροβιολογικά χαρακτηριστικά του πόσιμου νερού. Επιπλέον, η βιωσιμότητα των αγωγών ύδρευσης πρέπει να εξετάζεται σε άμεση συνάρτηση με την κατανάλωση ενέργειας για άντληση και μεταφορά του νερού, με το φαινόμενο των απωλειών που συνεπάγεται μείωση των υδατικών πόρων και με το αυξημένο λειτουργικό κόστος.

Με βάση τα παραπάνω, το παρόν κεφάλαιο εστιάζει αρχικά στα παραδοσιακά υλικά ύδρευσης και στα βασικά προβλήματα που αποτέλεσαν την αφορμή για την μετάβαση σε νεότερες και περισσότερο βιώσιμες λύσεις. Στη συνέχεια εξετάζονται τα σύγχρονα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως στα δίκτυα πόσιμου νερού, όπως το HDPE, ο όλκιμος χυτοσίδηρος και σε ειδικές περιπτώσεις, τα σύνθετα υλικά. Τέλος, επιχειρείται συγκριτική αξιολόγηση των βασικών κατηγοριών ως προς τη διάρκεια ζωής, τη συντήρηση, την ενεργειακή επίδοση, το ανθρακικό αποτύπωμα και τη συμβατότητά τους με τις απαιτήσεις δημόσιας υγείας.

4.2. Παραδοσιακά Υλικά Ύδρευσης και Προκλήσεις

Η ιστορική εξέλιξη των δικτύων ύδρευσης είναι στενά συνδεδεμένη με την εξέλιξη των διαθέσιμων υλικών σωληνώσεων και των τεχνολογικών δυνατοτήτων κάθε εποχής. Στις αρχές του αιώνα κατά την ανάπτυξη των αστικών και περιαστικών υποδομών χρησιμοποιήθηκαν υλικά όπως ο γαλβανισμένος χάλυβας, ο χυτοσίδηρος με επιστρώσεις

από μόλυβδο ή αμιάντο και αργότερα τις δεκαετίες 1960-1970 άρχισε η χρήση των πλαστικών σωλήνων, κυρίως από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Τα υλικά αυτά υπηρέτησαν ουσιαστικά την επέκταση των δικτύων ύδρευσης για πολλές δεκαετίες, καθώς ανταποκρίνονταν στις τεχνικές απαιτήσεις και στο κανονιστικό πλαίσιο της εποχής τους. Ωστόσο, η σύγχρονη αξιολόγηση των δικτύων παροχής πόσιμου νερού δείχνει ότι πολλά από αυτά τα υλικά παρουσιάζουν πλέον σημαντικούς περιορισμούς, τόσο από πλευράς ανθεκτικότητας όσο και από πλευράς υγειονομικής καταλληλότητας και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Ένα βασικό πρόβλημα των παραδοσιακών υλικών είναι ότι η απόδοσή τους στον χρόνο, επηρεάζεται τόσο από τη θεωρητική τους αντοχή, όσο και από τη συμπεριφορά τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στα δίκτυα ύδρευσης, οι σωλήνες βρίσκονται για δεκαετίες θαμμένοι στο έδαφος, εκτίθενται σε εναλλαγές πίεσης, σε φορτία από κυκλοφορία, σε καθιζήσεις, σε χημικές επιδράσεις από το έδαφος και σε φαινόμενα γήρανσης ή διάβρωσης. Αυτό στην πράξη, σημαίνει ότι ένα υλικό που θεωρητικά είναι κατάλληλο κατά τον χρόνο τοποθέτησης του μπορεί μετά από πολλά έτη να αποτελεί πηγή βλαβών, αυξημένων απωλειών και κινδύνων για την ποιότητα του νερού.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση των μολύβδινων σωληνώσεων ή εξαρτημάτων σύνδεσης, που χρησιμοποιήθηκαν σε παλαιότερα δίκτυα και ιδίως σε εσωτερικές εγκαταστάσεις ή μικρές συνδέσεις. Αν και ο μόλυβδος παρουσίαζε πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευκολία διαμόρφωσης και την ικανοποιητική αρχική αντοχή σε ορισμένες συνθήκες, σήμερα πλέον θεωρείται προβληματικό υλικό λόγω της άμεσης σύνδεσής του με τη δημόσια υγεία. Η πιθανότητα παρουσίας μολύβδου ή αμιάντου στο πόσιμο νερό, ιδιαίτερα σε παλαιωμένα δίκτυα, τα καθιστά πλέον μη αποδεκτά και πρέπει να αντικαθίσταται σταδιακά με κατάλληλα υλικά.

Οι γαλβανισμένοι χαλύβδινοι σωλήνες αποτελούν μια άλλη χαρακτηριστική κατηγορία παραδοσιακού υλικού που χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα στο παρελθόν. Το αρχικό τους πλεονέκτημα ήταν η μηχανική αντοχή και η σχετικά καλή συμπεριφορά κατά την τοποθέτηση. Ωστόσο, η εμπειρία από την μακροχρόνια λειτουργία τους έδειξε ότι η διάβρωση αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα. Με την πάροδο του χρόνου, η προστατευτική επίστρωση ψευδαργύρου φθείρεται, ενώ η εσωτερική διάβρωση μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία αποθέσεων και στη μείωση της ενεργού διατομής και κατά συνέπεια στην αύξηση των απωλειών πίεσης. Παράλληλα, η όποια διάβρωση ενδέχεται να επηρεάσει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού, προκαλώντας θολότητα, μεταβολές χρώματος ή

μεταλλική γεύση. Επομένως, οι γαλβανισμένοι σωλήνες, μολονότι ιστορικά υπήρξαν σημαντικό υλικό των δικτύων, σήμερα δύσκολα μπορούν να θεωρηθούν βιώσιμη επιλογή για νέα έργα ύδρευσης.

Ο χυτοσίδηρος αποτέλεσε επίσης βασικό υλικό των παραδοσιακών δικτύων, ιδίως σε κύριους αγωγούς και αστικά δίκτυα διανομής. Τα δίκτυα από χυτοσίδηρο, διακρίνονταν για τη μηχανική τους αντοχή, την κάλυψη μεγάλων διαμέτρων και τη μακρά διάρκεια ζωής υπό κατάλληλες συνθήκες. Ωστόσο, οι παλαιότεροι σωλήνες από χυτοσίδηρο, παρουσίαζαν σημαντική ευπάθεια σε εξωτερική και εσωτερική διάβρωση, ιδιαίτερα σε εδάφη υψηλής υγρασίας ή σε δίκτυα με ελλιπή προστασία. Με την πάροδο του χρόνου, η διάβρωση του υλικού οδηγεί σε αυξημένες βλάβες, ρωγμές, θραύσεις, εσωτερικές επικαθίσεις και επηρεάζει αισθητά την λειτουργική ικανότητα των αγωγών. Η εμπειρία αυτή συνέβαλε στην κατανόηση της αναγκαιότητας των προστατευτικών επενδύσεων στους αγωγούς από χυτοσίδηρο και στη βελτίωση της πρώτης ύλης.

Οι πρώτες γενιές πλαστικών σωλήνων, κυρίως PVC, αποτέλεσαν σημαντικό στάδιο στην εξέλιξη των δικτύων ύδρευσης, επειδή έδωσαν λύσεις σε ορισμένα από τα προβλήματα των μεταλλικών αγωγών, κυρίως ως προς τη διάβρωση και το βάρος. Η χρήση τους επέτρεψε ευκολότερη μεταφορά, τοποθέτηση και μειωμένη ευπάθεια σε ορισμένους χημικούς μηχανισμούς φθοράς. Παρ' όλα αυτά, οι παλαιότερες γενιές πλαστικών σωλήνων δεν είχαν πάντοτε τα μηχανικά χαρακτηριστικά, τη σταθερότητα πρώτης ύλης και την ωριμότητα τυποποίησης που διαθέτουν τα σύγχρονα υλικά. Παρουσιάστηκαν ζητήματα που σχετίζονταν με τις συνθήκες αποθήκευσης τους, τη γήρανση, τη συμπεριφορά υπό υψηλή πίεση, την αντοχή σε κρουστικά φορτία ή τη συμπεριφορά των συνδέσεων.

Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός των παραδοσιακών υλικών είναι ότι πολλά από αυτά σχεδιάστηκαν σε εποχές κατά τις οποίες η έννοια της βιωσιμότητας δεν αποτελούσε ακόμη βασικό κριτήριο τεχνικού σχεδιασμού. Η αξιολόγηση γινόταν κυρίως με όρους αντοχής, διαθεσιμότητας και κόστους εγκατάστασης, χωρίς συστηματική συνεκτίμηση του ανθρακικού αποτυπώματος, της δυνατότητας ανακύκλωσης, του ενεργειακού κόστους λειτουργίας ή της συντήρησης του δικτύου.

Σήμερα, όμως, η ανάγκη περιορισμού των απωλειών, της συχνότητας βλαβών και της κατανάλωσης ενέργειας μετατρέπει τη μακροχρόνια αξιοπιστία σε ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια αξιολόγησης και επιλογής. Ένα υλικό που διαβρώνεται ή απαιτεί

συχνές τοπικές παρεμβάσεις δεν είναι μόνο τεχνικά ξεπερασμένο, αλλά και περιβαλλοντικά και οικονομικά μη αποδεκτό.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η βασική πρόκληση στα παραδοσιακά υλικά ύδρευσης είναι η αδυναμία τους να ανταποκριθούν ολοκληρωμένα στις σύγχρονες απαιτήσεις δικτύων πόσιμου νερού. Η ύδρευση σήμερα απαιτεί αγωγούς με υψηλή μηχανική αξιοπιστία, στεγανότητα, αντοχή στη γήρανση, ελάχιστη επίδραση στην ποιότητα του νερού, καλύτερη συμπεριφορά στις συνδέσεις και χαμηλότερο συνολικό κόστος λειτουργίας. Για παράδειγμα, η μεγάλη μηχανική αντοχή ενός μεταλλικού αγωγού χάνει μέρος της σημασίας της, εάν το υλικό υποβαθμίζεται από τη διάβρωση ή επιβαρύνει τη συντήρηση. Αντίστοιχα, το μικρό βάρος ενός πλαστικού αγωγού δεν αρκεί, εάν δεν συνοδεύεται από μακροχρόνια σταθερότητα και ασφαλή συμπεριφορά υπό πίεση.

Αυτό σημαίνει ότι η τεχνική υπεροχή ενός υλικού δεν μπορεί να αξιολογηθεί αποσπασματικά. Για να δούμε όμως πώς ανταποκρίνονται οι σύγχρονες τεχνολογίες σε αυτές τις προκλήσεις, σε επόμενες ενότητες θα εξεταστούν οι σημερινές βιώσιμες επιλογές σωληνώσεων.

4.3. Σύγχρονες Βιώσιμες Επιλογές για Αγωγούς Ύδρευσης

Η σύγχρονη τεχνολογία σωληνώσεων ύδρευσης έχει μετατοπιστεί από τη λογική της απλής αντικατάστασης των παλαιών υλικών προς μια περισσότερο σύνθετη και απαιτητική προσέγγιση, στην οποία η επιλογή του κατάλληλου υλικού συνδέεται με τεχνικά, υγειονομικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια. Στο πλαίσιο αυτό, οι αγωγοί ύδρευσης δεν αξιολογούνται πλέον μόνο ως στοιχεία μεταφοράς νερού υπό πίεση, αλλά ως τμήματα ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποδομής, το οποίο πρέπει να εμφανίζει όχι μόνο μηχανική αντοχή, αλλά και βελτιωμένη συμπεριφορά έναντι της διάβρωσης, καλύτερη στεγανότητα στις συνδέσεις, μικρότερη πιθανότητα βλαβών και, όπου είναι δυνατόν, αυξημένη δυνατότητα ανακύκλωσης ή μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα μεταφοράς και εγκατάστασης. Η έννοια της βιωσιμότητας, επομένως, δεν περιορίζεται στην περιβαλλοντική διάσταση του υλικού, αλλά επεκτείνεται στην ικανότητά του να παραμένει λειτουργικά σταθερό για πολλές δεκαετίες, χωρίς να επιβαρύνει τη συντήρηση ή την ασφάλεια του δικτύου.

Σήμερα, μεταξύ των υλικών που αναγνωρίζονται ως οι κυριότερες βιώσιμες επιλογές για τα δίκτυα πόσιμου νερού περιλαμβάνονται κυρίως το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας

(HDPE), ο όλκιμος χυτοσίδηρος και σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, τα σύνθετα υλικά όπως οι σωλήνες υαλοενισχυμένου πολυμερούς (GRP).

4.3.1. Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)

Το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, παράγωγο του πετρελαίου, αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα υλικά για δίκτυα ύδρευσης, κυρίως λόγω του συνδυασμού ευκαμψίας, χημικής αδράνειας, χαμηλού βάρους και δυνατότητας δημιουργίας εξαιρετικά αξιόπιστων συνδέσεων. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μεταλλικά υλικά, το HDPE δεν υπόκειται σε ηλεκτροχημική διάβρωση από το έδαφος ή από το μεταφερόμενο νερό, γεγονός που μειώνει σημαντικά έναν από τους βασικότερους μηχανισμούς γήρανσης των αγωγών. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει καθοριστική σημασία για τη βιωσιμότητα, επειδή περιορίζει την ανάγκη για σύνθετα συστήματα αντιδιαβρωτικής προστασίας και μειώνει τον κίνδυνο πρόωρης υποβάθμισης του αγωγού.

Παρόλα αυτά χρειάζεται να σημειωθεί ότι στα αρχικά στάδια της παραγωγικής διαδικασίας των σωλήνων HDPE, στην Ελλάδα, υπήρχε ανομοιομορφία στα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης με αποτέλεσμα αγωγοί που έχουν τοποθετηθεί και πλέον λειτουργούν 10-15 έτη, παρουσιάζουν συχνά αστοχία.



Εικόνα 4.1-4.2: Σωληνώσεις HDPE σε ευθύγραμμη μήκη και ρολά

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του HDPE είναι ο τρόπος σύνδεσης των σωλήνων. Οι συγκολλητές συνδέσεις, είτε με μετωπική συγκόλληση είτε με ηλεκτροσυγκόλληση, επιτρέπουν τη δημιουργία ενός σχεδόν μονολιθικού δικτύου, στο οποίο οι ενώσεις, υπό την προϋπόθεση ότι η εγκατάσταση πραγματοποιείται ορθά και με επαρκή ποιοτικό έλεγχο, δεν αποτελούν αδύναμα σημεία με την έννοια που ισχύει σε άλλα

συστήματα. Από άποψη λειτουργικής βιωσιμότητας, το στοιχείο αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, διότι μεγάλο μέρος των απωλειών στα δίκτυα ύδρευσης συνδέεται άμεσα με αστοχίες ενώσεων και εξαρτημάτων.

Παράλληλα, το χαμηλό βάρος του HDPE αποτελεί πλεονέκτημα τόσο στην κατασκευή όσο και στην περιβαλλοντική επίδοση του έργου. Η μεταφορά είναι απλούστερη, οι ανάγκες ανυψωτικού εξοπλισμού μικρότερες και οι εργοταξιακές εργασίες εκτελούνται ταχύτερα, ειδικά στις μικρότερες διατομές όπου οι σωληνώσεις παράγονται σε ρολά. Η μείωση των μεταφορών και της χρήσης μηχανικού εξοπλισμού δεν μεταφράζεται μόνο σε μειωμένο άμεσο κόστος, αλλά και σε περιορισμό του ενεργειακού αποτυπώματος της φάσης εγκατάστασης. Σε εκτεταμένα δίκτυα ή σε απομακρυσμένες περιοχές, το πλεονέκτημα αυτό γίνεται ακόμη πιο έντονο.

