



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ (ΠΣΧ)

Διπλωματική Εργασία

«Νέες Τεχνολογίες στη Διαχείριση Λυμάτων: Η Συνεισφορά
Συστημάτων Παρακολούθησης που Βασίζονται σε Οπτικές
Ώνες»

Νικολάου Βασίλειος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Σταματελάτου Αικατερίνη

Πάτρα, Ιούλιος, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητής («συγγραφέας/δημιουργός») 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.



«Νέες Τεχνολογίες στη Διαχείριση Λυμάτων: Η Συνεισφορά
Συστημάτων Παρακολούθησης που Βασίζονται σε Οπτικές
Ίνες»

Νικολάου Βασίλειος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Σταματελάτου Αικατερίνη

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Χριστίνα & Μιχαηλίδου

European School Luxembourg I, Μέλος
ΣΕΠ-ΕΑΠ

Πάτρα, Ιούλιος, 2026

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όλους εκείνους που συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην πραγματοποίηση και την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κ. Αικατερίνη Σταματελάτου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτό το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα. Η καθοδήγησή της, οι πολύτιμες συμβουλές και η διαρκής υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το κ. Κωνσταντίνο Σταυράκη που με καθοδήγησε και να με συμβουλεύσει σε όλο το κομμάτι του νέου βιολογικό καθαρισμού των Ιωαννίνων και το προσωπικό της ΔΕΥΑΙ,

Ένα μεγάλο και ξεχωριστό «ευχαριστώ» ανήκει στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για την διαρκή υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η διαχείριση των λυμάτων αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την προστασία της δημόσιας υγείας, των υδατικών πόρων και του φυσικού περιβάλλοντος, καθώς η ανεπαρκής επεξεργασία και παρακολούθησή τους μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές οικολογικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων καλούνται να λειτουργούν με αξιοπιστία και σταθερότητα, απαιτώντας υψηλή ακρίβεια στην παρακολούθηση των διεργασιών και στην ποιότητα των εκροών. Ωστόσο, τα παραδοσιακά συστήματα ελέγχου εμφανίζουν συχνά περιορισμούς, όπως ευπάθεια στη διάβρωση, ανάγκη συχνής βαθμονόμησης και δυσκολία στην παροχή συνεχών μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι τεχνολογίες που βασίζονται σε αισθητήρες οπτικών ινών αναδεικνύονται ως μια καινοτόμα και τεχνικά ώριμη λύση. Οι αισθητήρες αυτοί αξιοποιούν τις ιδιότητες του φωτός για την καταγραφή μεταβολών θερμοκρασίας, πίεσης και μηχανικής καταπόνησης, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια, ανθεκτικότητα σε δυσμενείς χημικές συνθήκες και δυνατότητα παρακολούθησης σε μεγάλο μήκος δικτύου. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι αισθητήρες Fiber Bragg Grating (FBG) και τα διανεμημένα συστήματα αισθητήρων (Distributed Sensing), τα οποία επιτρέπουν συνεχή παρακολούθηση κατά μήκος αγωγών και δεξαμενών, ενισχύοντας την προληπτική συντήρηση και την ασφάλεια λειτουργίας.

Τα δεδομένα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης δείχνουν ότι οι οπτικές ίνες μπορούν να συμβάλουν στον εκσυγχρονισμό των υποδομών λυμάτων και στη μετάβαση προς “έξυπνα” συστήματα διαχείρισης νερού, τα οποία υποστηρίζουν τη βιώσιμη χρήση και επαναχρησιμοποίηση υδάτινων πόρων. Παρά τις προκλήσεις που σχετίζονται με το αρχικό κόστος εγκατάστασης και την ανάγκη εξειδικευμένης τεχνικής κατάρτισης, τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας υποδεικνύουν ότι η ευρύτερη εφαρμογή της αποτελεί ρεαλιστική και αναγκαία προοπτική για το μέλλον των υποδομών αποχέτευσης και επεξεργασίας λυμάτων.

Λέξεις-Κλειδιά

Διαχείριση λυμάτων, οπτικές ίνες, αισθητήρες, Fiber Bragg Grating (FBG), διανεμημένη παρακολούθηση, έξυπνες υποδομές νερού, περιβαλλοντική μηχανική.

New technologies in wastewater management: The contribution of fiber optic-based monitoring systems.

Vasileios Nikolaou

Abstract

Wastewater management is a critical issue for the protection of public health, water resources and the natural environment, as inadequate treatment and monitoring can lead to serious ecological and social impacts. Modern wastewater treatment plants are required to operate reliably and stably, requiring high accuracy in process monitoring and effluent quality. However, traditional control systems often have limitations, such as vulnerability to corrosion, the need for frequent calibration and difficulty in providing continuous real-time measurements.

In this context, technologies based on fiber optic sensors emerge as an innovative and technically mature solution. These sensors exploit the properties of light to record changes in temperature, pressure and mechanical stress, offering high accuracy, resistance to adverse chemical conditions and the ability to monitor over a long network length. Of particular importance are Fiber Bragg Grating (FBG) sensors and distributed sensor systems (Distributed Sensing), which allow continuous monitoring along pipelines and tanks, enhancing preventive maintenance and operational safety.

The data from the systematic review show that optical fibers can contribute to the modernization of wastewater infrastructure and the transition to “smart” water management systems, which support the sustainable use and reuse of water resources. Despite the challenges associated with the initial installation cost and the need for specialized technical training, the advantages of the technology indicate that its wider application is a realistic and necessary prospect for the future of sewage and wastewater treatment infrastructure.

Keywords

wastewater management, fiber optic sensors, real-time monitoring, smart environmental systems, wastewater treatment, environmental engineering.

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος εικόνων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων	xi
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Αντικείμενο της μελέτης	14
1.2 Σημασία της διαχείρισης λυμάτων	14
1.3 Προβλήματα και σύγχρονες προκλήσεις	15
1.4 Ανάγκη για προηγμένα συστήματα παρακολούθησης	15
1.5 Οπτικές ίνες ως τεχνολογία παρακολούθησης.....	15
1.6 Σκοπός και στόχοι της εργασίας	16
1.7 Ερευνητικά ερωτήματα.....	17
1.8 Μεθοδολογική Προσέγγιση	17
1.9 Δομή της Εργασίας.....	18
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΛΥΜΑΤΩΝ	20
2.4 Ορισμός και κατηγοριοποίηση λυμάτων	20
2.5 Προσδιορισμός βασικών παραμέτρων των αστικών λυμάτων.	21
2.5.1 Φυσικά χαρακτηριστικά.	21
2.5.2 Χημική και μικροβιολογική σύσταση λυμάτων.....	23
2.6 Στάδια συμβατικής επεξεργασίας λυμάτων.....	27
2.6.1 Προεπεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία.....	27
2.6.2 Δευτεροβάθμια (βιολογική) επεξεργασία.....	27
2.6.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία και απολύμανση	27
2.6.4 Τεταρτοβάθμια επεξεργασία	28
2.6.5 Διαχείριση ιλύος	29
2.12 Θεσμικό πλαίσιο Ευρωπαϊκής Ένωσης: από την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ στη νέα Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019.....	30
2.12.1 Οδηγία 91/271/ΕΟΚ.....	30
2.12.2 Η αναθεώρηση: Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019.....	30
2.13 Εθνικό θεσμικό πλαίσιο (Ελλάδα)	31
2.14 Προκλήσεις της συμβατικής διαχείρισης λυμάτων	32
2.14.1 Ενεργειακό κόστος.....	32