Η ευκαμψία του υλικού αποτελεί προτέρημα καθώς μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα από πιο άκαμπτα υλικά σε καθιζήσεις, εδαφικές μετακινήσεις και δυναμικές επιβαρύνσεις, χωρίς να αναπτύσσει με την ίδια ευκολία τοπικές ρωγμές ή θραύσεις. Ιδίως σε σεισμογενείς περιοχές ή σε εδάφη με αβεβαιότητα ως προς τη συμπεριφορά τους, η ελαστικότητα αυτή μπορεί να λειτουργήσει προστατευτικά για το ίδιο το δίκτυο. Ωστόσο, η συμπεριφορά του HDPE εξαρτάται από την ποιότητα παραγωγής, τη σωστή αποθήκευση πριν από την εγκατάσταση και την ορθότητα των συγκολλήσεων και τις διακυμάνσεις στην πίεση λειτουργίας, καθώς αυτές επηρεάζουν τη γήρανση του υλικού και κατ' επέκταση τον κύκλο ζωής του.



Εικόνα 4.3: Διαδικασία μετωπικής συγκόλλησης ευθύγραμμων τμημάτων HDPE

Από υγειονομική άποψη, το HDPE θεωρείται κατάλληλο για πόσιμο νερό όταν πληροί τις σχετικές προδιαγραφές και πιστοποιήσεις. Η χημική αδράνεια και η περιορισμένη αλληλεπίδραση με το μεταφερόμενο νερό καθιστούν το HDPE μια ιδιαίτερα ελκυστική

λύση από άποψη ποιότητας νερού, υπό την προϋπόθεση πάντοτε ότι το προϊόν είναι κατάλληλο για χρήση σε πόσιμο νερό. Τα τελευταία χρόνια έχει εδραιωθεί το χρώμα των αγωγών να είναι χρώματος μπλε γιατί έτσι η νοθεία της πρώτης ύλης και κατ' επέκταση η καταλληλότητα του για πόσιμο νερό δεν επηρεάζεται.

Επομένως, το HDPE συγκεντρώνει αρκετά χαρακτηριστικά που δικαιολογούν την χρήση του ως μια από τις πλέον ώριμες σύγχρονες βιώσιμες επιλογές για αγωγούς ύδρευσης.

4.3.2. Όλκιμος χυτοσίδηρος (Ductile Iron)

Ο όλκιμος χυτοσίδηρος παραμένει ένα από τα πιο αξιόπιστα υλικά για κύριους και τροφοδοτικούς αγωγούς ύδρευσης, ιδιαίτερα σε έργα με απαιτήσεις για μηχανική αντοχή, σταθερότητα της διατομής και υψηλές πιέσεις λειτουργίας. Σε αντίθεση με τον παλαιό φαιό χυτοσίδηρο, ο όλκιμος χυτοσίδηρος εμφανίζει βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά, μεγαλύτερη ολκιμότητα και σαφώς καλύτερη ανθεκτικότητα σε μηχανικά φορτία και καταπονήσεις. Η χρήση του σε βασικά τμήματα των δικτύων δικαιολογείται από το γεγονός ότι μπορεί να προσφέρει μακροχρόνια και προβλέψιμη λειτουργία, ιδίως σε περιπτώσεις όπου οι αγωγοί υπόκεινται σε μεγάλα φορτία κυκλοφορίας, σε σημαντικές πιέσεις λειτουργίας ή σε συνθήκες όπου η γεωμετρική ακαμψία του υλικού θεωρείται πλεονέκτημα.

Η βιωσιμότητα του όλκιμου χυτοσιδήρου δεν πρέπει να εξετάζεται αποκλειστικά υπό το πρίσμα του αρχικού ανθρακικού αποτυπώματος, το οποίο μπορεί να είναι αυξημένο σε σχέση με ορισμένα πολυμερή υλικά. Αντίθετα το υλικό αυτό μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη επιλογή γιατί συνδέεται με μεγάλη προσδοκώμενη διάρκεια ζωής, υψηλή αξιοπιστία και σχετικά χαμηλή συχνότητα σοβαρών αστοχιών όταν έχει εγκατασταθεί σωστά και όταν προστατεύεται επαρκώς από διάβρωση. Προκύπτει έτσι κατανομή του αρχικού περιβαλλοντικού και οικονομικού κόστους σε πολύ μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα.



Εικόνα 4.4: Σωλήνες Όλκιμου Χυτοσιδήρου

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του όλκιμου χυτοσιδήρου είναι ότι εξασφαλίζει τη διατήρηση της διατομής και της μηχανικής ασφάλειας σε εφαρμογές μεγάλων διαμέτρων και υψηλής πίεσης, συνθήκες που σε άλλα υλικά απαιτούν την αύξηση του πάχους τοιχώματος του αγωγού. Παράλληλα υπάρχει μακρά τεχνική εμπειρία, καθιερωμένες προδιαγραφές και σαφή γνώση των συνθηκών συμπεριφοράς του συγκεκριμένου υλικού.

Η κρίσιμη παράμετρος, ωστόσο, για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας του όλκιμου χυτοσιδήρου είναι η αντιδιαβρωτική του προστασία. Στα σύγχρονα συστήματα σωληνώσεων, οι σωλήνες αυτοί δεν εγκαθίστανται ως «γυμνό» μεταλλικό προϊόν, αλλά συνοδεύονται από εσωτερικές και εξωτερικές επενδύσεις. Η εσωτερική επένδυση με τσιμεντοκονία προστατεύει από την αλληλεπίδραση με το νερό και από εσωτερική διάβρωση, ενώ οι εξωτερικές προστατευτικές στρώσεις, όπως ψευδάργυρος, και πολυμερικές επιστρώσεις, συμβάλλουν ουσιαστικά στην αντοχή έναντι εδαφικής διάβρωσης και μαγνητικού πεδίου.

Τέλος, ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του όλκιμου χυτοσιδήρου είναι η δυνατότητα που μας παρέχει για ανακύκλωση καθώς ως μεταλλικό υλικό μπορεί να επανενταχθεί στην παραγωγική αλυσίδα μετά το τέλος της ζωής του, κάτι που όμως δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα λόγω του εμπλεκόμενου κόστους της αφαίρεσης του. Αυτό δεν αναιρεί το γεγονός ότι η αρχική παραγωγή παραμένει ενεργοβόρα, αλλά επιτρέπει να αντιμετωπιστεί το υλικό με όρους επαναχρησιμοποίησης πόρων και όχι μόνο με όρους πρωτογενούς κατανάλωσης. Η βιωσιμότητά λοιπόν του όλκιμου χυτοσιδήρου προκύπτει από τη συνδυασμένη επίδοση σε μακροβιότητα, μηχανική αξιοπιστία, δυνατότητα ανακύκλωσης και μειωμένη ανάγκη συχνών επεμβάσεων (RSL min 100 χρόνια, Saint-Gobain PAM.EPD.NATURAL.DN150.2022).

Ωστόσο, λόγω της ακαμψίας του υλικού, οι αλλαγές όδευσης και η ανάγκη επέμβασης απαιτούν ειδικά τεμάχια και εξαρτήματα, γεγονός που επηρεάζει το κόστος CAPEX ανά περίπτωση.

4.3.3. Σύνθετα υλικά και αγωγοί GRP

Οι αγωγοί από σύνθετα υλικά, και ιδίως οι σωλήνες υαλοενισχυμένου πολυμερούς (Glass Reinforced Plastic/Polymer – GRP), αποτελούν μια πιο εξειδικευμένη αλλά εξίσου ενδιαφέρουσα επιλογή για έργα ύδρευσης, κυρίως σε μεγάλης κλίμακας/διατομής εφαρμογές, σε έργα μεταφοράς νερού ή σε συνθήκες όπου η διάβρωση και το βάρος αποκτούν ιδιαίτερη σημασία. Αν και τα GRP συστήματα δεν είναι τόσο διαδεδομένα στα συμβατικά αστικά δίκτυα διανομής όσο το HDPE ή ο όλκιμος χυτοσίδηρος, διαθέτουν ιδιότητες που τα καθιστούν ελκυστικά για συγκεκριμένες κατηγορίες έργων.

Το βασικό πλεονέκτημα των GRP σωλήνων είναι ο συνδυασμός χαμηλού βάρους και υψηλής μηχανικής αντοχής. Σε μεγάλες διαμέτρους, το βάρος ενός παραδοσιακού μεταλλικού ή άλλου άκαμπτου συστήματος μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές εργοταξιακές και μεταφορικές επιβαρύνσεις. Αντίθετα, τα σύνθετα υλικά προσφέρουν ευκολότερη μεταφορά και εγκατάσταση, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τόσο το κόστος όσο και το αντίστοιχο περιβαλλοντικό φορτίο της κατασκευής. Παράλληλα, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση, κάτι που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά σε εδάφη με υγρασία ή την ύπαρξη επιθετικών παραγόντων.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των GRP αγωγών είναι η λεία εσωτερική επιφάνεια, η οποία μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση χαμηλών απωλειών φορτίου. Σε συστήματα μεταφοράς νερού μεγάλου μήκους ή μεγάλων παροχών, η μειωμένη υδραυλική αντίσταση μπορεί να μεταφραστεί σε εξοικονόμηση της ενέργειας άντλησης και συνεπώς σε βελτιωμένη λειτουργική βιωσιμότητα.

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος της διάρκειας ζωής τους είναι η σωστή τοποθέτηση, καθώς κάθε επέμβαση κοπής ή ανεπαρκής χειρισμός μπορεί να δημιουργήσει σημεία ευαισθησίας που επηρεάζουν τη μακροχρόνια συμπεριφορά τους. Παράλληλα και στα GRP συστήματα οι αλλαγές όδευσης απαιτούν ειδικά τεμάχια, γεγονός που αυξάνει το κόστος και απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό.

Η εφαρμογή του GRP σε δίκτυα ύδρευσης, απαιτεί τεχνική τεκμηρίωση, σαφή γνώση της συμπεριφοράς των συνδέσεων, κατάλληλη διαστασιολόγηση και συμβατότητα με τις πραγματικές συνθήκες πίεσης και φορτίσεων.

Από άποψη κυκλικότητας, τα σύνθετα υλικά δεν διαθέτουν πάντα την ίδια δυνατότητα ανακύκλωσης όπως τα μεταλλικά. Επομένως, η βιωσιμότητά τους είναι περισσότερο αποτέλεσμα εξειδικευμένης τεχνικής εφαρμογής σε συγκεκριμένα έργα παρά γενικευμένης χρήσης.

4.3.4. Νέες τεχνολογίες και αυτο-επουλωτικές επιστρώσεις

Σήμερα ενδιαφέρον παρουσιάζουν και νέες τεχνολογίες που αποσκοπούν όχι τόσο στην αντικατάσταση του βασικού υλικού του αγωγού, όσο στη βελτίωση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των εσωτερικών ή εξωτερικών στρώσεων προστασίας. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι λεγόμενες αυτο-επουλωτικές επιστρώσεις, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να περιορίζουν την επέκταση ρωγμών ή να ενεργοποιούν μηχανισμούς τοπικής «ίασης» της βλάβης/αστοχίας.

Πολλές αστοχίες δεν ξεκινούν από το κύριο σώμα του σωλήνα, αλλά από επιφανειακές βλάβες σε προστατευτικές επενδύσεις, από τοπικές ατέλειες στις επιστρώσεις ή από ρωγμές που εξελίσσονται σταδιακά σε αστοχίες. Εάν η προστατευτική στρώση μπορεί να επιδιορθωθεί σε πρώιμο στάδιο, τότε είναι θεωρητικά δυνατό να παρατείνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου και να περιορίζεται η ανάγκη για συχνές επεμβάσεις. Χρειάζεται, όμως προσοχή γιατί οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται σε σημαντικό βαθμό στο πεδίο της έρευνας, της πιλοτικής εφαρμογής ή της εξειδικευμένης χρήσης και δεν μπορούν ακόμη να παρουσιαστούν ως πλήρως εφαρμοζόμενη λύση για τα δίκτυα πόσιμου νερού.

4.4. Αποτίμηση των σύγχρονων βιώσιμων επιλογών και πλαίσιο σύγκρισης

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω προκύπτει ότι η βιωσιμότητα στους αγωγούς ύδρευσης δεν είναι ιδιότητα που αποδίδεται αυτόματα σε μία μόνο κατηγορία υλικού. Το HDPE αναδεικνύεται ως ιδιαίτερα ισχυρή επιλογή σε δίκτυα όπου η στεγανότητα, η ευκαμψία, το χαμηλό βάρος και η αντοχή στη διάβρωση αποτελούν κύρια ζητούμενα. Ο όλκιμος χυτοσίδηρος παραμένει κατάλληλη επιλογή για απαιτητικούς κύριους αγωγούς, ιδίως όπου η μηχανική αντοχή, η ακαμψία και η πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής αποτελούν βασικές

προτεραιότητες. Το GRP υλικό, τέλος, προσφέρει μια πιο εξειδικευμένη αλλά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα επιλογή για μεγάλης κλίμακας ή ειδικά έργα, ιδίως όταν το χαμηλό βάρος και η χημική ανθεκτικότητα παίζουν σημαντικό ρόλο.

Επομένως, στόχος δεν είναι απαραίτητα η αναζήτηση νέων υλικών ή ο προσδιορισμός του καλύτερου υλικού, ανεξάρτητα από το πλαίσιο εφαρμογής, αλλά να αναγνωριστεί ότι κάθε υλικό γίνεται βιώσιμη επιλογή υπό συγκεκριμένες τεχνικές, λειτουργικές και υγειονομικές συνθήκες.

Στα δίκτυα ύδρευσης, η έννοια της βέλτιστης λύσης είναι κατ' ανάγκη πολυπαραμετρική, καθώς εξαρτάται από τη διάμετρο του αγωγού, το επίπεδο πίεσης, τις απαιτήσεις στεγανότητας, τη διάρκεια ζωής που τίθεται ως στόχος, το έδαφος, τον τρόπο σύνδεσης, την επίδραση στην ποιότητα του νερού και τέλος από το σύνολο των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων σε ορίζοντα κύκλου ζωής. Για τον λόγο αυτό, μια ώριμη τεχνική εφαρμογή δεν αναζητά απλώς το υλικό με τη μικρότερη αρχική επιβάρυνση, αλλά το υλικό που παρουσιάζει την ευνοϊκότερη ισορροπία μεταξύ παραγωγής, εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης και τέλους ζωής.

Από μεθοδολογική άποψη, η σύγκριση των υλικών σωληνώσεων απαιτεί κοινή προσέγγιση. Δεν αρκεί να συγκρίνεται απλώς ένα μέτρο (m) σωλήνα HDPE με ένα μέτρο (m) σωλήνα όλκιμου χυτοσίδηρου ή ένα μέτρο (m) σωλήνα PVC, εάν τα υλικά αυτά δεν εξυπηρετούν ακριβώς την ίδια λειτουργία, δεν έχουν το ίδιο επίπεδο πίεσης, την ίδια εσωτερική διάμετρο ή την ίδια αναμενόμενη διάρκεια ζωής. Οι αναλύσεις LCA δείχνουν ότι η διάμετρος, το απαιτούμενο πάχος τοιχώματος και η διάρκεια λειτουργίας επηρεάζουν καθοριστικά το τελικό αποτέλεσμα και μπορούν να ανατρέψουν μια φαινομενικά απλή περιβαλλοντική κατάταξη. Στα δίκτυα πόσιμου νερού σημαντικός παράγοντας επίσης είναι η συμμόρφωση με την Οδηγία (ΕΕ) 2020/2184.