2.14.2 Κλιματική αλλαγή και γήρανση υποδομών.....	32
2.14.3 Μεταβλητότητα φορτίων και καθυστερημένη ανίχνευση δυσλειτουργιών	33
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΕΕΛ	34
3.1 Η ανάγκη παρακολούθησης σε μια ΕΕΛ	34
3.2 Παραδοσιακά συστήματα παρακολούθησης διεργασιών	35
3.3 Ανάγκη για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο	35
3.3.1 Περιορισμοί και τεχνολογικά προβλήματα των σημερινών	36
3.3.2 Συμβατικοί σημειακοί αισθητήρες.....	38
3.3.3 Συστήματα SCADA	39
3.3.4 Τηλεμετρία δικτύων ύδρευσης-αποχέτευσης.....	40
3.3.5 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) στη διαχείριση λυμάτων.....	40
3.3.6 Ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins)	41
3.3.7 Υπολογιστική στην άκρη του δικτύου (edge computing) και κατανεμημένη επεξεργασία δεδομένων.....	42
3.3.8 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και διαλειτουργικότητα.....	42
3.3.9 Ζητήματα ασφάλειας δεδομένων και ανθεκτικότητας συστημάτων SCADA 43	
3.3.10 Διαχείριση όγκου δεδομένων (data management)	43
3.3.11 Συγκριτική αποτίμηση και το κενό πυκνότητας πληροφορίας	43
3.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ: ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	45
3.5 Κατηγορίες αισθητήρων οπτικών ινών	46
3.5.1 Οι αισθητήρες Fiber Bragg Grating (FBG).....	47
3.5.2 Interferometric Sensors	49
3.5.2 Διανεμημένη αισθητήρια παρακολούθηση (Distributed Sensing) (DTS, DAS, DSS).....	50
3.6 Περιβαλλοντική ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής.....	56
3.7 Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα των Οπτικών Ινών στη Διαχείριση Λυμάτων.....	56
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	59
4.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	59
4.2 Μεθοδολογία Μελέτης Περίπτωσης (Case Study Methodology).....	62
Ανάλυση και Λειτουργική Βελτιστοποίηση της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Ιωαννίνων: Από τη Συμβατική Διαχείριση στα Έξυπνα Συστήματα Παρακολούθησης.....	63
5.1 Το Γεωγραφικό και Περιβαλλοντικό Πλαίσιο	64

5.2	Τεχνική Περιγραφή Της ΕΕΛ Ιωαννίνων (Γραμμή Ύδατος).....	64
5.2.1	Σχεδιασμός και Δυναμικότητα	64
5.2.2	Υδραυλική δυναμικότητα	65
5.2.3	Πρόσφατη αναβάθμιση: η Μονάδα Ηλιακής Ξήρανσης Ιλύος.....	65
5.3	Το δίκτυο αποχέτευσης και οι διαρθρωτικές του προκλήσεις	66
5.4	Το έργο τηλεμετρίας: υλοποίηση, απένταξη και σημασία για την παρούσα εργασία	66
5.4.1	Περιγραφή του έργου.....	66
5.5	Ευρύτερο επενδυτικό πρόγραμμα της ΔΕΥΑΙ	67
5.6	Γεωγραφικό και περιβαλλοντικό πλαίσιο: η λίμνη Παμβώτιδα ως τελικός αποδέκτης.....	67
5.7	Εποχιακή διακύμανση φορτίου: τουρισμός, φοιτητικός πληθυσμός και υδραυλική καταπόνηση	68
5.8	Συγκριτική τοποθέτηση έναντι άλλων ελληνικών ΔΕΥΑ	68
5.9	Ενδεικτική χαρτογράφηση κρίσιμων σημείων δικτύου	69
5.10	Συνθετική αποτίμηση: SWOT ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης....	70
5.11	Στάδια Επεξεργασίας, Διαχείριση Ιλύος και Καινοτόμα Συστήματα Παρακολούθησης στην ΕΕΛ Ιωαννίνων.....	70
5.11.1	Προκαταρκτική Επεξεργασία (Pre-treatment)	71
5.11.2	Δευτεροβάθμια (Βιολογική) Επεξεργασία	73
5.11.3	Τριτοβάθμια Επεξεργασία και Τελική Διάθεση	75
5.12	Διαχείριση Ιλύος Και Ενεργειακή Αξιοποίηση.....	77
5.12.1	Γραμμή Επεξεργασίας Ιλύος	77
5.12.2	Ενεργειακή Αυτονόμηση: Βιοαέριο και ΣΗΘ.....	79
	Εκσυγχρονισμός Συστημάτων Παρακολούθησης - Η Εφαρμογή Οπτικών Ινών	81
6.1	Η Ανάγκη Μετάβασης σε Συστήματα Κατανεμημένης Παρακολούθησης ..	81
6.2	Το Πλαίσιο Υιοθέτησης στην Ελλάδα και Διεθνώς	82
6.2.1	Ελληνικές Εφαρμογές	82
6.2.2	Διεθνείς Εφαρμογές.....	83
6.3	Αρχές Σχεδιασμού και Αρχιτεκτονική του Συστήματος.....	84
6.4	Αρχές Λειτουργίας των Τεχνολογιών Κατανεμημένης Αισθητηριακής Ίνας	86
6.5	Εφαρμογές ανά Τομέα Υποδομής της ΕΕΛ Ιωαννίνων	87
6.5.1	Δεξαμενές Βιολογικής Επεξεργασίας	88
6.5.2	Δίκτυο Μεταφοράς Λυμάτων και Ανίχνευση Διαρροών.....	89
6.5.3	Περίμετρος Εγκατάστασης	89
6.5.4	Υποβρύχιος Αγωγός Διάθεσης προς τη Λίμνη Παμβώτιδα	90

6.5.5 Μονάδα Ηλιακής Ξήρανσης Ιλύος.....	90
6.5.6 Έξοδος Επεξεργασμένης Εκροής	91
6.6 Υλικά και Τεχνική Εγκατάσταση.....	91
6.7 Τεχνικοοικονομική Αξιολόγηση	92
6.7.1 Οικονομική Ανάλυση	92
6.7.1 Λειτουργική Βελτιστοποίηση και Περιβαλλοντική – Κοινωνική Αξία	93
6.8 Σύγκριση DFOS/FBG έναντι Συμβατικής Τηλεμετρίας.....	94
6.9 Τεχνολογικοί Περιορισμοί και Προκλήσεις Εφαρμογής.....	95
6.10 Έξυπνα Δίκτυα, Βιομηχανία 4.0 και Μελλοντικές Προοπτικές	96
6.10.1 Από τους Σημειακούς στους Κατανεμημένους Αισθητήρες	96
6.10.2 Προληπτική Συντήρηση, Αυτοματισμός και Ερευνητικές Κατευθύνσεις.....	97
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
Βιβλιογραφία	104

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Δομή οπτικής ίνας.....	46
Εικόνα 2 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα FBG	49
Εικόνα 3 Διανεμημένη παρακολούθηση κατά μήκος αγωγού	51
Εικόνα 4 Μεταφορά λημμάτων με χρήση κοχλία του Αρχιμήδη.....	72
Εικόνα 5 Στάδιο εσχάρωσης.....	72
Εικόνα 6 Στάδιο Λιποσυλλογής	73
Εικόνα 7 Δευτεροβάθμια επεξεργασία	74
Εικόνα 8 Τριτοβάθμια επεξεργασία δεξαμενές τελικής καθίζησης.....	75
Εικόνα 9 Στάδιο χλωρίωσης.....	76
Εικόνα 10 Στάδιο με υπεριώδη ακτινοβολία UV.....	76
Εικόνα 11 Στάδιο συλλογής μετα την αναερόβια χώνευση.....	78
Εικόνα 12 Στάδιο αφυδάτωσης και διάστρωσης με ρομποτικό όχημα.....	78
Εικόνα 13 Γραμμή επεξεργασίας ΕΕΛ Ιωαννίνων.....	79
Εικόνα 14 Μονάδες καταγραφής (interrogators).	85
Εικόνα 15 Μονάδες DTS/DAS/DSS σε κάθε στάδιο.....	85
Εικόνα 16 τέσσερις βασικές τεχνολογίες χρήσης οπτικών ινών	88

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Στάδια επεξεργασίας.....	29
Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά τεχνολογιών παρακολούθησης	44
Πίνακας 3 Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών DFOS/FBG	55
Πίνακας 4 Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού πηγών.	61
Πίνακας 5 Σύγκριση DFOS/FBG έναντι της συμβατικής τηλεμετρίας	94

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Συντομογραφία	Επεξήγηση
ΕΕΛ	Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων
ΔΕΥΑΙ	Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Ιωαννίνων
ΔΕΥΑ	Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης
ΥΜΕΠΕΡΑΑ	Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Υποδομές Μεταφορών, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη»
ΕΣΠΑ	Εταιρικό Σύμφωνο για το Πλαίσιο Ανάπτυξης
ΤΣΕ	Τοπικός Σταθμός Ελέγχου
ΚΣΕ	Κεντρικός Σταθμός Ελέγχου
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
IoT	Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
DFOS	Distributed Fiber Optic Sensing (Κατανεμημένη Αισθητηριακή Μέτρηση Οπτικών Ινών)
DTS	Distributed Temperature Sensing
DAS	Distributed Acoustic Sensing
DSS	Distributed Strain Sensing
FBG	Fiber Bragg Grating
OTDR / OFDR	Optical Time/Frequency-Domain Reflectometry
BOD5	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (5 ημερών)
COD	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
TSS	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά
TN / TP	Ολικό Άζωτο / Ολικός Φώσφορος
MIC	Microbial Induced Corrosion (Μικροβιακά Επαγόμενη Διάβρωση)
UWWTD	Urban Wastewater Treatment Directive

Συντομογραφία Επεξήγηση

p.e. / ι.κ. Population Equivalent / Ισοδύναμος Κάτοικος

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της μελέτης

Η διαχείριση των λυμάτων διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην προστασία της δημόσιας υγείας, στην προστασία του περιβάλλοντος και στη διασφάλιση της βιώσιμης χρήσης των υδάτινων πόρων. Η σωστή επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι απαραίτητη για την πρόληψη ασθενειών, για την μείωση της ρύπανσης και για τη διατήρηση καθαρών αποθεμάτων νερού για τον ανθρώπινο πληθυσμό και τα οικοσυστήματα. Οι σύγχρονες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων έχουν ως στόχο τη διαχείριση μιας ευρείας ποικιλίας υγρών αποβλήτων, γεγονός που απαιτεί ακριβή και συνεχή παρακολούθηση τόσο των διαδικασιών επεξεργασίας όσο και των χαρακτηριστικών των ίδιων των λυμάτων (Inc. Metcalf & Eddy, 2013).

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία οπτικών ινών έχει αποκτήσει ολοένα και μεγαλύτερη σημασία σε αυτόν τον τομέα λόγω της υψηλής αξιοπιστίας λόγω της ικανότητάς της να παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο χωρίς να παρεμβαίνει στη διαδικασία επεξεργασίας. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη μη παρεμβατική, συνεχή μέτρηση κρίσιμων παραμέτρων, επιτρέποντας τον ακριβέστερο έλεγχο και βελτιστοποίηση των εργασιών επεξεργασίας. Ως αποτέλεσμα, τα συστήματα παρακολούθησης που βασίζονται σε οπτικές ίνες αποτελούν ζωτικά συστατικά προηγμένων, ανθεκτικών στρατηγικών περιβαλλοντικής διαχείρισης που αποσκοπούν στην προστασία της ποιότητας του νερού και στην προώθηση της βιωσιμότητας (Danheng Gao, 2020) (Yi Bao, 2019).

1.2 Σημασία της διαχείρισης λυμάτων

Η αποτελεσματική επεξεργασία και παρακολούθηση των λυμάτων έχει καθοριστική σημασία σε πολλαπλά επίπεδα:

- Προστασία επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.
- Πρόληψη της διάδοσης παθογόνων μικροοργανισμών.
- Μείωση κόστους λειτουργίας εγκαταστάσεων μέσω πρόληψης βλαβών.
- Συμμόρφωση με περιβαλλοντική νομοθεσία (ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 1991).

Η παρακολούθηση των δεδομένων εξαρτάται από την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι παραδοσιακοί αισθητήρες συχνά φθείρονται λόγω διάβρωσης, χρειάζονται συχνή βαθμονόμηση και δεν επιτρέπουν πλήρη εποπτεία των διεργασιών. Αυτό αποτελεί σημαντικό περιορισμό σε ένα δυναμικό και πολύπλοκο σύστημα όπως οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) (Alexandra Virginia Bounegru, 2025).

1.3 Προβλήματα και σύγχρονες προκλήσεις

Τα βασικά προβλήματα που εμφανίζονται στην παρακολούθηση λυμάτων περιλαμβάνουν:

- Ασυνέχεια στις μετρήσεις (μη συνεχής έλεγχος)
- Χρονική καθυστέρηση στην αξιολόγηση κρίσιμων μεταβλητών
- Τεχνική ευπάθεια των αισθητήρων που έρχονται σε άμεση επαφή με λύματα
- Περιορισμένη χωρική κάλυψη κατά μήκος των δικτύων αποχέτευσης

Σε αυτό το σημείο αναδεικνύεται η ανάγκη για νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις.

1.4 Ανάγκη για προηγμένα συστήματα παρακολούθησης

Οι σύγχρονες τάσεις στη διαχείριση λυμάτων συνδέονται με τη μετάβαση σε υποδομές έξυπνης τηλεμετρίας (Smart Water Networks), όπου η συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων επιτρέπουν αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων όπου σε αυτά τα συστήματα, η συνεχή και υψηλής ακρίβειας παρακολούθηση δεν αποτελεί συμπληρωματική λειτουργία, αλλά θεμελιώδη προϋπόθεση (Nelson Carriço, 2023).

1.5 Οπτικές ίνες ως τεχνολογία παρακολούθησης

Οι αισθητήρες οπτικών ινών:

- Λειτουργούν χωρίς άμεση επαφή με το περιβάλλον μέτρησης

- Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
- Μπορούν να εγκατασταθούν σε μεγάλες αποστάσεις
- Μπορούν να παρέχουν συνεχή, διανεμημένη μέτρηση κατά μήκος αγωγών και δεξαμενών

Οι ιδιότητές τους αυτές οδηγούν σε σημαντική μείωση του λειτουργικού κινδύνου και αύξηση της ακρίβειας των διεργασιών παρακολούθησης (Hongxuan Xu, 2025).

1.6 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει συστηματικά τη συνεισφορά των συστημάτων παρακολούθησης που βασίζονται σε οπτικές ίνες στη σύγχρονη διαχείριση λυμάτων, με έμφαση στη λειτουργική ανάλυση και τη διατύπωση προτάσεων βελτιστοποίησης για την ΕΕΛ Ιωαννίνων.

Οι επιμέρους στόχοι διαμορφώνονται ως εξής:

1. Να αποτυπωθεί το θεωρητικό και κανονιστικό πλαίσιο της σύγχρονης διαχείρισης αστικών λυμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα, με έμφαση στις απαιτήσεις παρακολούθησης που εισάγει η αναθεωρημένη Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019.
2. Να παρουσιαστούν συστηματικά οι υφιστάμενες τεχνολογίες παρακολούθησης ΕΕΛ (συμβατικοί αισθητήρες, συστήματα SCADA, τηλεμετρία, IoT) και οι περιορισμοί τους.
3. Να αναλυθούν σε βάθος οι αρχές λειτουργίας των τεχνολογιών οπτικών ινών (DTS, DAS, DSS, FBG) και οι εφαρμογές τους σε υποδομές ύδρευσης-αποχέτευσης διεθνώς, μέσα από ανασκόπηση της σχετικής επιστημονικής βιβλιογραφίας.
4. Να περιγραφεί αναλυτικά η υφιστάμενη κατάσταση της ΕΕΛ Ιωαννίνων - τεχνικά χαρακτηριστικά, δίκτυο, συστήματα παρακολούθησης, προκλήσεις λειτουργίας- βάσει δημόσια διαθέσιμων πηγών.
5. Να διατυπωθεί ένα εννοιολογικό πλαίσιο (framework) ενσωμάτωσης συστημάτων οπτικών ινών στην ΕΕΛ Ιωαννίνων, με προσδιορισμό πιθανών σημείων εγκατάστασης, αναμενόμενων οφελών και κρίσιμων περιορισμών.