4.4.1. Περιβαλλοντική επίδοση και ανθρακικό αποτύπωμα

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των υλικών σωληνώσεων δείχνει ότι δεν υπάρχει μία καθολική ιεράρχηση που να ισχύει για όλες τις διαμέτρους και όλες τις χρήσεις. Μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής για έξι συνηθισμένους τύπους σωλήνων νερού και λυμάτων (PVC, όλκιμο χυτοσίδηρο, άοπλο σκυρόδεμα, HDPE, χυτοσίδηρο, ενισχυμένο σκυρόδεμα) έδειξε ότι για διαμέτρους $\leq 60.9\text{cm}$, ο όλκιμος χυτοσίδηρος παρουσίαζε το μεγαλύτερο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (LCA-GWP), ενώ για διαμέτρους $\geq 76.2\text{cm}$ ο σωλήνας PVC

παρήγαγε το μεγαλύτερο GWP ανά km σωλήνα. Η φαινομενική αυτή «αντιστροφή» εξηγείται από το γεγονός ότι στα πλαστικά υλικά το απαιτούμενο πάχος τοιχώματος αυξάνει δραστικά σε μεγάλες διαμέτρους, με αποτέλεσμα να αυξάνεται αισθητά και το ενσωματωμένο περιβαλλοντικό φορτίο. Άρα, η διάμετρος δεν αποτελεί απλώς γεωμετρική παράμετρο, αλλά βασικό καθοριστικό παράγοντα της περιβαλλοντικής επίδοσης του υλικού. (Fei Du, et al.,2013)

Η ίδια μελέτη προσδιορίζει επίσης ότι, όταν εξετάζεται μόνο η φάση παραγωγής, μεταφοράς και εγκατάστασης, το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού GWP οφείλεται στην ίδια την παραγωγή του σωλήνα. Συγκεκριμένα η παραγωγική φάση αντιπροσωπεύει περίπου το 92–99% του συνολικού GWP για το εύρος των υλικών που εξετάστηκαν, γεγονός που εξηγεί γιατί η σύγκριση μεταξύ υλικών είναι τόσο ευαίσθητη στο είδος της πρώτης ύλης και στις απαιτήσεις πάχους. Παράλληλα, η μελέτη καταλήγει ότι οι υποθέσεις για μεταφορά και εγκατάσταση επηρεάζουν πολύ λιγότερο τα αποτελέσματα από ό,τι η ίδια η επιλογή του υλικού και της διαμέτρου. Αυτό αποτελεί χρήσιμο συμπέρασμα για τη παρούσα εργασία, επειδή αναδεικνύει ότι η κύρια περιβαλλοντική διαφοροποίηση προκύπτει από το υλικό του αγωγού και όχι τόσο από δευτερεύοντες εργοταξιακούς παράγοντες (Fei Du, et al.,2013).

Επιπλέον, η μελέτη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για το PVC και τα βασικά ανταγωνιστικά του υλικά, κυρίως το HDPE και το χυτοσίδηρο, επιβεβαιώνει ότι τα αποτελέσματα σύγκρισης των LCA δεν είναι μονοσήμαντα. Στο τμήμα που αφορά συστήματα πόσιμου νερού και αποχέτευσης, η μελέτη αναφέρει ότι η απαιτούμενη ενέργεια παραγωγής ήταν υψηλότερη για σωλήνες HDPE, ακολουθούμενη από PVC και στη συνέχεια από χυτοσίδηρο, ενώ ως προς το δυναμικό υπερθέρμανσης το υψηλότερο GWP εμφανιζόταν στους σωλήνες από χυτοσίδηρο, ακολουθούμενους από HDPE και PVC. Η ίδια μελέτη, όμως, δείχνει ότι άλλα περιβαλλοντικά μεγέθη, όπως οξίνιση και ευτροφισμός, μπορεί να μεταβάλλουν τη συνολική εικόνα. Επομένως μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση δεν πρέπει να εξαντλείται σε έναν μόνο δείκτη, αλλά να εξετάζει περισσότερες από μία κατηγορίες επιπτώσεων αποφεύγοντας εύκολα συμπεράσματα και αποκλεισμό υλικών (European Commission, 2015).

Τέλος, λόγω των απαιτήσεων που έχουν τεθεί μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας για την εποχή των μηδενικών καθαρών εκπομπών (European Green Deal) και τα milestones που χρειάζεται να επιτευχθούν μέχρι το 2030, η μετάβαση της βιομηχανίας σωληνώσεων όλκιμου χυτοσιδήρου σε διαδικασίες χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος αποτελεί

πλέον ευρωπαϊκή τάση (https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_en?utm_source=chatgpt.com).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Saint-Gobain PAM στη Γαλλία, η οποία υλοποιεί πρόγραμμα σταδιακής απανθρακοποίησης της παραγωγής μέσω αντικατάστασης συμβατικών καμίνων και υψικαμίνων από ηλεκτρικούς κλιβάνους. Στο εργοστάσιο της Foug εφαρμόζεται ήδη το έργο VULCAIN, με πλήρη μετάβαση σε ηλεκτρική τήξη μετάλλου, ενώ στο Pont-à-Mousson λειτουργεί από το 2022 ο ηλεκτρικός κλίβανος THOR για τη συμπληρωματική παραγωγή μετάλλου. Παράλληλα, προωθείται το έργο ORION, το οποίο προβλέπει την αντικατάσταση των υψικαμίνων από ηλεκτρικό κλίβανο (Electric Arc Furnace – EAF) με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και ανακυκλωμένου scrap μετάλλου. Σύμφωνα με την εταιρεία, ο συνδυασμός των έργων THOR, VULCAIN και ORION στοχεύει σε μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των προϊόντων όλκιμου χυτοσιδήρου έως και κατά 80% έως το 2028, ενισχύοντας παράλληλα την κυκλική οικονομία μέσω αυξημένης αξιοποίησης ανακυκλωμένων υλικών και μείωσης κατανάλωσης νερού και ορυκτών καυσίμων (<https://www.pamline.com/csr/corporate-social-responsibility/decarbonising-our-production>).

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι το HDPE και οι λοιποί πολυμερείς αγωγοί εμφανίζουν συχνά ευνοϊκό περιβαλλοντικό προφίλ σε μικρές και μεσαίες διαμέτρους, κυρίως λόγω του χαμηλότερου βάρους τους και της απουσίας διάβρωσης, ενώ ο όλκιμος χυτοσίδηρος διατηρεί πλεονέκτημα σε εφαρμογές μεγάλης μηχανικής απαίτησης και μπορεί να ανακτήσει μέρος της αρχικής του επιβάρυνσης λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής και της υψηλής ανακυκλωσιμότητας. Τα σύνθετα υλικά GRP, από την άλλη, πρέπει να εξετάζονται σε ειδικές εφαρμογές, διότι το περιβαλλοντικό τους προφίλ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του έργου, τη διάμετρο, τον τρόπο παραγωγής και την επιδιωκόμενη λειτουργική διάρκεια.

4.4.2. Ενεργειακό κόστος λειτουργίας και υδραυλική απόδοση

Όπως προαναφέρθηκε η περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση των αγωγών ύδρευσης δεν μπορεί να περιορίζεται στη φάση παραγωγής και εγκατάστασης. Στα δίκτυα ύδρευσης, η φάση λειτουργίας έχει συχνά καθοριστική σημασία, καθώς συνδέεται με την ενέργεια που απαιτείται λόγω των υδραυλικών απωλειών και για την εξασφάλιση της απαιτούμενης πίεσης και παροχής. Η βιβλιογραφία τονίζει ότι, ακόμη και όταν αγνοούνται η στατική

ανύψωση και οι απαιτήσεις τελικής πίεσης, η ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών τριβής είναι συγκρίσιμη με την ενέργεια παραγωγής του ίδιου του σωλήνα και ανά περίπτωση μπορεί να υπερβαίνει και το περιβαλλοντικό φορτίο της παραγωγής, μεταφοράς και εγκατάστασης, γεγονός που επηρεάζει την διαδικασία σύγκρισης των υλικών (Fei Du, et al.,2013).

Η λεία εσωτερική επιφάνεια των πολυμερών και σύνθετων υλικών μειώνει συνήθως την υδραυλική τραχύτητα και άρα τις απώλειες πίεσης, χωρίς βέβαια το πραγματικό λειτουργικό αποτέλεσμα να εξαρτάται μόνο από την τραχύτητα. Εξαρτάται και από την πραγματική εσωτερική διάμετρο (nominal diameter/ internal diameter), η οποία επηρεάζεται από το πάχος τοιχώματος, καθώς και από τον ρυθμό γήρανσης ή επικαθίσεων στο εσωτερικό του σωλήνα. Η άποψη λοιπόν ότι οι πλαστικοί σωλήνες είναι ενεργειακά πιο αποδοτικοί δεν είναι απόλυτη, καθώς σε συγκεκριμένες διαμέτρους και πιέσεις, η διαφορά εσωτερικής διατομής μπορεί να επηρεάσει την απαιτούμενη ενέργεια άντλησης περισσότερο από την ίδια την τραχύτητα του υλικού (Piratla, et al.,2016).

Παρόλα αυτά, η γενική τάση σήμερα παραμένει ότι τα υλικά με λείες εσωτερικές επιφάνειες, μικρή ευπάθεια σε επικαθίσεις και μειωμένη πιθανότητα διαρροών μπορούν να προσφέρουν σημαντικό όφελος σε λειτουργικό επίπεδο. Η βιωσιμότητα λοιπόν, ενός υλικού ύδρευσης δεν αναφέρεται μόνο στην παραγωγή CO₂ ανά τόνο υλικού, αλλά και στη συμβολή του στη μακροχρόνια υδραυλική αποδοτικότητα του δικτύου. Ειδικότερα σχετίζεται με τη μείωση των διαρροών και των απωλειών φορτίου, τη μείωση της ενέργειας άντλησης και του λειτουργικού κόστους (Fei Du, et al.,2013).

4.4.3. Διάρκεια ζωής, συντήρηση και συμπεριφορά σε βάθος χρόνου

Ένα ακόμη καθοριστικό κριτήριο στη σύγκριση των υλικών σωληνώσεων είναι η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής και ο τρόπος με τον οποίο αυτή επηρεάζει το συνολικό κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Υλικά με αυξημένο αρχικό περιβαλλοντικό φορτίο μπορεί να αποδειχθούν τελικά ευνοϊκότερα εάν η διάρκεια λειτουργικής ζωής τους είναι πολύ μεγαλύτερη και εάν η ανάγκη επεμβάσεων είναι περιορισμένη. Ισχύει όμως και το αντίστροφο, δηλαδή, ένα υλικό με φαινομενικά χαμηλή αρχική επιβάρυνση μπορεί να αποδειχθεί λιγότερο βιώσιμο εάν εμφανίζει συχνές διαρροές, μειωμένη αντοχή στις συνδέσεις ή μεγαλύτερη ευπάθεια σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Στην περίπτωση του όλκιμου χυτοσιδήρου, οι διαθέσιμες EPD και τεχνικές πηγές της βιομηχανίας δίνουν πολύ μεγάλη προβλεπόμενη διάρκεια λειτουργικής ζωής, η οποία σε σύγχρονες εφαρμογές μπορεί να τοποθετείται στην τάξη του ενός αιώνα ή και περισσότερο, ιδίως όταν υπάρχει σωστή προστασία έναντι εδαφικής και εσωτερικής διάβρωσης. Στο HDPE, επίσης, τεχνικές οδηγίες του κλάδου αναφέρονται σε μεγάλη διάρκεια σχεδιασμού υπό κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Το σημαντικό, όμως, δεν είναι να συγκριθούν αφηρημένα δύο αριθμοί διάρκειας ζωής, αλλά να εξεταστεί πώς επιτυγχάνονται αυτές οι διάρκειες στην πράξη συνεκτιμώντας την ποιοτική εγκατάσταση, την σωστή συνδεσμολογία, την κατάλληλη πίεση λειτουργίας και σωστή τοποθέτηση και προστασία (<https://dipra.org>).

Εξίσου σημαντική είναι η διάσταση της συντήρησης. Οι μεταλλικοί αγωγοί απαιτούν προσοχή ως προς τη διάβρωση και την εφαρμογή προστατευτικών στρώσεων, ενώ τα πολυμερή δίκτυα εξαρτώνται ιδιαίτερα από την ποιότητα των συγκολλήσεων και τη σωστή συμπεριφορά υπό μακροχρόνια φόρτιση. Τα σύνθετα υλικά (GRP), προσφέρουν επίσης σημαντική αντοχή στη διάβρωση αλλά προϋποθέτουν σωστή μελέτη και εγκατάσταση.

Συνεπώς, το κριτήριο που σχετίζεται με την συντήρηση, δεν αποδίδεται αυτόματα σε κάποιο υλικό, αλλά εξαρτάται από το αν το υλικό χρησιμοποιείται στο κατάλληλο πλαίσιο λειτουργίας και με την κατάλληλη τεχνολογική υποστήριξη (<https://www.environdec.com/library/epd22536>).

4.5. Συνολική αποτίμηση και συμπέρασμα της συγκριτικής αξιολόγησης

Συνολικά, η συγκριτική αξιολόγηση των υλικών σωληνώσεων ύδρευσης οδηγεί σε ένα σαφές αλλά μη απλουστευμένο συμπέρασμα καθώς δεν υπάρχει ένα υλικό που να υπερέχει ανεξαιρέτως σε όλα τα έργα και σε όλες τις διαμέτρους. Το HDPE αναδεικνύεται ως ιδιαίτερα ισχυρή επιλογή όπου η ευκαμψία, η στεγανότητα των συγκολλητών συνδέσεων, η αντοχή στη διάβρωση και το χαμηλό βάρος είναι κρίσιμα πλεονεκτήματα. Ο όλκιμος χυτοσίδηρος παραμένει ιδιαίτερα σημαντικός για κύριους αγωγούς και για έργα αυξημένης μηχανικής απαίτησης, ιδίως όταν η μακροβιότητα, η ακαμψία και η υψηλή αξιοπιστία του δικτύου προτάσσονται ως κύρια κριτήρια. Τα σύνθετα υλικά, όπως οι GRP αγωγοί, διευρύνουν το πεδίο επιλογών σε ειδικές ή μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, ιδίως όταν η διάβρωση και το βάρος παίζουν σημαντικό ρόλο (Fei Du, et al.,2013).

Το σημαντικότερο, ωστόσο, συμπέρασμα είναι ότι η βιωσιμότητα στα υλικά σωληνώσεων ύδρευσης δεν πρέπει να αποδίδεται χωρίς εμβάθυνση, αλλά να τεκμηριώνεται μέσω πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Η διάμετρος, το επίπεδο πίεσης, η υδραυλική συμπεριφορά, η ποιότητα του νερού, οι απαιτήσεις δημόσιας υγείας, η συχνότητα συντήρησης, η διάρκεια ζωής και η δυνατότητα ανακύκλωσης πρέπει να αξιολογούνται από κοινού. Έτσι η επιλογή υλικού παύει να είναι απλή κατασκευαστική απόφαση και μετατρέπεται σε τεκμηριωμένη στρατηγική βιώσιμης διαχείρισης των υποδομών ύδρευσης. Με αυτή τη θεώρηση, το βιώσιμο υλικό ύδρευσης είναι εκείνο που ανταποκρίνεται καλύτερα στο συγκεκριμένο τεχνικό και λειτουργικό πλαίσιο, με τη μικρότερη δυνατή επιβάρυνση σε κύκλο ζωής και χωρίς συμβιβασμούς ως προς την ασφάλεια του πόσιμου νερού.

5. Βιώσιμα Υλικά Σωληνώσεων Αποχέτευσης

5.1. Εισαγωγή

Τα δίκτυα αποχέτευσης αποτελούν κατηγορία υποδομών με τεχνικές απαιτήσεις, διαφορετικές από εκείνες των δικτύων ύδρευσης, καθώς λειτουργούν βαρυτικά (ελεύθερη ροή), μεταφέρουν λύματα με αυξημένο οργανικό φορτίο, αναπτύσσουν συνθήκες ευνοϊκές για παραγωγή υδρόθειου και διάβρωση και συχνά περιλαμβάνουν μεγάλες διαμέτρους, βαθιές τοποθετήσεις και δυσμενείς συνθήκες πρόσβασης και συντήρησης. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή του υλικού στην αποχέτευση δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στη μηχανική αντοχή ή στο αρχικό κόστος προμήθειας, αλλά είναι εξαρτώμενη από την ανθεκτικότητα, τη μακροχρόνια στεγανότητα, τη συμπεριφορά των αρμών, τη συμβατότητα με το έδαφος έδρασης και το συνολικό κόστος κύκλου ζωής.

Σε αντίθεση με τα δίκτυα πόσιμου νερού, όπου το κρίσιμο ερώτημα είναι κατά πόσο το υλικό επηρεάζει τη δημόσια υγεία και την ποιότητα του μεταφερόμενου νερού, στην αποχέτευση το κεντρικό ζήτημα είναι η διατήρηση της δομικής και λειτουργικής ακεραιότητας του αγωγού σε διαβρωτικές συνθήκες λειτουργίας. Τα αστικά λύματα, τα βιομηχανικά απόβλητα, η παραγωγή αερίων, οι διακυμάνσεις ροής, οι εισροές και διηθήσεις υπόγειων υδάτων, οι ιζηματώσεις και η αλληλεπίδραση με το έδαφος συνιστούν ένα πολυπαραγοντικό περιβάλλον φθοράς. Επομένως, ο όρος «βιώσιμο υλικό αποχέτευσης» αναφέρεται σε υλικό που εξασφαλίζει μεγάλη διάρκεια λειτουργικής ζωής, περιορισμένο κίνδυνο αστοχίας, χαμηλές ανάγκες συντήρησης και κατά το δυνατόν, ευνοϊκό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Με βάση τα παραπάνω, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα παραδοσιακά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αγωγούς βαρύτητας και σε τμήματα αποχέτευσης υπο πίεση (καταθλιπτικοί λυμάτων), με έμφαση στις ιδιότητές τους και στους κυριότερους μηχανισμούς φθοράς. Στη συνέχεια αναλύονται τα προηγμένα πλαστικά και σύνθετα υλικά που κυριαρχούν στα σύγχρονα έργα ή διεκδικούν ολοένα μεγαλύτερο ρόλο, όπως το PP, το HDPE, οι σωλήνες δομημένου τοιχώματος και οι GRP αγωγοί. Τέλος, εξετάζονται οι τεχνολογίες αναβάθμισης και επισκευής υφιστάμενων δικτύων, όπως οι trenchless μέθοδοι και η χρήση πλαστικών φρεατίων και σύγχρονων εξαρτημάτων.

5.2. Υλικά βαρυτικών και υπό πίεση αγωγών αποχέτευσης

Οι αγωγοί αποχέτευσης διακρίνονται λειτουργικά σε δίκτυα βαρύτητας και υπό πίεση, όπως οι καταθλιπτικοί αγωγοί αντλιοστασίων λυμάτων. Η διάκριση αυτή έχει άμεση σημασία για την επιλογή υλικού, επειδή στα δίκτυα βαρύτητας η έμφαση δίνεται συνήθως στη στεγανότητα των αρμών, στη διατήρηση της γεωμετρίας, στην αντίσταση στη χημική και βιολογική προσβολή και στη συμπεριφορά έναντι εναποθέσεων. Αντίθετα, στους καταθλιπτικούς αγωγούς, η έμφαση δίνεται στην αντοχή σε εσωτερική πίεση και σε μεταβολές αυτής και στη μηχανική σταθερότητα του σωλήνα.

Το σκυρόδεμα και το οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα σε αγωγούς μεγάλων διαμέτρων και σε κεντρικούς συλλεκτήριους, κυρίως λόγω της υψηλής ακαμψίας τους και της ικανότητας παραλαβής μεγάλων εξωτερικών φορτίων. Η ακαμψία αυτή εξακολουθεί να αποτελεί πλεονέκτημα σε βαθιές τοποθετήσεις και σε αστικές υποδομές όπου οι φορτίσεις από το έδαφος και από την κυκλοφορία είναι σημαντικές. Ωστόσο, το σκυρόδεμα στην αποχέτευση αντιμετωπίζει ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα ανθεκτικότητας λόγω της ανάπτυξης υδρόθειου και σχηματισμού θειικού οξέος από τα λύματα. Η φθορά αυτή οδηγεί σε αποσάθρωση, απώλεια διατομής και ανάγκη προστατευτικών επεμβάσεων ή αντικατάστασης.

Πέρα από τη χημική προσβολή, τα δίκτυα βαρύτητας σκυροδέματος, αντιμετωπίζουν συχνά και προβλήματα στους αρμούς, ιδιαίτερα σε παλαιότερες κατασκευές. Η αστοχία ενός αρμού μπορεί να επιτρέψει εισροές υπόγειων υδάτων, θαλάσσιου ύδατος ή διαρροές λυμάτων, επιβαρύνοντας τόσο τη λειτουργία του δικτύου όσο και τη μονάδα επεξεργασίας. Σε περιοχές με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα, η αύξηση του I/I (infiltration and inflow) μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υπερφόρτιση όλου του συστήματος.

Οι κεραμικοί (vitrified clay) σωλήνες αποτέλεσαν ιστορικά σημαντική λύση για βαρυτικά δίκτυα αποχέτευσης, κυρίως λόγω της πολύ καλής χημικής τους αντοχής. Πρόκειται για υλικό το οποίο επιδεικνύει ιδιαίτερη αδράνεια έναντι πολλών επιθετικών συστατικών των λυμάτων, γεγονός που εξηγεί την οριζόντια χρήση του σε παλαιότερα αστικά δίκτυα. Ωστόσο, οι πήλινοι σωλήνες έχουν μεγάλο βάρος και είναι περισσότερο εύθραυστοι από τα σύγχρονα πολυμερή υλικά. Οι βλάβες τους σχετίζονται συχνά όχι με χημική υποβάθμιση του κεραμικού υλικού, αλλά με ρωγμές, καθιζήσεις, τοπικά φορτία και προβλήματα στους αρμούς. Άρα, παρότι είναι χημικά ανθεκτικοί, δεν θεωρούνται η πλέον λειτουργικά βιώσιμη λύση για σύγχρονα έργα.

Ο χυτοσίδηρος και ο χάλυβας χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε καταθλιπτικούς αγωγούς αποχέτευσης, όπου οι απαιτήσεις εσωτερικής πίεσης και μηχανικής αντοχής είναι μεγαλύτερες. Η χρήση τους σε καταθλιπτικά τμήματα προσφέρει υψηλή λειτουργική ασφάλεια, όμως συνοδεύεται από έντονη ανάγκη αντιδιαβρωτικής προστασίας. Σε περιβάλλον λυμάτων, οι μεταλλικοί αγωγοί κινδυνεύουν τόσο από εξωτερική διάβρωση λόγω εδάφους όσο και από εσωτερική προσβολή, εάν τα προστατευτικά τους στρώματα αστοχήσουν. Γι' αυτόν τον λόγο, η βιωσιμότητα των μεταλλικών αγωγών αποχέτευσης εξαρτάται από το αν διαθέτει κατάλληλη εσωτερική/εξωτερική επένδυση.

Το PVC-U καθιερώθηκε ευρέως στα βαρυτικά δίκτυα λόγω του χαμηλού βάρους, της ευκολίας τοποθέτησης, της καλής χημικής αντοχής και του χαμηλού κόστους. Η λεία εσωτερική επιφάνειά του συμβάλλει στη μείωση καθιζήσεων, ενώ η απουσία διάβρωσης σε σχέση με τα μεταλλικά ή τσιμεντοειδή υλικά το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό σε αστικά δίκτυα. Παρόλα αυτά, η απόδοσή του εξαρτάται σημαντικά από την ποιότητα της έδρασης, τη σωστή συμπίκνωση και την στεγανοποίηση των αρμών. Ένα πολυμερές υλικό που τοποθετείται πλημμελώς ή λειτουργεί σε συνθήκες εκτός προδιαγραφών μπορεί να χάσει στην πράξη μέρος των πλεονεκτημάτων του.

Τα παραπάνω παραδοσιακά υλικά αγωγών αποχέτευσης διατήρησαν επί δεκαετίες σημαντικό ρόλο, αλλά η εμπειρία από τη λειτουργία τους έδειξε και τα ευαίσθητα σημεία και όριά τους, γεγονός που αποτέλεσε το υπόβαθρο για τη στροφή προς προηγμένα πλαστικά και σύνθετα συστήματα.

Πίνακας 5.1: Συγκριτική καταγραφή παραδοσιακών υλικών αγωγών αποχέτευσης ως προς την εφαρμογή, τους μηχανισμούς φθοράς και τη συνολική τους επίδοση από πλευράς βιωσιμότητας.

Υλικό	Τυπική εφαρμογή	Κύρια πλεονεκτήματα	Βασικοί μηχανισμοί φθοράς	Χαρακτηριστικά βιωσιμότητας
Σκυρόδεμα / Οπλισμένο σκυρόδεμα	Μεγάλοι συλλεκτήρες βαρύτητας	Ακαμψία, μεγάλες διατομές, αντοχή σε εξωτερικά φορτία	Διάβρωση από H ₂ S/θειικό οξύ, φθορά αρμών	Βιώσιμο μόνο με ανθεκτική σύνθεση και προστατευτικά συστήματα
Κεραμικοί (vitrified clay) σωλήνες	Δίκτυα βαρύτητας, σε αστικά δίκτυα	Πολύ υψηλή χημική αντοχή	Ευθραυστότητα, ρωγμές, προβλήματα αρμών	Ανθεκτικό σε διαβρωση, βαρύ και λιγότερο ανεκτικό σε καθιζήσεις
Χυτοσίδηρος / Χάλυβας	Καταθλιπτικοί αγωγοί,	Αντοχή σε πίεση, μηχανική αξιοπιστία	Εσωτερική/εξωτερική διάβρωση, φθορά επενδύσεων	Κατάλληλο μόνο με πλήρη αντιδιαβρωτική προστασία
PVC-U	Δίκτυα βαρύτητας αποχέτευσης	Χαμηλό βάρος και κόστος, αντοχή σε λύματα	Εξάρτηση από έδραση/αρμούς, μακροχρόνια φόρτιση	Κατάλληλο σε δίκτυα βαρύτητας

Ο Πίνακας 5.1 συνοψίζει τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά των παραδοσιακών υλικών σε έργα αποχέτευσης και δείχνει ότι η βιωσιμότητα κάθε λύσης εξαρτάται από τον κυρίαρχο μηχανισμό φθοράς του έργου.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι βασικοί μηχανισμοί φθοράς σε παραδοσιακά υλικά αγωγών αποχέτευσης. Στο σκυρόδεμα κυριαρχεί η διάβρωση, στους κεραμικούς σωλήνες η ευθραυστότητα και τα προβλήματα αρμών, στα μεταλλικά υλικά η εσωτερική και εξωτερική διάβρωση και στα πολυμερή η εξάρτηση από την ποιότητα έδρασης και συνδέσεις.



Σχήμα 5.1: Βασικοί μηχανισμοί φθοράς σε παραδοσιακά υλικά αγωγών αποχέτευσης

5.3. Προηγμένα Πλαστικά και Σύνθετα Υλικά

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στη συστηματική χρήση προηγμένων πολυμερών και σύνθετων υλικών στην αποχέτευση, τα οποία επιδιώκουν να συνδυάσουν ανθεκτικότητα σε χημική προσβολή, χαμηλό βάρος, καλή υδραυλική συμπεριφορά και βελτιωμένη εργοταξιακή απόδοση. Η ανάπτυξη αυτών των υλικών συνδέεται άμεσα με την προστασία από διάβρωση, τη μείωση των εναποθέσεων, την ευκολότερη και ταχύτερη τοποθέτηση και γενικότερα με μια πιο βιώσιμη λογική σχεδιασμού και λειτουργίας των αποχετευτικών δικτύων.

Οι αγωγοί από πολυπροπυλένιο (PP) και πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) αποτελούν τα τελευταία χρόνια την επικρατέστερη επιλογή για δίκτυα λυμάτων. Το κύριο

πλεονέκτημά τους είναι η πολύ καλή αντοχή στη χημική διάβρωση και η λεία εσωτερική επιφάνεια, η οποία περιορίζει την καθίζηση στερεών και δεν επηρεάζει τη ροή. Η χημική σταθερότητα των πολυμερών αυτών υλικών τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά σε αντίθεση με το σκυρόδεμα και το χυτοσίδηρο που υποβαθμίζονται γρηγορότερα. Παράλληλα, το χαμηλό βάρος τους μειώνει την ανάγκη βαρέου εξοπλισμού για την μεταφορά και τοποθέτηση και άρα και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Το HDPE παρουσιάζει επιπλέον πλεονέκτημα σε εφαρμογές όπου απαιτείται αυξημένη ανοχή σε εδαφικές μετακινήσεις, καθιζήσεις ή κρούσεις και εισροές, ενώ το PP χρησιμοποιείται ευρέως σε δίκτυα αποχέτευσης χάρη στον ισορροπημένο συνδυασμό ακαμψίας, ανθεκτικότητας και αντοχής σε λύματα. Ωστόσο, όπως και σε κάθε πολυμερές υλικό, η πραγματική επίδοση εξαρτάται από την ποιότητα της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται, τη σωστή κατασκευή των αρμών, την επάρκεια της έδρασης και τη συμβατότητα με το προδιαγραφόμενο βάθος και τα φορτία.

Ενδιαφέρουσα κατηγορία αποτελούν οι σωλήνες δομημένου τοιχώματος, μια από τις νεότερες εφαρμογές/χρήσεις του PE και PP. Τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν την απαιτούμενη δακτυλιοειδή ακαμψία όχι μέσω ομοιόμορφα αυξημένου πάχους σε όλη τη διατομή, αλλά μέσω μορφοποίησης του εξωτερικού τοιχώματος. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη μείωση μάζας ανά μέτρο σωλήνα και άρα καλύτερη εκμετάλλευση των πρώτων υλών. Από περιβαλλοντική άποψη, αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, γιατί επιτρέπει λειτουργική επάρκεια με μικρότερη κατανάλωση υλικού, ενώ εταιρείες αξιοποιούν πλέον και ανακυκλωμένο υλικό σε μη κρίσιμες ζώνες του τοιχώματος του αγωγού.



Εικόνα 5.1-5.2: Σωλήνες με λεία εσωτερική επιφάνεια και δομημένο εξωτερικό τοίχωμα

Οι σωλήνες GRP (Glassfiber Reinforced Polymer/Plastic) χρησιμοποιούνται ευρέως για μεγάλης διαμέτρου ή ιδιαίτερα απαιτητικά έργα ομβρίων/αποχέτευσης. Ο συνδυασμός χαμηλού βάρους, αντοχής στη διάβρωση και καλής μηχανικής συμπεριφοράς τους καθιστά ελκυστικούς σε περιβάλλοντα όπου η μεταφορά βαρέων σωλήνων είναι δύσκολη ή όπου η χημική προσβολή καθιστά προβληματική τη χρήση σκυροδέματος ή μεταλλικών υλικών. Επιπλέον, η λεία εσωτερική επιφάνεια συμβάλλει στη διατήρηση της υδραυλικής απόδοσης τους, για μεγάλα χρονικά διαστήματα αντισταθμίζοντας το αρχικό περιβαλλοντικό φορτίο. Τα τελευταία χρόνια το υλικό GRP έχει υιοθετηθεί και στην μονολιθική κατασκευή μικρών δεξαμενών και αντλιοστασίων λόγω της στεγανότητας και ευκολίας στην τοποθέτηση που προσφέρει.