6. Να αξιολογηθεί συγκριτικά η προτεινόμενη λύση έναντι της υφιστάμενης και σχεδιαζόμενης συμβατικής τηλεμετρίας, ως προς λειτουργικά, οικονομικά και θεσμικά κριτήρια.
7. Τις προοπτικές μελλοντικής εξέλιξης των συστημάτων “έξυπνης” περιβαλλοντικής παρακολούθησης

1.7 Ερευνητικά ερωτήματα

Η εργασία απαντά στα ερωτήματα:

1. Ποιες κατηγορίες οπτικών αισθητήρων μπορούν να εφαρμοστούν στη διαχείριση λυμάτων;
2. Σε ποιες διεργασίες μπορούν να προσφέρουν μετρήσιμη βελτίωση;
3. Ποιοι παράγοντες περιορίζουν την ευρεία εφαρμογή τους;

1.8 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η παρούσα εργασία ακολουθεί τη μεθοδολογία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, με στόχο τη διερεύνηση, καταγραφή και αξιολόγηση της υπάρχουσας επιστημονικής γνώσης σχετικά με την εφαρμογή οπτικών ινών στη διαχείριση και παρακολούθηση λυμάτων. Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου δικαιολογείται από τη φύση του αντικειμένου, καθώς η εφαρμογή των οπτικών ινών στον τομέα αυτό βρίσκεται ακόμη σε στάδιο εξελισσόμενης ανάπτυξης, και η συσσωρευμένη εμπειρία αποτυπώνεται κυρίως σε επιστημονικά άρθρα, τεχνικές μελέτες, ευρωπαϊκές οδηγίες και εφαρμοσμένες περιπτώσεις.

Η συλλογή του υλικού πραγματοποιήθηκε μέσω διεθνών επιστημονικών βάσεων δεδομένων (Scopus, Google Scholar, ScienceDirect) καθώς και μέσω ελληνικών πηγών, όπως τεχνικές εκθέσεις οργανισμών ύδρευσης και αποχέτευσης, διπλωματικές εργασίες και επίσημες κρατικές και ευρωπαϊκές κατευθυντήριες οδηγίες. Για την επιλογή των πηγών εφαρμόστηκαν κριτήρια εγκυρότητας, επικαιρότητας,

επιστημονικής τεκμηρίωσης και συνάφειας με το αντικείμενο της μελέτης (Snyder H. , 2019).

Και διακρίνονται σε:

- οι βασικές τεχνολογικές αρχές λειτουργίας των οπτικών ινών,
- οι εφαρμογές τους σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων,
- τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της τεχνολογίας,
- οι τάσεις και προοπτικές για μελλοντική αξιοποίηση.

Η μεθοδολογική αυτή προσέγγιση επιτρέπει την ολιστική κατανόηση του ζητήματος, χωρίς να απαιτείται πρωτογενής πειραματική ή μετρητική διαδικασία.

1.9 Δομή της Εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια, τα οποία αναπτύσσονται με τρόπο που διευκολύνει τη σταδιακή κατανόηση του θεωρητικού υποβάθρου και των τεχνολογικών εφαρμογών.

- Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο και ο σκοπός της εργασίας, καθώς και η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε.
- Το **Κεφάλαιο 2** περιγράφει τη διαδικασία διαχείρισης και επεξεργασίας λυμάτων, με αναφορά στις βασικές φάσεις λειτουργίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων και το θεωρητικό και θεσμικό πλαίσιο.
- Το **Κεφάλαιο 3** εξετάζει τη σύγκριση των οπτικών ινών με συμβατικές μεθόδους παρακολούθησης και ελέγχου, αναδεικνύοντας πλεονεκτήματα και προκλήσεις και αναλύει σε βάθος τις αρχές λειτουργίας των συστημάτων οπτικών ινών.
- Το **Κεφάλαιο 4** αναλύει μεθοδολογία της έρευνας.
- Το **Κεφάλαιο 5** εξετάζει την συμβατική διαχείριση στα έξυπνα συστήματα παρακολούθησης.
- Το **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζει τα καινοτόμα συστήματα παρακολούθησης στη ΕΕΛ.

Η δομή αυτή υποστηρίζει τη παρουσίαση της γνώσης και επιτρέπει τη σταδιακή κατανόηση από τη θεωρία στην εφαρμογή.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΛΥΜΑΤΩΝ

2.4 Ορισμός και κατηγοριοποίηση λυμάτων

Η ανθρώπινη χρήση νερού έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή υγρών αποβλήτων που προέρχονται από οικιακές, βιομηχανικές και διάφορες άλλες δραστηριότητες. Αυτά τα απόβλητα αποτελούνται κυρίως από περίπου 99% νερό, ενώ το υπόλοιπο 1% αποτελείται από στερεά. Χαρακτηρίζονται από παράγοντες όπως ο ρυθμός ροής, ο όγκος, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες, η χημική σύνθεση και η παρουσία μικροοργανισμών. Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν τον τρόπο διαχείρισης και επεξεργασίας των αποβλήτων για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. (Inc. Metcalf & Eddy, 2013). Η σύστασή τους εξαρτάται από την προέλευση, τις συνθήκες συλλογής, τη χρήση του νερού και τις λειτουργικές διαδικασίες που παίρνουν μέρος στα συστήματα αποχέτευσης. Γίνεται διάκριση μεταξύ πέντε βασικών κατηγοριών λυμάτων σε:

- Αστικά λύματα (domestic wastewater): προέρχονται από κατοικίες ξενοδοχεία και εμπορικές δραστηριότητες και δημόσιες εγκαταστάσεις.
- Βιομηχανικά λύματα (industrial wastewater): περιέχουν οργανικούς και ανόργανους ρύπους και ενδέχεται να είναι τοξικά.
- Υγρά γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα που προέρχονται από τις γεωργικές και εντατικές κτηνοτροφικές δραστηριότητες.
- Όμβρια ύδατα (stormwater): συλλέγονται από επιφάνειες και οδικά συστήματα.
- Τα νερά διήθησης και εισροής είναι νερό που εισέρχεται στο αποχετευτικό σύστημα από το έδαφος. Τα νερά διήθησης έρχονται μέσα από ρωγμές, τρύπες ή διαρροές στους σωλήνες ή τους τοίχους. Τα νερά εισροής είναι το νερό της βροχής που ρέει στους σωλήνες αποχέτευσης που προορίζονται για τη μεταφορά μόνο λυμάτων.

Η διαχείριση όλων των παραπάνω κατηγοριών απαιτεί προσαρμοσμένα συστήματα επεξεργασίας και παρακολούθησης, καθώς οι ιδιότητες των λυμάτων παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα.

Η οδηγία 91/271/ΕΟΚ, η οποία θεσπίστηκε στις 21 Μαΐου 1991, θεσπίζει ολοκληρωμένους κανονισμούς για τη συλλογή, την επεξεργασία και τη διάθεση αστικών και βιομηχανικών λυμάτων. Ο κύριος στόχος της είναι η ελαχιστοποίηση της

περιβαλλοντικής βλάβης που προκαλείται από την απόρριψη λυμάτων. Τα συστήματα αποχέτευσης έχουν σχεδιαστεί για την αποτελεσματική μεταφορά αποβλήτων από οικιακές, εμπορικές και βιομηχανικές πηγές σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Σε αυτές τις μονάδες επεξεργασίας, χρησιμοποιούνται προηγμένες τεχνικές για την τροποποίηση, τη μείωση ή την εξάλειψη των ρύπων που υπάρχουν στα λύματα. Η σωστή επεξεργασία διασφαλίζει ότι οι επιβλαβείς ρύποι απομακρύνονται πριν το νερό απελευθερωθεί πίσω στα φυσικά υδάτινα σώματα, προστατεύοντας έτσι τα υδάτινα οικοσυστήματα, προστατεύοντας την ποιότητα του νερού και προωθώντας την περιβαλλοντική βιωσιμότητα για τις μελλοντικές γενιές.