Εικόνα 5.3-5.4: Υγρός θάλαμος αντλιοστασίου λυμάτων από GRP

Πρέπει, να σημειωθεί ότι τα προηγμένα πλαστικά και σύνθετα υλικά δεν αποτελούν μια ενιαία κατηγορία με ενιαία συμπεριφορά. Το PP και το HDPE είναι κατάλληλα για πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών στην αποχέτευση. Οι αγωγοί δομημένου τοιχώματος προσφέρουν οικονομία υλικού και καλή ακαμψία, ενώ οι GRP αγωγοί είναι ιδιαίτερα ελκυστικοί σε μεγάλες διαμέτρους ή ειδικές συνθήκες. Η βιωσιμότητά τους, λοιπόν εξαρτάται από την ορθή αντιστοίχιση υλικού, διαμέτρου, μηχανικών απαιτήσεων και περιβάλλοντος λειτουργίας. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Συγκριτική αξιολόγηση προηγμένων υλικών αποχέτευσης

Υλικό	Αντοχή σε χημική προσβολή	Υδραυλική συμπεριφορά	Τεχνικά χαρακτηριστικά	Βιωσιμότητα κύκλου ζωής	Κόρια χρήση	Βιβλ. Πηγές (Κεφ. 9)
PP	Πολύ καλή	Λεία επιφάνεια, περιορισμός ιζημάτων	Υψηλή αντοχή σε χημική προσβολή, μικρό βάρος, εύκολη τοποθέτηση, ακαμψία	Αυξημένη σε αστικά δίκτυα λόγω μεγάλης διάρκειας ζωής, ανακυκλωσιμότητας και μειωμένων απαιτήσεων συντήρησης	Βαρυτικά δίκτυα	2, 3, 4, 52
HDPE	Πολύ καλή	Λεία επιφάνεια, χαμηλή τραχύτητα, υψηλή στεγανότητα	Υψηλή αντοχή σε κρούση και εδαφικές μετακινήσεις, ευκαμψία	Αυξημένη λόγω μεγάλης διάρκειας ζωής, μειωμένων απαιτήσεων συντήρησης, δυνατότητα ανακύκλωσης	Δίκτυα λυμάτων υπό πίεση, ειδικές εφαρμογές βαρυτικών δικτύων	1, 3, 4
Δομημ. τοιχώμ. PE/PP	Πολύ καλή	Λεία επιφάνεια, χαμηλές απώλειες	Υψηλή δακτυλιοειδής ακαμψία με λιγότερο υλικό	Ευνοική λόγω μειωμένης κατανάλωση πρώτης ύλης /χαμηλού βάρους	Βαρυτικά δίκτυα	2, 3, 52
GRP	Πολύ καλή	Λεία επιφάνεια, υψηλή υδραυλική απόδοση χαμηλές απώλειες	Υψηλή αντοχή σε εξωτερικά φορτία και διάβρωση Κατάλληλο σε μεγάλες διαμέτρους	Αυξημένη σε μεγάλες διαμέτρους λόγω μεγάλης διάρκειας ζωής και περιορισμένων αναγκών συντήρησης	Μεγάλες διαμέτρους με χρήση σε όμβρια και λύματα	1, 3, 47

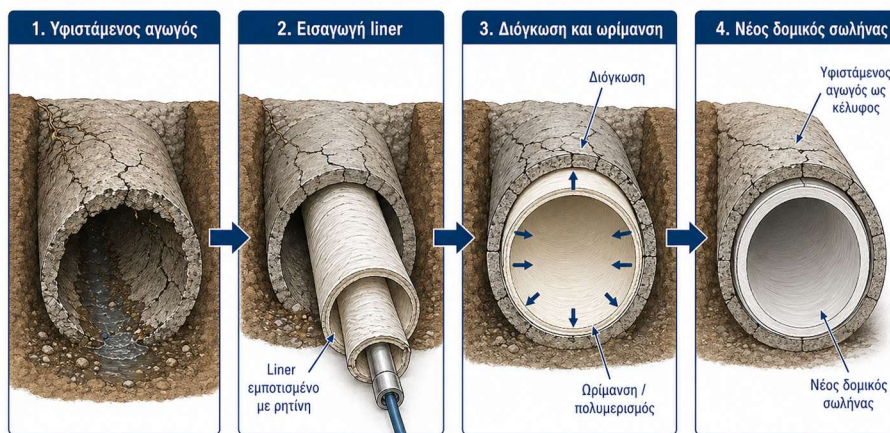
5.4. Τεχνολογίες Αναβάθμισης και Επισκευής Δικτύων Αποχέτευσης

Η βιωσιμότητα ενός αποχετευτικού δικτύου δεν εξαρτάται μόνο από την επιλογή υλικού σε νέα έργα, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο αναβαθμίζονται και επισκευάζονται τα υφιστάμενα τμήματα. Στο αστικό περιβάλλον, η πλήρης αντικατάσταση με ανοικτή εκσκαφή συνεπάγεται υψηλές ποσότητες αποβλήτων, μεγάλο κυκλοφοριακό και κοινωνικό κόστος, εργοταξιακή όχληση και αυξημένο ανθρακικό αποτύπωμα. Για τον λόγο αυτό, οι μέθοδοι κατασκευής, συντήρησης και επισκευής υπόγειων δικτύων που απαιτούν ελάχιστες ή καθόλου επιφανειακές εκσκαφές (trenchless) έχουν εξελιχθεί σε κρίσιμο εργαλείο βιώσιμης διαχείρισης υποδομών αποχέτευσης.

Οι περιβαλλοντικές μελέτες μεταξύ ανοικτής εκσκαφής (open-cut) και χωρίς εκσκαφή (trenchless) εφαρμογών είναι ενδιαφέρουσες καθώς επισημαίνουν ότι η δεύτερη μπορεί να μειώσει σημαντικά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με την ανοικτή

αντικατάσταση, επειδή περιορίζει τις εκσκαφές, τα απόβλητα, τη χρήση βαρέου εξοπλισμού και τις παράπλευρες αποκαταστάσεις.

Η πιο γνωστή από αυτές τις μεθόδους είναι η CIPP (Cured-In-Place Pipe), κατά την οποία ένας εύκαμπος σωληνωτός φορέας εμποτισμένος με ρητίνη εισάγεται στο εσωτερικό του υφιστάμενου αγωγού και στη συνέχεια ωριμάζει, δημιουργώντας έναν νέο εσωτερικό σωλήνα. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι αξιοποιεί το υπάρχον κέλυφος του παλιού αγωγού, περιορίζοντας τις εκσκαφές και την κατανάλωση νέων υλικών. Από περιβαλλοντική σκοπιά, αυτό σημαίνει σαφώς μικρότερες εκπομπές από μηχανήματα, μικρότερες μεταφορές και μικρότερη ανάγκη αποκατάστασης οδοστρωμάτων.



Σχήμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου CIPP σε αγωγό αποχέτευσης

Η σύγχρονη βιβλιογραφία προσδιορίζει σχεδιαστικό ορίζοντα ζωής της τάξης των 50 ετών αλλά η πραγματική απόδοση των CIPP liners εξαρτάται ουσιαστικά από την ποιότητα εγκατάστασης, το είδος της ρητίνης, τον έλεγχο ωρίμανσης και το κατά πόσο η τελική διατομή ικανοποιεί τις απαιτήσεις του αγωγού.

Πέρα από το CIPP (εσωτερική επένδυση), μια σειρά άλλων trenchless τεχνικών όπως sliplining (νέος αγωγός εντός υφιστάμενου), pipe bursting (θραύση παλαιού με έλξη νέου αγωγού) και spiral wound systems (μέθοδος εσωτερικής επένδυσης σωλήνων με συνεχή περιέλιξη) επιτρέπουν την παράταση ζωής υφιστάμενων αγωγών με περιορισμένες εκσκαφές. Η κοινή λογική όλων αυτών των μεθόδων είναι ότι επιδιώκουν να διατηρήσουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του υπάρχοντος υπογείου δικτύου και να το ενισχύσουν ή να το ανανεώσουν με εφαρμογή νέου υλικού. Η προσέγγιση αυτή είναι πλήρως συμβατή με τις αρχές κυκλικής οικονομίας και με τους όρους της σύγχρονης βιώσιμης διαχείρισης υποδομών.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση ανοικτής εκσκαφής και trenchless αποκατάστασης σε δίκτυα αποχέτευσης

Κριτήριο	Αντικατάσταση δικτύου	
	Ανοικτή εκσκαφή	Trenchless
Κατανάλωση νέων υλικών	Υψηλή	Μικρότερη
Εκσκαφές / απόβλητα	Πολύ υψηλά	Περιορισμένα
Κυκλοφοριακή / κοινωνική όχληση	Έντονη	Σημαντικά χαμηλότερη
Διάρκεια εργοταξίου	Μεγαλύτερη	Συνήθως μικρότερη
Περιβαλλοντικός αντίκτυπος	Υψηλότερος	Χαμηλότερος
Καταλληλότητα	Απαίτηση για πλήρη αντικατάσταση	Υφιστάμενος αγωγός λειτουργεί ως κέλυφος, τμήμα προς αντικατάσταση

Σημαντικό ρόλο στην αναβάθμιση των αποχετευτικών δικτύων έχουν επίσης τα πλαστικά φρεάτια και τα σύγχρονα εξαρτήματα. Τα πολυμερή συστήματα αυτής της κατηγορίας προσφέρουν αυξημένη στεγανότητα, μικρότερη πιθανότητα προβληματικών αρμών και πολύ καλύτερη αντοχή στη χημική διάβρωση σε σχέση με παραδοσιακές λύσεις. Σε περιοχές με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα ή σε δίκτυα με σημαντικό I/I, η αντικατάσταση ή αναβάθμιση παλαιών φρεατίων μπορεί να έχει ιδιαίτερα σημαντικό αποτέλεσμα για τη μείωση των εισροών, οι οποίες σε παλαιά δίκτυα αποτελούν βασική πηγή λειτουργικής αναξιοπιστίας.

Συνεπώς, οι τεχνολογίες αναβάθμισης και επισκευής αποδεικνύουν ότι ένα βιώσιμο αποχετευτικό δίκτυο δεν είναι υποχρεωτικά ένα πλήρως νέο δίκτυο. Μπορεί να είναι και ένα σωστά διαχειριζόμενο υφιστάμενο, στο οποίο εφαρμόζονται κατάλληλες trenchless λύσεις για την επισκευή των προβληματικών τμημάτων και αντικαθίστανται τα φρεάτια και τα εξαρτήματα που συνδέονται με εισροές, διαβρώσεις και πρόωρες αστοχίες.

6. Μελέτες Περίπτωσης Εφαρμογής Βιώσιμων Υλικών

6.1. Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο μετατοπίζει την ανάλυση από το θεωρητικό και συγκριτικό επίπεδο σε πραγματικές εφαρμογές και εστιάζει στο πώς η επιλογή υλικών συνδέεται στην πράξη με συγκεκριμένες τεχνικές λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς και τις συνθήκες κάθε έργου, τους περιβαλλοντικούς στόχους και τα απαιτούμενα λειτουργικά αποτελέσματα.

Η επιλογή των περιπτώσεων βασίσθηκε σε δύο κριτήρια, αφενός να υπάρχει όσο το δυνατόν ισχυρότερη τεκμηρίωση για το ίδιο το έργο και για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και αφετέρου να καλύπτονται διαφορετικές προσεγγίσεις βιωσιμότητας. Έτσι, παρουσιάζεται μία ελληνική υποθαλάσσια υδροδοτική υποδομή με σωλήνες HDPE και μια εφαρμογή χρήσης καινοτόμου σκυροδέματος πολύ χαμηλού άνθρακα σε έργο αποχέτευσης. Η έμφαση του κεφαλαίου παραμένει στα υλικά και στον ρόλο τους στο συνολικό τεχνικό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα.

6.2. Υποθαλάσσιος Αγωγός Ύδρευσης Ν. Αίγινας

Μία από τις σημαντικότερες ελληνικές εφαρμογές σύγχρονου υλικού ύδρευσης σε ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον, αποτελεί το έργο διασύνδεσης της νήσου Αίγινας, μέσω Σαλαμίνας, με την Αττική και κατ' επέκταση το υδροδοτικό σύστημα της ΕΥΔΑΠ για την μεταφορά πόσιμου νερού. Πρόκειται για υποθαλάσσιο αγωγό μήκους 14,8 km περίπου, ο οποίος κατασκευάστηκε από σωλήνες πολυαιθυλενίου HDPE κατηγορίας PE100, διαμέτρου DN630 και ποντίστηκε σε βάθη που έφθασαν περίπου τα 94-95 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (<https://www.constantinidis.org/en/portfolio-items/submarine-water-main-pipeline-aigina-island>)

Η επιλογή του HDPE για ένα τέτοιο έργο ήταν απολύτως εύλογη από τεχνική σκοπιά. Σε υποθαλάσσιες εφαρμογές οι βασικές απαιτήσεις είναι η αντοχή σε θαλάσσιο περιβάλλον, η ελαχιστοποίηση του κινδύνου διαρροών, η ευκαμψία απέναντι σε μετακινήσεις του πυθμένα ή σεισμικές καταπονήσεις και η δυνατότητα δημιουργίας μακρίων, αξιόπιστων συγκολλήσεων. Η λύση με PE100 επέτρεψε τη δημιουργία συνεχών τμημάτων σωλήνα με πολύ περιορισμένο αριθμό δυνητικά ευάλωτων συνδέσεων, στοιχείο κρίσιμο για ένα έργο όπου η μετέπειτα πρόσβαση για επισκευές είναι δύσκολη.

Από πλευράς βιωσιμότητας, το έργο είναι ιδιαίτερα σημαντικό επειδή αντικατέστησε μία κατάσταση μακρόχρονης εξάρτησης του νησιού της Αίγινας από υδροφόρες ή ανεπαρκείς γεωτρήσεις, γεγονός που προκαλούσε υψηλό οικονομικό κόστος και σημαντική λειτουργική αβεβαιότητα, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες (Καθημερινή, 2025). Με τη λειτουργία του αγωγού, η παροχή νερού έγινε σταθερότερη, συνεχής και σαφώς λιγότερο ενεργοβόρα.

Η περίπτωση αυτή είναι διδακτική και από μία δεύτερη άποψη καθώς δείχνει ότι η βιωσιμότητα δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό, αλλά και από τη συνολική στρατηγική παρακολούθησης και συντήρησης. Οι βλάβες που καταγράφηκαν στον αγωγό μετά την έναρξη λειτουργίας του, κατέδειξαν ότι ακόμη και ένα τεχνικά ορθό και βιώσιμο υλικό απαιτεί ολοκληρωμένη επιχειρησιακή διαχείριση, σχέδιο επέμβασης και αξιόπιστη επιτήρηση κρίσιμων σημείων.



Εικόνα 6.1: Όδευση υποθαλάσσιου αγωγού ύδρευσης Αίγινας
(News and Projects, Pipelife)



Εικόνα 6.2: Προετοιμασίας/πόντισης συγκολλημένων τμημάτων HDPE για υποθαλάσσια εφαρμογή

(<https://www.constantinidis.org/en/portfolio-items/submarine-water-main-pipeline-aigina-island>)

6.3. Bonneuil-en-France και σωλήνες από ultra-low-carbon concrete EXEGY®

Η δεύτερη μελέτη περίπτωσης αφορά ένα έργο αποχέτευσης/διάθεσης επεξεργασμένων λυμάτων στη Γαλλία, το οποίο αναδεικνύει την εφαρμογή ενός καινοτόμου υλικού χαμηλού άνθρακα σε πλήρη κλίμακα υπόγειας υποδομής. Σύμφωνα με την EXEGY Solutions και τη VINCI Construction, στο έργο επέκτασης της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων του Bonneuil-en-France κατασκευάστηκε ο πρώτος στη Γαλλία, αγωγός που υλοποιήθηκε εξ ολοκλήρου με προκατασκευασμένους σωλήνες από EXEGY® ultra-low-carbon concrete με την βοήθεια μηχανής μικροσηράγγων. Το έργο περιλάμβανε περίπου 912 m προκατασκευασμένων σωλήνων με εσωτερική διάμετρο 1,60 m (EXEGY Solutions, 2024· VINCI Construction, 2022).



Εικόνα 6.3: Τοποθέτηση προκατασκευασμένου σωλήνα σκυροδέματος χαμηλού άνθρακα.
(<https://www.vinci.com/newsroom/actualites/premiere-mondiale-vinci-construction-construit-le-premier-tunnel-realise>)

Η VINCI αναφέρει ότι το ανθρακικό αποτύπωμα της διαδικασίας παραγωγής και προκατασκευής των σωλήνων από σκυρόδεμα ήταν περίπου το ένα τέταρτο εκείνου των συνήθων σκυροδεμάτων που χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχες σωληνωτές προκατασκευές, δηλαδή κατά προσέγγιση περίπου 75% χαμηλότερο στο συγκεκριμένο στάδιο.



Εικόνα 6.4: Σχηματική απεικόνιση της λογικής μικροσήραγγας σε έργο

Εξίσου σημαντικό είναι ότι η περιβαλλοντική στρατηγική δεν περιορίστηκε στη σύνθεση του υλικού, αλλά λαμβάνοντας υπόψη την περιβαλλοντική ευαισθησία της περιοχής, οι σωλήνες κατασκευάστηκαν τοπικά, με στόχο να περιοριστούν και οι εκπομπές που σχετίζονται με τη μεταφορά. Το παράδειγμα αυτό αποτελεί μια ώριμη λογική βιωσιμότητας, στην οποία το υλικό, η βιομηχανική παραγωγή και η οργάνωση του έργου αντιμετωπίζονται ως αλληλένδετα στοιχεία.

Η εφαρμογή στην Bonneuil-en-France, αποδεικνύει ότι ακόμη και ένα υλικό όπως το σκυρόδεμα, το οποίο συχνά θεωρείται περιβαλλοντικά επιβαρυντικό, μπορεί να επανασχεδιαστεί με κατεύθυνση δραστηκής μείωσης του αποτυπώματος και ότι οι λύσεις αυτές είναι εφαρμόσιμες σε απαιτητικά υπόγεια έργα, χωρίς να χάνεται η απαραίτητη δομική επάρκεια.

6.4. Συμπέρασμα

Οι παραπάνω περιπτώσεις δείχνουν ότι η εφαρμογή βιώσιμων υλικών στα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης δεν ακολουθεί ένα ενιαίο μοντέλο. Στην Αίγινα η βιωσιμότητα εκφράστηκε μέσα από ένα νέο υποθαλάσσιο έργο ύδρευσης με HDPE, το οποίο αντικατέστησε μια λύση υψηλού κόστους και χαμηλής επάρκειας τροφοδοσίας.

Στη Γαλλία, το έργο στην Bonneuil-en-France ανέδειξε την τεχνολογική δυνατότητα χρήσης σκυροδέματος πολύ χαμηλού άνθρακα σε υφιστάμενες υποδομές πλήρους κλίμακας.

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι τα βιώσιμα υλικά δεν λειτουργούν αποκομμένα από το πλαίσιο του έργου. Το ίδιο υλικό μπορεί να είναι εξαιρετική λύση σε μία εφαρμογή και λιγότερο κατάλληλο σε μία άλλη, ενώ ακόμη και ένα τεχνικά σωστό υλικό μπορεί να μην αποδώσει πλήρη βιωσιμότητα εάν δεν συνοδεύεται από σωστή εγκατάσταση, παρακολούθηση και συντήρηση. Υπό αυτή την έννοια, οι μελέτες περίπτωσης δεν επιβεβαιώνουν απλώς τη θεωρία των προηγούμενων κεφαλαίων, αλλά τη συμπληρώνουν, δείχνοντας ότι η βιωσιμότητα στις υποδομές ύδρευσης και αποχέτευσης είναι πάντοτε αποτέλεσμα κατάλληλου υλικού, ορθού σχεδιασμού, σωστής εφαρμογής και αποτελεσματικής διαχείρισης.

7. Οικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση

7.1. Εισαγωγή

Η παρούσα ενότητα επιχειρεί μια αποτίμηση των βιώσιμων υλικών που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, λαμβάνοντας υπόψη δύο βασικές διαστάσεις, την οικονομική βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική επίδοση. Ο συνδυασμός

ς αυτός είναι κρίσιμος, διότι η επιλογή υλικού σε έργα ύδρευσης και αποχέτευσης δεν μπορεί να δικαιολογηθεί αποκλειστικά είτε από το χαμηλότερο αρχικό κόστος είτε από την καλύτερη περιβαλλοντική εικόνα στο στάδιο παραγωγής. Αντιθέτως, απαιτείται ολοκληρωμένη προσέγγιση, η οποία να συνεκτιμά το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης, τη συντήρηση, τις επισκευές, τη διάρκεια ζωής, το ανθρακικό αποτύπωμα, τη φάση λειτουργίας και τις δευτερογενείς επιπτώσεις σε νερό, ενέργεια και απόβλητα.

Στα έργα υποδομών νερού, η σύγκριση υλικών είναι σύνθετη, επειδή οι τεχνικές απαιτήσεις διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν πρόκειται για δίκτυο ύδρευσης ή αποχέτευσης, για μικρές ή μεγάλες διαμέτρους, για αγωγούς υπό πίεση ή μη. Για τον λόγο αυτό, η οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση δεν πρέπει να οδηγεί σε απόλυτες ιεραρχήσεις του τύπου «το υλικό Α είναι πάντα καλύτερο από το υλικό Β», αλλά σε τεκμηριωμένες, κατά περίπτωση, συγκρίσεις.

7.2. Ανάλυση Κόστους και Οφέλους

Η ανάλυση κόστους και οφέλους στα δίκτυα νερού δεν μπορεί να περιορίζεται στην τιμή αγοράς ανά μέτρο σωλήνα ή ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Αν και το αρχικό κόστος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα λήψης αποφάσεων, αποτελεί μόνο ένα μέρος της συνολικής δαπάνης του έργου. Στα υπόγεια δίκτυα η εκσκαφή, η επίχωση, οι αποκαταστάσεις, ο απαιτούμενος εξοπλισμός, οι συνδέσεις, η εργασία και η μελλοντική συντήρηση είναι συχνά εξίσου σημαντικά ή και σημαντικότερα από την ίδια την τιμή του βασικού υλικού.

Για την Ελλάδα, η δαπάνη για την κατασκευή των δικτύων βασίζεται στον Κανονισμό Περιγραφικών Τιμολογίων Εργασιών για δημόσιες συμβάσεις έργων (ΦΕΚ 1746Β/2017) όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει, καλύπτοντας τις κατηγορίες Έργων Οδοποιίας, Υδραυλικών έργων, Λιμενικών Έργων, Οικοδομικών Έργων, Έργων Πρασίνου, Ηλεκτρομηχανολογικών Εργασιών. Η δαπάνη για την κατασκευή ενός γραμμικού δικτύου βασίζεται σε άρθρα εκσκαφής, εγκιβωτισμού, επίχωσης και αποκατάστασης με σκυρόδεμα

ή ασφαλτόμιγμα. Η δαπάνη ανά τιμή μονάδας για τα άρθρα αυτά δεν επηρεάζεται από το υλικό της σωλήνωσης ή την χρήση του δικτύου. Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το την τιμή μονάδας των παραπάνω άρθρων είναι οι συνθήκες κατασκευής και το φυσικό έδαφος (γαιώδες, βραχώδες, παρουσία νερού) καθώς και η απόσταση από την πηγή λήψης των υλικών επίσωσης/αποκατάστασης και της απόρριψης/διάθεσης των προϊόντων εκσκαφής. Η απόσταση αυτή εκτός από αύξηση του κόστους είναι προφανές ότι επηρεάζει και το ανθρακικό αποτύπωμα του έργου λόγω των μεταφορών κτλ.

Για λόγους καθαρά σύγκρισης, παρακάτω παρουσιάζεται η τιμή μονάδας ανά υλικό και χρήση βάσει του Κανονισμού Περιγραφικών Τιμολογίων Εργασιών για δημόσιες συμβάσεις έργων και των διαθέσιμων τιμοκαταλόγων από παραγωγούς/εμπόρους.

Πίνακας 7.1: Σύγκριση Τιμών μονάδας υλικών

Κόστος σωλήνα €/m για έργα ύδρευσης						
	Τιμολόγιο Δημοσίων έργων			Τιμοκατάλογος εταιρειών		
Υλικό / Διάμετρος	Φ63	Φ110	Φ160	Φ63	Φ110	Φ160
HDPE PE100 3ης γενιάς PN 16 (EN 12201)	6.1	14.1	27.1	4.16	12.52	18
PVC-U PN 12.5 (EN 1452-2)	4.6	8.9	17.3	-	-	-
PP-R 125 SDR 11/S5/PN 20	-	-	-	2.17	5.75	8.15
	DN60	DN100	DN150	DN60	DN100	DN150
Ελατός χυτοσίδηρος C40 (EN545)	-	32,4	43,4	28	35	50

Κόστος σωλήνα €/m για έργα αποχέτευσης						
	Τιμολόγιο Δημοσίων έργων			Τιμοκατάλογος εταιρειών		
Υλικό / Διάμετρος	Φ200	Φ315	Φ400	Φ200	Φ315	Φ400
HDPE PE100 3ης γενιάς PN 10	23.8	60	97	28.08	-	-
PVC-U Σειρά 41 (EN 1401)	9.3	22.8	34	16.06	40.52	65.3
Δομημένου Τοιχώματος SN4 (EN 13476)	8.3	19.3	28.90	17,87	37.21	57.43
GRP (SN5)	-	57	77	-	-	-

Από τον Πίνακα 7.1 είναι εμφανής η έλλειψη συνάφειας του τιμολογίου δημοσίων έργων με τις τιμές που υπάρχουν στην αγορά για το ίδιο υλικό. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτός είναι και ο λόγος που γίνονται «εκπτώσεις» στην ποιότητα ενός έργου, είτε σε υλικά, είτε στην τοποθέτηση του και κατά συνέπεια στην διάρκεια ζωής του, επηρεάζοντας την συνολική βιωσιμότητα. Σε αυτό τον πίνακα φαίνεται επίσης η εναλλαγή του κόστους στην αγορά ανάλογα με την διάμετρο και το υλικό. Για παράδειγμα το PVC είναι ευρέως αποδεκτό στην αγορά ως το οικονομικότερο για δίκτυα αποχέτευσης. Παρόλα αυτά, όσο

αυξάνεται η διάμετρος του αγωγού που απαιτείται (>Φ200), οι αγωγοί δομημένου τοιχώματος PE κερδίζουν έδαφος και είναι πιο οικονομικοί.

Περαιτέρω, σύγχρονες ευρωπαϊκές προσεγγίσεις συνολικού κόστους (Total Cost of Ownership – TCO) δείχνουν ότι η κατασκευή απορροφά πολύ μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους, ενώ η συμβολή του ίδιου του σωλήνα αυξάνει κυρίως με τη διάμετρο. Η ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Costing – LCC) προσφέρει το καταλληλότερο μεθοδολογικό πλαίσιο για να αποτιμηθεί η πραγματική οικονομική επίδοση ενός υλικού. Στην προσέγγιση αυτή, το συνολικό κόστος δεν περιορίζεται στο CAPEX (προμήθεια και εγκατάσταση), αλλά περιλαμβάνει επίσης το κόστος λειτουργίας, τη συντήρηση, τις επισκευές, τις πιθανές αντικαταστάσεις εντός του επιλεγμένου ορίζοντα λειτουργίας και όπου είναι εφικτό, το κόστος τέλους ζωής.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων LCC δεν συγκλίνουν πάντοτε στα ίδια συμπεράσματα, επειδή μεταβάλλονται/επηρεάζονται με βάση τις παραδοχές για τη διάρκεια ζωής, το ποσοστό έκπτωσης, τη συχνότητα βλαβών, το κόστος συντήρησης, την ενεργειακή κατανάλωση και τη διάμετρο του αγωγού. Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα βασικά οικονομικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των κυριότερων υλικών σωληνώσεων. Η αξιολόγηση αποτελεί σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας και βασίζεται σε δημοσιευμένες μελέτες αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA), κόστους κύκλου ζωής (LCC), περιβαλλοντικών δηλώσεων προϊόντος (EPD) και τεχνικών προδιαγραφών. Οι χαρακτηρισμοί «χαμηλό», «μέτριο» και «υψηλό» είναι συγκριτικοί και αναφέρονται στα αποτελέσματα των διαθέσιμων μελετών και εφαρμογών.

Πίνακας 7.2: Συγκριτική οικονομική λογική των βασικών υλικών σωληνώσεων σε όρους αρχικού κόστους και κόστους κύκλου ζωής.

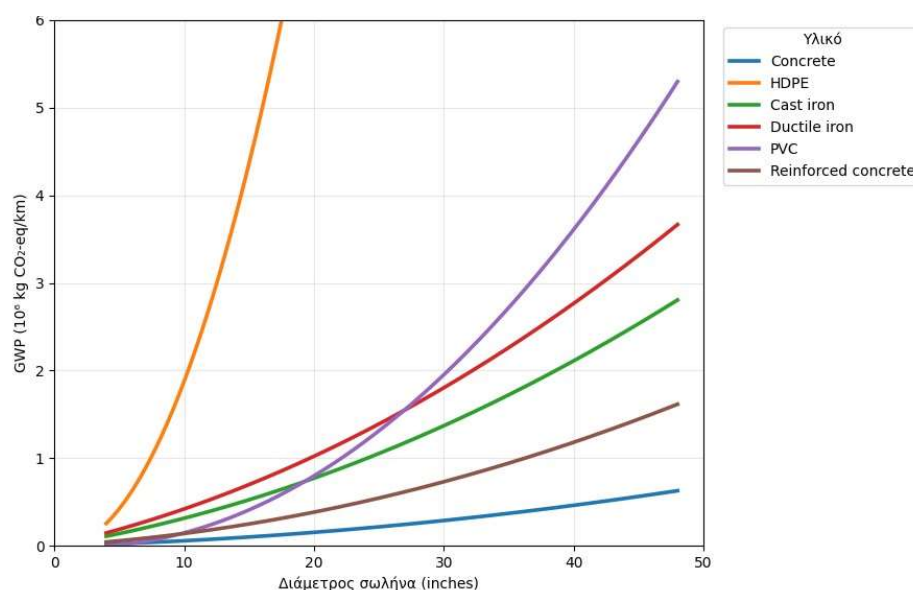
Υλικό	Εφαρμογή	Αρχικό Κόστος	LCA (Περιβαλλοντική Επίδοση)	LCC (Κόστος Κύκλου Ζωής)	GWP / Εκπομπές CO ₂	Διάρκεια Ζωής	Ανακυκλωσιμότητα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Βιβλ. Πηγές (Κεφ. 9)
PVC-U	Υδρευση / Αποχέτευση	Συνήθως χαμηλό έως μέτριο	Χαμηλή έως μέτρια, ανάλογα με το σενάριο κύκλου ζωής και το τέλος ζωής του	Χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης	Γενικά χαμηλότερο GWP από σκυρόδεμα και χυτοσίδηρο	50–100 έτη	Υψηλή	Αντοχή στη διάβρωση, μικρό βάρος, εύκολη εγκατάσταση	Θέματα σχετικά με παραγωγή PVC και πρόσθετα	3, 10, 36, 37, 42, 43
HDPE	Υδρευση / Αποχέτευση / Trenchless	Μέτριο	Πολύ καλή επίδοση LCA	Χαμηλό OPEX και μικρές αστοχίες	Γενικά χαμηλότερο από μεταλλικά υλικά.	>100 έτη	Πολύ υψηλή	Ευκαμψία, στεγανότητα, αντοχή σε διαβρώσεις	Ευαισθησία σε UV χωρίς προστασία	1, 3, 9, 10, 42, 43
PP	Αποχέτευση	Μέτριο	Καλή περιβαλλοντική επίδοση ανάλογα με τη διάμετρο και το σενάριο κύκλου ζωής.	Χαμηλό έως μέτριο, λόγω μικρού βάρους και περιορισμένων απαιτήσεων συντήρησης	Σχετικά χαμηλό σε σύγκριση με βαρύτερα υλικά	50–100 έτη	Υψηλή	Χημική αντοχή, μικρό βάρος	Μικρότερη μηχανική αντοχή	3, 10, 29, 30, 42, 43, 44
GRP	Μεγάλοι αγωγοί	Συνήθως μέτριο έως υψηλό	Μέτρια έως καλή LCA, ανάλογα με την χρήση	Μέτριο–υψηλό ανάλογα με την διάμετρο και χρήση	Μέτριο GWP	>75 έτη	Περιορισμένη	Υψηλή αντοχή σε διάβρωση	Δύσκολη ανακύκλωση	1, 3, 5, 42, 43, 46
Όλκιμος Χυτοσίδηρος	Υδρευση υπό πίεση	Σχετικά υψηλό	Υψηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα παραγωγής	Υψηλό αρχικό κόστος αλλά μεγάλη αντοχή	Υψηλό GWP	>100 έτη	Πολύ υψηλή	Πολύ μεγάλη μηχανική αντοχή	Διάβρωση χωρίς προστασία	3, 9, 10, 20, 47, 48
Σκυρόδεμα	Αγωγοί / Φρεάτια	Μεταβλητό	Υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα λόγω τσιμέντου	Μέτριο κόστος	Υψηλό GWP	50–100 έτη	Μέτρια	Ανθεκτικότητα σε φορτία	Ευαισθησία σε MICC / H ₂ S	3, 5, 33, 34, 42, 43, 46