2.5 Προσδιορισμός βασικών παραμέτρων των αστικών λυμάτων.

Τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνουν μια σειρά φυσικών, χημικών και βιολογικών (микροβιολογικών) ιδιοτήτων που είναι απαραίτητες για την κατανόηση, την αξιολόγηση και τη διαχείριση των συστημάτων λυμάτων.

2.5.1 Φυσικά χαρακτηριστικά.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνουν παραμέτρους όπως η περιεκτικότητα σε στερεά, η θερμοκρασία, η οσμή, το χρώμα, η θολότητα και η πυκνότητα, καθένα από τα οποία παρέχει ζωτικές ενδείξεις σχετικά με τη φύση και την κατάσταση των αποβλήτων.

- Τα συνολικά στερεά αντιπροσωπεύουν τη συνολική ποσότητα στερεού υλικού που υπάρχει στα απόβλητα μετά την εξάτμισή τους. Αυτή η μέτρηση είναι κρίσιμη επειδή υποδεικνύει το συνολικό στερεό φορτίο στα λύματα, το οποίο μπορεί να επηρεάσει τις διαδικασίες επεξεργασίας. Τα συνολικά στερεά υποδιαιρούνται σε αιωρούμενα στερεά, τα οποία είναι σωματίδια μεγαλύτερα από 1 μικρόμετρο που

μπορούν να διαχωριστούν με καθίζηση, και σε διηθήσιμα στερεά, τα οποία είναι μικρότερα από 1 μικρόμετρο και διέρχονται από φίλτρα. Επιπλέον, τα καθιζάνοντα στερεά, που συνήθως υπερβαίνουν τα 10 μικρόμετρα, είναι σωματίδια που τείνουν να καθιζάνουν από τα απόβλητα με την πάροδο του χρόνου, επηρεάζοντας τα στάδια διαύγασης και καθίζησης.

- Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των λυμάτων, κυμαινόμενη γενικά από 10°C έως 21°C υπό κανονικές συνθήκες. Μπορεί να επηρεαστεί από την προσθήκη ζεστού νερού κατά τη χρήση, η οποία επηρεάζει τη διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό, έναν κρίσιμο παράγοντα για την αερόβια μικροβιακή δραστηριότητα. Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν τις βιολογικές διεργασίες, ενώ οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να επιβραδύνουν την μικροβιακή υποβάθμιση, επηρεάζοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας.
- Η οσμή παράγεται από αέρια που απελευθερώνονται κατά την αποσύνθεση της οργανικής ύλης μέσα στα απόβλητα. Καθώς η αποσύνθεση εξελίσσεται, η ένταση των οσμών συχνά αυξάνεται, κυρίως λόγω ενώσεων όπως το υδρόθειο και οι θειόλες, οι οποίες έχουν έντονες, δυσάρεστες οσμές. Το χρώμα των υγρών αποβλήτων συνήθως ξεκινά με καφέ-γκρι απόχρωση όταν είναι φρέσκα, αλλά καθώς συμβαίνει αναερόβια αποσύνθεση, σκουραίνει σε μαύρο, υποδεικνύοντας συνεχιζόμενες βιολογικές αλλαγές.
- Η θολότητα μετρά τη θολότητα ή την θολερότητα των λυμάτων που προκαλείται από υπολειμματικά σωματίδια και κολλοειδή, τα οποία μπορούν να εμποδίσουν τη διείσδυση του φωτός και να επηρεάσουν την ποιότητα του νερού.
- Η πυκνότητα, η οποία είναι παρόμοια με αυτή του καθαρού νερού όταν απουσιάζουν βιομηχανικά απόβλητα, επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο τα απόβλητα καθιζάνουν και διαχωρίζονται κατά τη διάρκεια των διαδικασιών επεξεργασίας. Συλλογικά, αυτά τα φυσικά χαρακτηριστικά είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της κατάστασης των υγρών αποβλήτων και τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών επεξεργασίας λυμάτων.

2.5.2 Χημική και μικροβιολογική σύσταση λυμάτων

Τα λύματα χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου (BOD, COD), άζωτο, φώσφορο, αιωρούμενα στερεά, καθώς και πιθανή παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών και ιχνοποσοτήτων φαρμακευτικών ουσιών (Vicent Hernández-Chover, 2018). Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να επηρεάσουν τη βιολογική επεξεργασία, την ποιότητα του παραγόμενου επεξεργασμένου νερού κι την ασφάλεια διάθεσης σε φυσικούς αποδέκτες. Η συνεχής παρακολούθηση των παραμέτρων αυτών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο λειτουργικής διαχείρισης.

1. Οι οργανικές ουσίες αποτελούν περίπου το 40% των αστικών στερεών αποβλήτων (MSW) και αντιπροσωπεύουν περίπου το 75% της σωματιδιακής ύλης που βρίσκεται στα υγρά αστικά απόβλητα. Αυτά τα οργανικά υλικά είναι κυρίως πρωτεΐνες, οι οποίες αποτελούν περίπου το 40-60%, υδατάνθρακες που κυμαίνονται από 25-50%, μαζί με έλαια, λίπη και ουρία. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλλουν περαιτέρω στη μόλυνση των λυμάτων εισάγοντας διάφορες ουσίες όπως απορρυπαντικά, φαινολικές ενώσεις, φυτοφάρμακα, επιφανειοδραστικές ουσίες και οργανοχλωρικές ενώσεις, προσθέτοντας πολυπλοκότητα στη σύνθεση των λυμάτων.

Για την αξιολόγηση της οργανικής περιεκτικότητας στα λύματα, χρησιμοποιούνται διάφορες αναλυτικές μέθοδοι. Μία από τις πιο συνηθισμένες είναι:

- Η Βιοχημική Απαιτούμενη Οξυγόνο (BOD), ιδιαίτερα η πενθήμερη δοκιμή BOD (BOD₅). Αυτή η μέθοδος μετρά την ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου που καταναλώνουν οι μικροοργανισμοί για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης σε μια περίοδο πέντε ημερών σε θερμοκρασία 20°C. Η αλλαγή στα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (DO) υποδεικνύει το υπάρχον οργανικό φορτίο. Το BOD συχνά διαιρείται σε ανθρακούχο BOD (C-BOD), το οποίο στοχεύει ειδικά σε οργανικές ενώσεις άνθρακα, και σε αζωτούχο BOD (N-BOD), το οποίο αξιολογεί οργανικές ενώσεις αζώτου.
- Το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) είναι μια άλλη κρίσιμη παράμετρος που εκτιμά την ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την χημική οξείδωση

οργανικών ουσιών στα λύματα, παρέχοντας μια γρήγορη αξιολόγηση των επιπέδων οργανικής ρύπανσης.

- Ο Συνολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC) ποσοτικοποιεί τη συνολική ποσότητα άνθρακα που υπάρχει στις οργανικές ενώσεις, χρησιμεύοντας ως ένας ολοκληρωμένος δείκτης της ποιότητας του νερού. Πρόσθετες παράμετροι περιλαμβάνουν το
- Συνολικό Ζήτημα Οξυγόνου (TOD)
- Το θεωρητικό Ζήτημα Οξυγόνου (THD), οι οποίες βοηθούν στην κατανόηση των συνολικών απαιτήσεων οξυγόνου για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης.

2. Όσον αφορά την ανόργανη χημεία, σημαντικές παράμετροι περιλαμβάνουν:

- Την αλκαλικότητα, το pH και τις συγκεντρώσεις χλωριούχων. Τα επίπεδα χλωριούχων είναι ιδιαίτερα σημαντικά κατά την αξιολόγηση των επεξεργασμένων λυμάτων για σκοπούς επαναχρησιμοποίησης, ειδικά σε εφαρμογές όπως η άρδευση, όπου η υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριούχα μπορεί να δημιουργήσει περιβαλλοντικές και γεωργικές ανησυχίες. Η παρακολούθηση αυτών των ανόργανων παραμέτρων διασφαλίζει ότι τα λύματα χαρακτηρίζονται και υποβάλλονται σε κατάλληλη επεξεργασία ώστε να πληρούν τα πρότυπα ασφαλείας και περιβάλλοντος πριν από την επαναχρησιμοποίηση ή την απόρριψη.
- Οι αζωτούχες ενώσεις που υπάρχουν στα λύματα περιλαμβάνουν μια ποικιλία ουσιών που χρησιμεύουν ως κρίσιμοι δείκτες των επιπέδων θρεπτικών συστατικών και της έκτασης της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης. Αυτές περιλαμβάνουν οργανικό άζωτο, ελεύθερη αμμωνία, ολικό άζωτο, νιτρικά και νιτρώδη. Η παρακολούθηση αυτών των ενώσεων βοηθά στην αξιολόγηση της βιολογικής δραστηριότητας εντός των λυμάτων και της προόδου των διαδικασιών επεξεργασίας.
- Οι φωσφορικές ενώσεις, οι οποίες μετρούν την παρουσία θρεπτικών συστατικών, αξιολογούνται στις οξειδωμένες μορφές τους - δηλαδή ανόργανο, οργανικό και ολικό φώσφορο - για τον προσδιορισμό των επιπέδων οξείδωσης και του φορτίου θρεπτικών συστατικών.

- Η παρουσία θεικών αλάτων (SO_4^{2-}) είναι επίσης σημαντική. Η αξιολόγησή τους ενημερώνει για πιθανά προβλήματα οσμής και τη σκοπιμότητα της επεξεργασίας ιλύος, καθώς οι υψηλές συγκεντρώσεις θεικών αλάτων μπορούν να οδηγήσουν σε δυσάρεστες οσμές κατά την αναερόβια χώνευση.
- Βαρέα μέταλλα όπως ο σίδηρος (Fe), το μαγνήσιο (Mg), το νάτριο (Na), το κάλιο (K), το παλλάδιο (Pd), το χρώμιο (Cr), ο χαλκός (Cu), ο υδράργυρος (Hg), το νικέλιο (Ni), το αρσενικό (As) και ο ψευδάργυρος (Zn) είναι κρίσιμες παράμετροι για την ανάλυση των λυμάτων. Οι συγκεντρώσεις τους υποδεικνύουν πιθανή τοξικότητα και επηρεάζουν τις αποφάσεις σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση ή την απόρριψη των επεξεργασμένων λυμάτων. Ορισμένα ιχνοστοιχεία, συμπεριλαμβανομένου του ψευδαργύρου και του χαλκού, είναι απαραίτητα για βιολογικές διεργασίες, ενώ άλλα, όπως ο υδράργυρος και το αρσενικό, ενέχουν σημαντικούς κινδύνους για την υγεία. Η ανίχνευση και η ρύθμιση αυτών των μετάλλων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής ασφάλειας και της συμμόρφωσης με τα πρότυπα.

3. Τα λύματα διαθέτουν ξεχωριστά βιολογικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν σημαντικά την επεξεργασία τους και τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησής τους. Μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών είναι:

Η παρουσία διαφόρων μικροοργανισμών συμπεριλαμβανομένων ιών, βακτηρίων, ελμινθών και πρωτόζωων- είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αυτοί οι μικροοργανισμοί μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία και να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών επεξεργασίας. Για την αξιολόγηση της ασφάλειας και της ποιότητας των λυμάτων, δείκτες όπως τα ολικά κολοβακτηρίδια (TC) και τα κοπρανώδη κολοβακτηρίδια (FC) χρησιμοποιούνται συστηματικά για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της απολύμανσης και της πιθανής παρουσίας παθογόνων οργανισμών. Αυτοί οι δείκτες βοηθούν στον προσδιορισμό του κατά πόσον τα λύματα έχουν υποστεί επαρκή επεξεργασία για την πρόληψη της μετάδοσης ασθενειών.

Οι αξιολογήσεις τοξικότητας διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας των λυμάτων. Οι αξιολογήσεις της χρόνιας, οξείας και συνολικής

τοξικότητας βοηθούν στον εντοπισμό επιβλαβών ουσιών που μπορεί να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ο εντοπισμός και η ποσοτικοποίηση του μικροβιακού περιεχομένου είναι απαραίτητη για την προστασία τόσο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας όσο και του κοινού από παθογόνους μικροοργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων ιών, βακτηρίων, πρωτόζωων και ελμινθών. Αυτά τα παθογόνα είναι υπεύθυνα για μια σειρά ασθενειών, όπως η δυσεντερία, ο τύφος και η χολέρα, οι οποίες μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία.

Η κοπρανώδης μόλυνση υποδεικνύεται συνήθως από την υψηλή αφθονία κολοβακτηριδίων στα λύματα, με κάθε άτομο να παράγει δισεκατομμύρια από αυτά τα βακτήρια καθημερινά. Αυτό το υψηλό μικροβιακό φορτίο υποδηλώνει πιθανούς κινδύνους για την υγεία και την ανάγκη για αποτελεσματική επεξεργασία. Για την ακριβή παρακολούθηση της ποιότητας του νερού, χρησιμοποιούνται διάφοροι μικροβιακοί δείκτες, συμπεριλαμβανομένων των ολικών κολοβακτηριδίων, των κοπρανωδών κολοβακτηριδίων, των εντερόκοκκων και του *Escherichia coli* (*E. coli*).

Επιπλέον, η χρήση κολιφάγου MS2 ως μέσο ελέγχου, ειδικά μετά από διαδικασίες απολύμανσης, παρέχει ένα επιπλέον επίπεδο διασφάλισης για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του νερού και βοηθά στη διατήρηση των περιβαλλοντικών προτύπων υγείας.

Διεξάγονται αξιολογήσεις τοξικότητας, συμπεριλαμβανομένων δοκιμών χρόνιας και οξείας τοξικότητας, για την αξιολόγηση της ασφάλειας των λυμάτων για την περιβαλλοντική και ανθρώπινη υγεία. Η κατανόηση των επιπέδων τοξικότητας διασφαλίζει ότι οι διαδικασίες επεξεργασίας μειώνουν επαρκώς τις επιβλαβείς ουσίες. Η αναγνώριση μικροοργανισμών, ιδίως παθογόνων βακτηρίων, είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των υποδομών και της δημόσιας υγείας, καθώς λοιμώξεις όπως η δυσεντερία, ο τύφος, η χολέρα και διάφορες διαρροϊκές ασθένειες μπορούν να προκύψουν από την έκθεση σε μολυσμένο νερό. Αν και τα κολοβακτηρίδια είναι γενικά αβλαβή και παράγονται σε μεγάλες ποσότητες από τον άνθρωπο, η ανίχνευσή τους χρησιμεύει ως ζωτικό προειδοποιητικό σημάδι πιθανής παθογόνου μόλυνσης, υπογραμμίζοντας τη σημασία της μικροβιακής παρακολούθησης στην αποτελεσματική διαχείριση των λυμάτων.

2.6 Στάδια συμβατικής επεξεργασίας λυμάτων

2.6.1 Προεπεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία

Η προεπεξεργασία περιλαμβάνει τη μηχανική εσχάρωση για την απομάκρυνση ογκωδών στερεών, την εξάμμωση για την κατακράτηση αδρανών υλικών (άμμος, χαλίκι) και συχνά τη λιποσυλλογή για την απομάκρυνση επιπλέοντων λιπών και ελαίων. Ακολουθεί η πρωτοβάθμια καθίζηση, κατά την οποία, μέσω βαρύτητας, κατακρημνίζονται τα αιωρούμενα στερεά σε ειδικά δεξαμενές καθίζησης, μειώνοντας το φορτίο BOD₅ και TSS κατά περίπου 25-40% πριν την είσοδο στο βιολογικό στάδιο.