7.3. Αποτύπωμα Άνθρακα και Περιβαλλοντική Επίδοση

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των υλικών σωληνώσεων βασίζεται κατά κύριο λόγο στην ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), η οποία επιτρέπει να συγκριθούν παραγωγή, μεταφορά, εγκατάσταση, χρήση και τέλος ζωής. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι το ανθρακικό αποτύπωμα δεν εξαρτάται μόνο από το είδος του υλικού, αλλά και από τη διάμετρο, το πάχος τοιχώματος, τη διάρκεια ζωής, τη φάση χρήσης και το κατά πόσον η απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας είναι υψηλή ή χαμηλή.

Μία από τις κρισιμότερες παρατηρήσεις είναι ότι η περιβαλλοντική κατάταξη δεν είναι σταθερή για όλες τις διαμέτρους. Σε μικρότερες διαμέτρους τα μεταλλικά υλικά μπορεί να εμφανίζονται περισσότερο επιβαρυντικά, ενώ σε μεγαλύτερες διαμέτρους ορισμένα πολυμερή υλικά αυξάνουν αισθητά το περιβαλλοντικό τους φορτίο λόγω της αύξησης του πάχους τοιχώματος. Την ίδια στιγμή, τα τσιμεντοειδή υλικά δεν είναι πάντοτε η χειρότερη επιλογή, ιδίως όταν εξετάζονται μεγάλα διαμετρήματα ή σύγχρονες εφαρμογές χαμηλού άνθρακα.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης το γεγονός ότι σε πολλά συστήματα η φάση χρήσης μπορεί να υπερβαίνει κατά πολύ το αποτύπωμα των ίδιων των υλικών. Η ενέργεια άντλησης και οι απώλειες πίεσης καθιστούν τη λειτουργία βασικό πεδίο περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Επομένως, υλικά που περιορίζουν τις διαρροές, τη γήρανση και την υδραυλική τραχύτητα συμβάλλουν έμμεσα αλλά ουσιαστικά στη βιωσιμότητα των δικτύων.



Γράφημα 7.1: Ενδεικτική απεικόνιση της επίδρασης της διαμέτρου στο ανθρακικό αποτύπωμα (Du et al, 2013)

Το Γράφημα 7.1 παρουσιάζει την μεταβολή του ανθρακικού αποτυπώματος βασικών υλικών σωληνώσεων σε συνάρτηση με τη διάμετρο. Η απεικόνιση αποδίδει σχηματικά ότι η περιβαλλοντική κατάταξη των υλικών δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τη διάμετρο, το απαιτούμενο πάχος τοιχώματος και τη λειτουργική μονάδα σύγκρισης (Du et al, 2013)

Ο Πίνακας 7.3 παρουσιάζει συγκριτικά την περιβαλλοντική επίδοση των βασικών υλικών σωληνώσεων ανά στάδιο του κύκλου ζωής τους, βάσει σύνθεσης αποτελεσμάτων από δημοσιευμένες μελέτες αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA) και σχετικής επιστημονικής βιβλιογραφίας.

Πέρα από το άμεσο οικονομικό και το ανθρακικό αποτύπωμα, η βιωσιμότητα των υλικών περιλαμβάνει και μια σειρά από δευτερογενείς ή έμμεσες επιπτώσεις, οι οποίες συχνά είναι κρίσιμες για τα έργα νερού. Σε αυτές περιλαμβάνονται η επίδραση στην ποιότητα του νερού, ο κίνδυνος έκπλυσης ουσιών μέσω της διάβρωσης, η εξοικονόμηση καυσίμων στην μεταφορά και εγκατάσταση λόγω χαμηλότερου βάρους καθώς και η περιορισμένη κοινωνική όχληση από λιγότερο επεμβατικές μεθόδους κατασκευής.

Πίνακας 7.3: Συγκριτική περιβαλλοντική επίδοση βασικών υλικών σωληνώσεων ανά στάδιο κύκλου ζωής.

Υλικό	Παραγωγή	Μεταφορά και εγκατάσταση	Φάση χρήσης	Τέλος ζωής	Ενδεικτικό περιβαλλοντικό συμπέρασμα	Βιβλ. Πηγές (Κεφ.9)
PVC-U	Μέτριο	Χαμηλό	Καλή υδραυλική συμπεριφορά	Μεταβλητό	Ευνοϊκό σε μικρές/μεσαίες διαμέτρους, πιο επιβαρυντικό σε πολύ μεγάλες	3, 10, 11, 36, 42, 43
HDPE	Μέτριο	Χαμηλότερο λόγω βάρους	Συχνά ευνοϊκή όταν μειώνονται διαρροές και απώλειες	Μεταβλητό	Ισχυρή λύση σε πολλές διαμέτρους και περιβάλλοντα	1, 3, 9, 10, 11, 42, 43
Όλκιμος χυτοσίδηρος	Υψηλό	Μέτριο έως υψηλό	Μπορεί να βελτιώνεται από μεγάλη διάρκεια ζωής	Ευνοϊκό λόγω ανακύκλωσης	Ισχυρό τεχνικά, αλλά συχνά πιο ανθρακικά απαιτητικό στην παραγωγή	3, 10, 11, 20, 48
Σκυρόδεμα / low-carbon concrete	Μεταβλητό	Υψηλότερο λόγω μάζας	Συχνά ουδέτερο ή ευνοϊκό σε μεγάλες διαμέτρους	Μεταβλητό	Η περιβαλλοντική εικόνα βελτιώνεται αισθητά με χαμηλού άνθρακα συνθέσεις	5, 10, 33, 34, 46

Πιο συγκεκριμένα, στα δίκτυα ύδρευσης, η επίδραση των υλικών είναι καθοριστική καθώς δεν πρέπει να υποβαθμίζουν την υγειονομική ασφάλεια, να ενισχύουν μικροβιακή ανάπτυξη ή να ελευθερώνουν ουσίες σε μη αποδεκτά επίπεδα. Παράλληλα, υλικά με μεγάλη διάρκεια ζωής περιορίζουν τον κύκλο νέων επεμβάσεων και κατά συνέπεια τις εκσκαφών, παραγωγή αποβλήτων και εργοταξιακής όχλησης.

Εξίσου σημαντικό είναι ότι το χαμηλό βάρος πολλών πολυμερών και σύνθετων υλικών μεταφράζεται σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων κατά τη μεταφορά και την εγκατάσταση, ενώ η απουσία διάβρωσης περιορίζει μακροχρόνιες φθορές και πιθανή απελευθέρωση προϊόντων οξείδωσης. Έτσι, η ολοκληρωμένη αποτίμηση επιδόσεων δεν αφορά μόνο το carbon dioxide equivalent CO₂e, αλλά και τη λειτουργική σταθερότητα, τη δημόσια υγεία και τη μείωση δευτερογενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

7.4. Συμπέρασμα

Η οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση των βιώσιμων υλικών σε έργα ύδρευσης και αποχέτευσης δείχνει ότι οι αποφάσεις επιλογής δεν μπορούν να στηριχθούν σε μονοδιάστατα κριτήρια. Το χαμηλό αρχικό κόστος δεν αρκεί, εάν συνοδεύεται από αυξημένη ανάγκη συντήρησης, μικρότερη διάρκεια ζωής ή υψηλότερο λειτουργικό κόστος.

Αντίστροφα, ένα υλικό με υψηλότερη αρχική τιμή ή υψηλότερο ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα μπορεί να είναι τελικά προτιμότερο, εάν προσφέρει μεγάλη μακροβιότητα, μειωμένες διαρροές, μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και περιορισμένες επεμβάσεις.

Το ουσιαστικό συμπέρασμα είναι ότι το βιώσιμο υλικό δεν είναι μια αφηρημένη “πράσινη” επιλογή, αλλά μια τεχνική λύση που πετυχαίνει καλύτερη συνολική επίδοση σε κύκλο ζωής, χωρίς συμβιβασμούς στην ασφάλεια και στη λειτουργικότητα του δικτύου.

8. Συμπεράσματα και Προτάσεις

8.1. Συμπεράσματα

Όλα τα προηγούμενα κεφάλαια συγκλίνουν στο ότι η βιωσιμότητα στα έργα υποδομών νερού δεν αποτελεί απλή περιβαλλοντική προσθήκη ή επικοινωνιακό στόχο, αλλά ουσιαστικό τεχνικό και στρατηγικό κριτήριο επιλογής υλικών, με άμεσες επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα των δικτύων, στην ασφάλεια λειτουργίας, στη μακροχρόνια οικονομική απόδοση και στη μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Η εφαρμογή βιώσιμων υλικών στα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης μπορεί να προσφέρει πολυδιάστατα οφέλη. Πρώτον, βελτιώνει την ανθεκτικότητα και αξιοπιστία των δικτύων, ιδίως όταν επιλέγονται υλικά με αυξημένη αντοχή σε διάβρωση, χημική προσβολή, μηχανικές καταπονήσεις και περιβαλλοντική γήρανση. Δεύτερον, συμβάλλει στη μείωση διαρροών, αστοχιών και βλαβών, άρα και στη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης των δικτύων. Τρίτον, μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα είτε άμεσα μέσω επιλογής υλικών χαμηλότερου ενσωματωμένου άνθρακα είτε έμμεσα μέσω μειωμένων απωλειών, χαμηλότερης ενεργειακής απαίτησης και λιγότερων επαναλαμβανόμενων παρεμβάσεων. Τέταρτον, σε αρκετές περιπτώσεις οδηγεί και σε οικονομικά πλεονεκτήματα σε βάθος χρόνου, ιδίως όταν αξιολογείται με εργαλεία LCC και όχι μόνο με το αρχικό κόστος προμήθειας. Αυτό συμβαίνει επειδή υλικά με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μικρότερη πιθανότητα βλαβών και χαμηλότερες ανάγκες συντήρησης μπορούν να περιορίσουν το συνολικό κόστος λειτουργίας, επισκευών και μελλοντικών αντικαταστάσεων του δικτύου.

Μεταξύ των υλικών που αναδείχθηκαν ως ιδιαίτερα υποσχόμενα στα δίκτυα ύδρευσης, συγκαταλέγονται οι σωλήνες HDPE, λόγω της αντοχής τους στη διάβρωση, της ευκαμψίας, των αξιόπιστων συγκολλημένων συνδέσεων και της πολύ καλής συμπεριφοράς τους σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως φάνηκε χαρακτηριστικά στην περίπτωση της Αίγινας. Παράλληλα, υλικά όπως ο όλκιμος χυτοσίδηρος και ο χάλυβας εξακολουθούν να αποτελούν κρίσιμες επιλογές σε έργα υψηλών μηχανικών απαιτήσεων, κυρίως λόγω της μεγάλης δομικής αντοχής και της μακροχρόνιας λειτουργικής αξιοπιστίας τους.

Αντίστοιχα, στα δίκτυα αποχέτευσης, τα υλικά PP, HDPE, οι σωλήνες δομημένου τοιχώματος και οι GRP αγωγοί παρουσιάζουν ισχυρά πλεονεκτήματα λόγω της χημικής ανθεκτικότητας, του χαμηλότερου βάρους, της καλής υδραυλικής συμπεριφοράς και της μειωμένης ευαισθησίας σε διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Ωστόσο, η εργασία έδειξε ότι κανένα υλικό δεν αποτελεί «καθολική λύση» για όλα τα έργα. Η καταλληλότητα κάθε υλικού εξαρτάται από τη διάμετρο, τη λειτουργική απαίτηση, το φορτίο, την ποιότητα εγκατάστασης, τη συντήρηση και τις τοπικές συνθήκες.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η προσπάθεια που γίνεται για την ανάπτυξη υλικών ή την τροποποίηση της παραγωγικής διαδικασίας για την μείωση των εκπομπών CO₂ χωρίς να υπονομεύουν τη μηχανική και λειτουργική επάρκεια των έργων, όπως η περίπτωση του Bonneuil-en-France, με την εφαρμογή υλικού χαμηλού άνθρακα σε πραγματικό έργο υποδομών.

Παράλληλα αξιοσημείωτη είναι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών, των δευτερογενών πρώτων υλών και η εφαρμογή της αρχής της κυκλικής οικονομίας. Παρόλο που το εύρος και η ωριμότητα αυτών των πρακτικών διαφέρει ανάλογα με το είδος του έργου και το διαθέσιμο κανονιστικό πλαίσιο, το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η ενσωμάτωση ανακυκλωμένων συστατικών και χαμηλού αποτυπώματος υλικών μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από παρθένες πρώτες ύλες και να βελτιώσει τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση των έργων.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδόθηκε και στις τεχνολογίες αδιατάρακτης αποκατάστασης (trenchless), όπου το άμεσο κόστος εφαρμογής τους μπορεί να είναι υψηλότερο, αλλά το συνολικό περιβαλλοντικό και οικονομικό ισοζύγιο σε κύκλο ζωής εμφανίζεται συχνά ευνοϊκότερο σε σχέση με την πλήρη αντικατάσταση μέσω ανοικτής εκσκαφής.

Εν τέλει το βασικό συμπέρασμα είναι ότι ο κύκλος ζωής ενός υλικού πρέπει να αποτελέσει τον βασικό άξονα σχεδιασμού και αξιολόγησης των έργων νερού. Ο ορθός σχεδιασμός δεν πρέπει να εξαντλείται στην επιλογή του χαμηλότερου αρχικού κόστους, αλλά να λαμβάνει υπόψη και το κόστος εγκατάστασης, τη συχνότητα βλαβών, την ανάγκη συντήρησης, τη διάρκεια ζωής, τη δυνατότητα ανακύκλωσης και την περιβαλλοντική επίδραση από την παραγωγή έως το τέλος ζωής του υλικού. Συνεπώς, η επιλογή υλικού οφείλει να συνδέεται με τον συνολικό τρόπο λειτουργίας του δικτύου και όχι μόνο με τον τιμοκατάλογο προμήθειας.