2.6.2 Δευτεροβάθμια (βιολογική) επεξεργασία

Το κεντρικό στάδιο της συμβατικής επεξεργασίας είναι η βιολογική οξείδωση του οργανικού φορτίου, συνηθέστερα μέσω της μεθόδου ενεργού ιλύος (activated sludge process). Στη μέθοδο αυτή, μικροβιακή βιομάζα αναπτύσσεται σε δεξαμενές αερισμού, καταναλώνοντας το οργανικό φορτίο του λύματος παρουσία οξυγόνου που παρέχεται μέσω μηχανικού ή διαχυτικού αερισμού. Η βιομάζα διαχωρίζεται στη συνέχεια από το επεξεργασμένο υγρό σε δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης, με μέρος της να ανακυκλοφορεί (recycled activated sludge) και μέρος να απομακρύνεται ως περίσσεια ιλύς (waste activated sludge) προς περαιτέρω επεξεργασία.

Παραλλαγές της μεθόδου -όπως τα συστήματα παρατεταμένου αερισμού (extended aeration), τα συστήματα διαλείποντος βιολογικού αντιδραστήρα (Sequencing Batch Reactor, SBR) ή τα συστήματα βιολογικής απομάκρυνσης θρεπτικών (Biological Nutrient Removal, BNR)- επιτρέπουν, πέραν της απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, και την ταυτόχρονη απονιτροποίηση και νιτροποίηση για τον έλεγχο του αζώτου, καθώς και τη βιολογική ή χημική απομάκρυνση φωσφόρου.

2.6.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία και απολύμανση

Σε περιπτώσεις όπου ο τελικός αποδέκτης είναι ευαίσθητος (π.χ. λίμνη, κλειστός κόλπος, περιοχή με χρήσεις αναψυχής ή άρδευσης), εφαρμόζεται τριτοβάθμια επεξεργασία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει διήθηση, χημική κατακρήμνιση φωσφόρου, προηγμένη απομάκρυνση αζώτου, και απολύμανση (χλωρίωση, υπεριώδης ακτινοβολία UV ή οζόνωση) πριν την τελική διάθεση ή την επαναχρησιμοποίηση του νερού, π.χ. για άρδευση.

2.6.4 Τεταρτοβάθμια επεξεργασία

Η τεταρτοβάθμια επεξεργασία επαναχρησιμοποίησης νερού εκτείνονται πέρα από τις παραδοσιακές βιολογικές μεθόδους, ενσωματώνοντας μια ποικιλία φυσικών και χημικών διεργασιών για την αποτελεσματική απομάκρυνση διαλυμένων ουσιών και αιωρούμενων σωματιδίων από τα λύματα. Τεχνικές όπως η καθίζηση και η διήθηση χρησιμοποιούνται για την καθίζηση και τη δέσμευση στερεών, ενώ η πήξη βοηθά στη συσσωμάτωση μικροσκοπικών σωματιδίων για ευκολότερη απομάκρυνση. Η ανταλλαγή ιόντων και η προσρόφηση ενεργού άνθρακα στοχεύουν σε συγκεκριμένους διαλυμένους ρύπους, βελτιώνοντας την καθαρότητα του νερού. Οι διεργασίες μεμβράνης, συμπεριλαμβανομένης της υπερδιήθησης, της νανοδιήθησης και της αντίστροφης όσμωσης, παρέχουν υψηλά επίπεδα καθαρισμού διαχωρίζοντας φυσικά τις ακαθαρσίες σε μοριακό επίπεδο.

Η επεξεργασία λυμάτων πραγματοποιείται σε τέσσερα διαδοχικά στάδια, καθένα με διαφορετικό στόχο. Αρχικά, στην πρωτοβάθμια επεξεργασία, εφαρμόζονται μέθοδοι όπως η εσχάρωση και η καθίζηση, με σκοπό την αφαίρεση των μεγάλων στερεών. Στη συνέχεια, η δευτεροβάθμια επεξεργασία βασίζεται σε βιολογικές διεργασίες που στοχεύουν στη μείωση του οργανικού φορτίου. Το τρίτο στάδιο, η τριτοβάθμια επεξεργασία, περιλαμβάνει χημικές, βιολογικές ή μεμβρανικές μεθόδους με στόχο την αφαίρεση θρεπτικών στοιχείων και μικρορύπων. Τέλος, η τεταρτοβάθμια επεξεργασία, η οποία επίσης συνδυάζει χημικές και βιολογικές διεργασίες, αποσκοπεί στην

περαιτέρω απομάκρυνση των μικρορύπων που τυχόν παραμένουν μετά τα προηγούμενα στάδια.

Στάδιο	Περιγραφή	Στόχος
Πρωτοβάθμια επεξεργασία	Εσχάρωση, καθίζηση	Αφαίρεση μεγάλων στερεών
Δευτεροβάθμια επεξεργασία	Βιολογικές διεργασίες	Μείωση οργανικού φορτίου
Τριτοβάθμια επεξεργασία	Χημική, βιολογική ή μεμβρανική επεξεργασία	Αφαίρεση θρεπτικών και μικρορύπων
Τεταρτοβάθμια επεξεργασία	Χημική, βιολογική επεξεργασία	Απομάκρυνση μικρορρύπων

Πίνακας 1 Στάδια επεξεργασίας

2.6.5 Διαχείριση ιλύος

Η ιλύς που παράγεται στα διάφορα στάδια (πρωτοβάθμια, βιολογική περίσσεια) αποτελεί από μόνη της ένα ρεύμα με σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς περιέχει υψηλή συγκέντρωση οργανικού υλικού, παθογόνων και, ενίοτε, βαρέων μετάλλων. Η διαχείρισή της περιλαμβάνει συνήθως πάχυνση, χώνευση (αναερόβια ή αερόβια, με πιθανή παραγωγή βιοαερίου), αφυδάτωση (φυγοκέντρωση, ταινιοφιλτρόπρεσα) και τελική διάθεση/αξιοποίηση, με ολοένα συχνότερη επιλογή την ηλιακή ξήρανση, όπως συμβαίνει πλέον και στην ΕΕΛ Ιωαννίνων, με στόχο τη μείωση όγκου και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας μέσω αξιοποίησης της ξηραμένης ιλύος (π.χ. ως εδαφοβελτιωτικό ή καύσιμο).

2.12 Θεσμικό πλαίσιο Ευρωπαϊκής Ένωσης: από την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ στη νέα Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019

2.12.1 Οδηγία 91/271/ΕΟΚ

Το θεμέλιο του πλαισίου για τη διαχείριση αστικών λυμάτων υπήρξε επί τρεις δεκαετίες η (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, 1991) «για την επεξεργασία αστικών λυμάτων», η οποία καθόριζε υποχρεώσεις συλλογής και επεξεργασίας ανάλογα με το μέγεθος του οικισμού (εκφρασμένο σε ισοδύναμο πληθυσμό) και την ευαισθησία του αποδέκτη. Για οικισμούς άνω των 10.000-15.000π. που διαθέτουν σε ευαίσθητες περιοχές, απαιτούνταν αυστηρότερη επεξεργασία με απομάκρυνση θρεπτικών, ενώ για τη «συνήθη» δευτεροβάθμια επεξεργασία η οδηγία έθετε ενδεικτικά όρια εκροής της τάξης των 25 mg/l BOD₅, 125 mg/l COD και 35 mg/l TSS (ή αντίστοιχα ποσοστά μείωσης), όρια που αποτέλεσαν και τον πυρήνα της εθνικής νομοθεσίας εναρμόνισης.