8.2. Προτάσεις για περαιτέρω ενέργειες

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα, προκύπτει σαφώς ότι η περαιτέρω προώθηση βιώσιμων υλικών στα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης απαιτεί συντονισμένες παρεμβάσεις σε θεσμικό, τεχνικό, ερευνητικό και εκπαιδευτικό επίπεδο.

Η πρώτη και ίσως πιο κρίσιμη πρόταση αφορά την ένταξη κριτηρίων βιωσιμότητας στις διακηρύξεις δημοσίων έργων. Οι προκηρύξεις δεν θα πρέπει να αξιολογούν αποκλειστικά την οικονομικά χαμηλότερη προσφορά, αλλά να δίνουν βαρύτητα σε τεκμηριωμένα χαρακτηριστικά όπως η διάρκεια ζωής, η δυνατότητα ανακύκλωσης, οι περιβαλλοντικές δηλώσεις προϊόντος, η ενεργειακή επίδραση στη φάση χρήσης και η συνολική απόδοση κύκλου ζωής.

Εξίσου σημαντική είναι η παροχή κινήτρων για τη χρήση ανακυκλωμένων, κυκλικών και χαμηλού αποτυπώματος υλικών. Τα κίνητρα αυτά μπορεί να είναι οικονομικά, κανονιστικά ή οργανωτικά. Για παράδειγμα, μπορούν να προβλεφθούν πρόσθετες βαθμολογικές ενισχύσεις στις διαγωνιστικές διαδικασίες όταν χρησιμοποιούνται υλικά με τεκμηριωμένα χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα ή με ποσοστό δευτερογενών πρώτων υλών, εφόσον φυσικά πληρούνται οι απαιτήσεις μηχανικής και υγειονομικής ασφάλειας.

Επίσης, μπορούν να ενισχυθούν συνεργασίες ανάμεσα σε δήμους, ΔΕΥΑ, την EBETAM, πανεπιστήμια και βιομηχανία για πιλοτικά έργα αλλά και για την ανάπτυξη/ έρευνα σε νέα υλικά (π.χ. βιοδιασπώμενα πολυμερή, νανοϋλικά).

Για την τεχνική εφαρμογή είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εξειδικευμένων προτύπων, τεχνικών οδηγιών και εθνικών πλαισίων αναφοράς για βιώσιμα υλικά υποδομών νερού στην Ελλάδα. Παρότι υπάρχει ευρωπαϊκό κανονιστικό υπόβαθρο για τα υλικά που έρχονται σε επαφή με πόσιμο νερό και για τη γενικότερη περιβαλλοντική πολιτική, οι ελληνικοί φορείς θα ωφελούνταν από πιο εξειδικευμένες κατευθυντήριες γραμμές που να καλύπτουν τις εγχώριες ανάγκες. Τέτοιες οδηγίες θα μπορούσαν να αφορούν ελάχιστα κριτήρια αξιολόγησης κύκλου ζωής, τρόπους σύγκρισης υλικών ανά κατηγορία έργου, διαδικασίες ελέγχου ποιότητας ανακυκλωμένων υλικών και μεθοδολογίες εκτίμησης περιβαλλοντικού αποτυπώματος υπό ελληνικές συνθήκες.

Παράλληλα, η εργασία δείχνει ότι υπάρχει έντονη ανάγκη για περισσότερες πιλοτικές εφαρμογές σε ελληνικό έδαφος. Τα διεθνή παραδείγματα είναι πολύτιμα, αλλά δεν αρκούν από μόνα τους για να τεκμηριώσουν τη μακροχρόνια συμπεριφορά ενός υλικού υπό ελληνικές συνθήκες. Η σεισμικότητα, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, οι γεωτεχνικές ιδιαιτερότητες, οι τοπικές πρακτικές συντήρησης, η έλλειψη τεχνογνωσίας στην εφαρμογή των υλικών, η ποιότητα νερού και οι διαθέσιμες υποδομές ανακύκλωσης συνιστούν παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά την πραγματική απόδοση των υλικών.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η περαιτέρω έρευνα στο πεδίο του περιβαλλοντικού αποτυπώματος υπό ελληνικές συνθήκες. Πολλές από τις διαθέσιμες LCA και LCC μελέτες στηρίζονται σε ξένα δεδομένα για τις πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και κατ' επέκταση στην παραγωγή υλικών, καθώς και για μεταφορές, ποσοστά ανακύκλωσης, τεχνολογίες παραγωγής και κανονιστικό πλαίσιο. Επειδή οι παράμετροι αυτές διαφέρουν από χώρα σε χώρα, το τελικό περιβαλλοντικό και οικονομικό αποτέλεσμα δεν μπορεί πάντοτε να εφαρμοστεί αυτούσιο στην ελληνική πραγματικότητα.

Τέλος, είναι απαραίτητη η διεπιστημονική συνεργασία για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή βιώσιμων υποδομών νερού. Η μετάβαση αυτή δεν είναι αποκλειστικό ζήτημα πολιτικού μηχανικού ή κατασκευαστή υλικών. Απαιτεί τη συμβολή χημικών μηχανικών, περιβαλλοντολόγων, ειδικών σε LCA/LCC, διαχειριστών υποδομών, φορέων της τοπικής αυτοδιοίκησης και βιομηχανίας.

Δεδομένης της κλιματικής κρίσης και των ευρωπαϊκών στόχων βιωσιμότητας, η τάση θα είναι η όλο και μεγαλύτερη ενσωμάτωση «πράσινων» υλικών και πρακτικών. Εκτός από τις άμεσες προτάσεις εφαρμογής, είναι χρήσιμο να προσδιοριστούν και οι ερευνητικές προτεραιότητες που ανακύπτουν από τα κενά της υφιστάμενης γνώσης. Η έλλειψη τοπικά προσαρμοσμένων δεδομένων, η ανάγκη παρακολούθησης πραγματικών έργων σε βάθος χρόνου και η σχετικά περιορισμένη σύνδεση ανάμεσα σε τεχνικές και περιβαλλοντικές βάσεις δεδομένων στην Ελλάδα αποτελούν βασικά εμπόδια για τη γρήγορη και ασφαλή διάχυση βιώσιμων υλικών στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, οι επόμενες ερευνητικές κινήσεις πρέπει να είναι στοχευμένες και εφαρμοσμένες.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία επιβεβαιώνει ότι η εφαρμογή βιώσιμων υλικών στα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης συνιστά όχι μόνο περιβαλλοντικά υπεύθυνη αλλά και τεχνικά και οικονομικά ορθολογική επιλογή, εφόσον βασίζεται σε σωστή αξιολόγηση κύκλου ζωής και σε κατάλληλη αντιστοίχιση υλικού και εφαρμογής. Η ανάλυση έδειξε ότι υπάρχουν και αναπτύσσονται υλικά με ουσιαστικές δυνατότητες να συμβάλουν στη βελτίωση της ανθεκτικότητας και της βιωσιμότητας των δικτύων.

Η μετάβαση αυτή, ωστόσο, δεν θα πραγματοποιηθεί αυτόματα. Προϋποθέτει θεσμικά εργαλεία, τεχνικές οδηγίες, εφαρμογή κριτηρίων βιωσιμότητας στις διακηρύξεις δημοσίων έργων και προμηθειών, ερευνητική υποστήριξη, τοπικές πιλοτικές εφαρμογές και διεπιστημονική συνεργασία.

9. Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

1. Abu Laila, I. (2025). *Comparative life cycle assessment of HDPE and GRP pipes*. *Frontiers in Sustainable Cities*.
2. Ahmadi, A., Beattie, N., Sternig, J., & Tianyu, A. (2013). *An investigation into alternatives to PVC drainage pipelines* (SEEDS Student Report APSC 261). University of British Columbia.
3. Akhtar, S., Reza, B., Hewage, K., Shahriar, A., Zargar, A., & Sadiq, R. (2015). *Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(4), 973–992. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0849-x>
4. Alnoaimi, A. T. S. (2019). Sustainability assessment of sewerage infrastructure. *International Journal of Environmental Science and Development*, 10(2), 40–46.
5. Blömer, J., & Maga, D. (2026). Ecological comparison of wastewater pipe rehabilitation with glass fiber liners compared to replacement with new concrete pipes. *Resources, Conservation and Recycling*.
6. BREEAM. (n.d.). *BREEAM Infrastructure (formerly CEEQUAL): Scheme information*.
7. CEN. (2019). *EN 15804:2012+A2:2019 Sustainability of construction works—Environmental product declarations—Core rules for the product category of construction products*.
8. CEN. (2024). *EN 12201-1: Plastics piping systems for water supply, and for drains and sewers under pressure—Polyethylene (PE)—Part 1: General*.
9. Chohan, I. M., Ahmad, A., Bheel, N., Najeh, T., & Almaliki, A. H. (2025). Sustainability assessment of different pipeline materials in freshwater supply systems. *Frontiers in Materials*, 12, 1566151. <https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1566151>
10. Chohan, I. M., Ahmad, A., Sallih, N., Bheel, N., Ali, M., & Deifalla, A. F. (2023). A review on life cycle assessment of different pipeline materials. *Results in Engineering*, 19, 101325. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101325>
11. Du, F., Woods, G. J., Kang, D., Lansey, K. E., & Arnold, R. G. (2013). Life cycle analysis for water and wastewater pipe materials. *Journal of Environmental Engineering*, 139(5), 703–711. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000638](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000638)
12. Ελληνική Δημοκρατία. (2023). *Υ.Α. Δ1(δ)/ΓΠ οικ. 27829/2023 (ΦΕΚ Β 3525/25.5.2023): Ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης*.
13. European Commission. (n.d.). *Drinking water—Minimum hygiene requirements for materials in contact with drinking water (DWD Article 11)*.

14. European Parliament & Council. (2000). *Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy*.
15. European Parliament & Council. (2006). *Regulation (EC) No 1907/2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)*.
16. European Parliament & Council. (2014). *Directive 2014/24/EU on public procurement—Article 68 (Life-cycle costing)*.
17. European Parliament & Council. (2020). *Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption (recast)*.
18. European Parliament & Council. (2024). *Directive (EU) 2024/3019 concerning urban wastewater treatment (recast)*.
19. European Parliament & Council. (2024). *Regulation (EU) 2024/3110 laying down harmonised rules for the marketing of construction products (CPR)*.
20. Gurskis, V., Skominas, R., & Šadzevičius, R. (2021). Multi-criteria comparative analysis of water-supply and sewerage pipes manufactured from different materials. In *Proceedings of the 10th International Scientific Conference Rural Development 2021* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.15544/RD.2021.014>
21. Institute for Sustainable Infrastructure. (n.d.). *Envision framework: Sustainability rating system for infrastructure*.
22. ISO. (2006a). *ISO 14025: Environmental labels and declarations—Type III environmental declarations*.
23. ISO. (2006b). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.
24. ISO. (2006c). *ISO 14044: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*.
25. Joshi, A. (2012). *A carbon dioxide comparison of open cut and pipe bursting* (Master's thesis, Bowling Green State University).
26. Kaushal, V., & Najafi, M. (2020). Comparative assessment of environmental impacts from open-cut pipeline replacement and trenchless cured-in-place pipe renewal method for sanitary sewers. *Infrastructures*, 5(6), 48. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5060048>
27. Marangoni, A. (2024). Lifecycle cost benefits of PVC-U pipes in Europe. *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*, 6(1), 1–5.
28. Ministry of Local Government, Rural Development and Co-Operatives, Dhaka Water Supply and Sewerage Authority (DWASA), & Institute of Water Modelling. (2022). *Expanded Dhaka City Water Supply Resilience Project: Environmental impact assessment report*.
29. Nia, S. M., & Othman, F. (2011). Cost analysis of pipes for application in sewage systems. *Corrosion Science*, 53(8), 2454–2461. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.04.011>

30. Nia, S. M., Othman, F., & Naseri, M. (2013). Assessment of selecting proper pipe in sewage infrastructures. In *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering and Infrastructure* (pp. 1–5).
31. Pan, X., Zhao, Y., Lin, X., Zhao, N., Sun, M., & Ma, J. (2025). Towards sustainable urban water systems: A strategic approach to advance decarbonizing water management. *Engineering*, 50, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.03.028>
32. Recio-Colmenares, C. L., Flores-Gómez, J., Morales Rivera, J. P., Palacios Hinestroza, H., & Sulbarán-Rangel, B. (2025). Green materials for water and wastewater treatment: Mechanisms and artificial intelligence. *Processes*, 13(2), 566. <https://doi.org/10.3390/pr13020566>
33. Rivera, F., Martínez, P., Castro, J., & Lopez, M. (2015). Massive volume fly-ash concrete: A more sustainable material with fly ash replacing cement and aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 63, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.001>
34. Roghanian, N., & Banthia, N. (2019). Development of a sustainable coating and repair material to prevent bio-corrosion in concrete sewer and waste-water pipes. *Cement and Concrete Composites*, 100, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.026>
35. Shen, C., Xia, H., Fu, X., Wang, X., & Wang, W. (2021). Developing green infrastructure strategies based on the analysis of sewer system critical components. *Water*, 13(19), 2694. <https://doi.org/10.3390/w13192694>
36. Sustainable Solutions Corporation. (2017). *Life cycle assessment of PVC water and sewer pipe and comparative sustainability analysis of pipe materials*. Sustainable Solutions Corporation.
37. TEPPFA. (2018). *Environmental product declaration: PVC-U solid wall sewer pipe systems*. The European Plastic Pipes and Fittings Association.
38. Thakre, G., et al. (2025). Evaluation of life cycle cost of excavation and trenchless cured-in-place pipeline technologies for wastewater applications. *Sustainability*.
39. Υπουργείο Ανάπτυξης και Επενδύσεων. (2022). *Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο για το Πόσιμο Νερό (2021–2030)*.
40. Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών. (2021). *442 Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΕΤΕΠ) που εφαρμόζονται υποχρεωτικά στα δημόσια έργα και μελέτες*.
41. ΕΛΟΤ. (n.d.). *ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-06-02-01: Δίκτυα υπό πίεση από σωλήνες u-PVC*.
42. Vahidi, E., Jin, E., Das, M., Singh, M., & Zhao, F. (2015). Comparative life cycle analysis of materials in wastewater piping systems. *Procedia Engineering*, 118, 1177–1188. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.461>
43. Vahidi, E., Jin, E., Das, M., Singh, M., & Zhao, F. (2016). Environmental life cycle analysis of pipe materials for sewer systems. *Sustainable Cities and Society*, 27, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.028>

44. Wierzbicki, Ł., & Szymiczek, M. (2012). Mechanical and chemical properties of sewage pipes. *Archives of Materials Science and Engineering*, 53(1), 38–45.
45. Xing, W., et al. (2025). Trenchless rehabilitation materials and technologies for water supply pipes: A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*.
46. Zakeri, A. R. (2026). *A productivity rate-based comparative carbon footprint cost analysis of small to large-sized open-cut pipeline installation activities for sanitary sewerage construction: A system boundary concept* (Master's thesis, University of Texas at Arlington).
47. Zayed, T., & Mahmood, M. (2013). Comprehensive list of parameters affecting wastewater pipe performance. *Technology Interface International Journal*, 13(2), 68–79.
48. Saint-Gobain PAM. (2022). Environmental Product Declaration (EPD): NATURAL Ductile Iron Pipe DN150
49. ΕΛΟΤ. (n.d.). *ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-06-06-01:2022 Δίκτυα από σωλήνες υαλοπλισμένου πολυμερούς (GRP)*

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.