2.12.2 Η αναθεώρηση: Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019

Στις 27 Νοεμβρίου 2024 εκδόθηκε η νέα (Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019, 2024) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, γνωστή διεθνώς ως αναθεωρημένη Urban Waste Water Treatment Directive (UWWTD), η οποία αντικατέστησε πλήρως την (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, 1991) και τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2025. Πρόκειται για ουσιαστική αναδιατύπωση, με αρκετά σημεία ιδιαίτερα συναφή προς το αντικείμενο της παρούσας εργασίας:

- Διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής. Η υποχρέωση συλλογής και επεξεργασίας επεκτείνεται πλέον και σε μικρότερους οικισμούς, άνω του 1.000 ισοδύναμου πληθυσμού, ενισχύοντας σημαντικά τον αριθμό των εγκαταστάσεων που εμπίπτουν στο ρυθμιστικό πλαίσιο.
- Τεταρτοβάθμια επεξεργασία και μικρορύποι. Θεσπίζεται, για πρώτη φορά σε αυτή την κλίμακα, υποχρέωση τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας για την απομάκρυνση μικρορύπων (κυρίως φαρμακευτικών και καλλυντικών ουσιών) στις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, με υποχρεωτική εφαρμογή της και σε κάθε περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων.
- Διευρυμένη Ευθύνη Παραγωγού (Extended Producer Responsibility). Καινοτόμο στοιχείο της αναθεώρησης είναι ότι οι παραγωγοί συγκεκριμένων προϊόντων

(κυρίως φαρμακευτικών και καλλυντικών, όπως προσδιορίζονται στο σχετικό Παράρτημα της οδηγίας) υποχρεούνται, από το 2028, να συνεισφέρουν στη χρηματοδότηση μέρους του λειτουργικού και επενδυτικού κόστους της τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας — μεταφέροντας έτσι μέρος του κόστους από τους δημότες/καταναλωτές προς τους παραγωγούς των ρυπογόνων ουσιών.

- Ενεργειακή ουδετερότητα και κλιματική προσαρμογή. Τίθενται στόχοι σταδιακής μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και βελτίωσης του ενεργειακού ισοζυγίου των δραστηριοτήτων συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων, με προσανατολισμό προς την ενεργειακή αυτονομία/ουδετερότητα του κλάδου.
- Ρητή αναφορά στην ψηφιοποίηση. Η οδηγία προωθεί ρητά τη βέλτιστη αξιοποίηση της ψηφιοποίησης στο πλαίσιο ολοκληρωμένου σχεδιασμού διαχείρισης αστικών λυμάτων.

2.13 Εθνικό θεσμικό πλαίσιο (Ελλάδα)

Η ενσωμάτωση της (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, 1991) στην ελληνική έννομη τάξη έγινε με την Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ 5673/400/1997, 1997) «Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων» (ΦΕΚ Β' 192/14.3.1997), η οποία εξακολουθεί να αποτελεί τον πυρήνα της εθνικής νομοθεσίας, όπως έχει τροποποιηθεί. Η ΚΥΑ αυτή τροποποιήθηκε διαδοχικά από:

την ΚΥΑ 19661/1982/1999 (ΦΕΚ Β' 1811), που καθόρισε τον κατάλογο ευαίσθητων περιοχών για τη διάθεση αστικών λυμάτων·

την ΚΥΑ 48392/939/2002 (ΦΕΚ Β' 405), που συμπλήρωσε τον παραπάνω κατάλογο.

Παράλληλα, το ευρύτερο πλαίσιο διαχείρισης υδατικών πόρων στο οποίο εντάσσεται η διαχείριση λυμάτων διαμορφώνεται από:

τον Ν. 3199/2003 «Προστασία και διαχείριση των υδάτων», που εναρμόνισε την ελληνική νομοθεσία με την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ·

το Π.Δ. 51/2007, που εξειδίκευσε μέτρα και διαδικασίες για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων σε συμμόρφωση με την ίδια οδηγία·

την ΚΥΑ 145116/2011 (ΦΕΚ Β' 354/8.3.2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων»,

ιδιαίτερα κρίσιμη διάταξη δεδομένου ότι η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων (π.χ. για άρδευση) αποτελεί ζήτημα που άπτεται άμεσα και της ΕΕΛ Ιωαννίνων.

2.14 Προκλήσεις της συμβατικής διαχείρισης λυμάτων

2.14.1 Ενεργειακό κόστος

Η επεξεργασία λυμάτων είναι εγγενώς ενεργοβόρα διαδικασία. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι ΕΕΛ εκτιμάται ότι καταναλώνουν περίπου το 3-4% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας . Σε επίπεδο λειτουργικού κόστους μεμονωμένων εγκαταστάσεων, η ηλεκτρική ενέργεια αντιστοιχεί συνήθως στο 25-40% του συνολικού λειτουργικού κόστους μιας ΕΕΛ, με αναφορές να κυμαίνονται από 25-40% στις ΗΠΑ έως 26% στην Ισπανία και 25% στην Πορτογαλία (Silva, 2022)· εντός της ίδιας της εγκατάστασης, ο αερισμός της δεξαμενής ενεργού ιλύος αποτελεί συνήθως το μεγαλύτερο μεμονωμένο κέντρο κατανάλωσης, φτάνοντας το 25-60% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης της μονάδας. Τα μεγέθη αυτά εξηγούν γιατί η ενεργειακή βελτιστοποίηση και, κατ' επέκταση, κάθε τεχνολογία παρακολούθησης που τη διευκολύνει αποκτά αυξανόμενη οικονομική βαρύτητα, ιδίως υπό το πρίσμα των στόχων ενεργειακής ουδετερότητας που θέτει η νέα Οδηγία 2024/3019.

2.14.2 Κλιματική αλλαγή και γήρανση υποδομών

Η αύξηση της συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων επιβαρύνει τόσο τα δίκτυα αποχέτευσης έχουν αποτέλεσμα την υπερφόρτωση παντορροϊκών δικτύων όσο και τη λειτουργική σταθερότητα των ΕΕΛ. Παράλληλα, μεγάλο μέρος των υφιστάμενων υποδομών συλλογής και επεξεργασίας στην Ελλάδα και διεθνώς έχει κατασκευαστεί πριν από δεκαετίες, με αποτέλεσμα αυξημένο κίνδυνο βλαβών, διαρροών και εισροών/διεισδύσεων (infiltration/inflow).

2.14.3 Μεταβλητότητα φορτίων και καθυστερημένη ανίχνευση δυσλειτουργιών

Η ποιότητα και η ποσότητα των εισερχόμενων λυμάτων παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση σε ημερήσια, εποχιακή αλλά και έκτακτη βάση λόγω βροχόπτωσης που εισέρχεται σε παντοροϊκά δίκτυα, εποχιακού τουρισμού, ή βιομηχανικών απορρίψεων εκτός προδιαγραφών. Στη συμβατική διαχείριση, η παρακολούθηση αυτών των μεταβολών στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε περιοδική δειγματοληψία και εργαστηριακή ανάλυση, διαδικασία με σημαντική χρονική υστέρηση μεταξύ δειγματοληψίας και αποτελέσματος, με αποτέλεσμα δυσλειτουργίες να ανιχνεύονται συχνά αφού έχουν ήδη προκαλέσει επιπτώσεις στην ποιότητα εκροής ή απώλειες νερού/ενέργειας. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων ΕΕΛ, οι απαιτήσεις της νέας ευρωπαϊκής νομοθεσίας και η ανάγκη για βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης. Η αποτελεσματική διαχείριση των λυμάτων δεν εξαρτάται πλέον μόνο από τις διεργασίες επεξεργασίας, αλλά και από την ικανότητα συνεχούς και αξιόπιστης παρακολούθησης της λειτουργίας τους. Για τον λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνολογίες παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται σήμερα στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΕΕΛ

3.1 Η ανάγκη παρακολούθησης σε μια ΕΕΛ

Η παρακολούθηση σε μια ΕΕΛ εξυπηρετεί τρεις βασικούς σκοπούς: πρώτον, τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τους περιβαλλοντικούς όρους λειτουργίας (ποιότητα εκροής, όρια εκπομπών)· δεύτερον, τη λειτουργική βελτιστοποίηση (π.χ. ρύθμιση αερισμού, δοσολογία χημικών, διαχείριση ιλύος)· και τρίτον, την έγκαιρη ανίχνευση δυσλειτουργιών ή έκτακτων συμβάντων (υπερχειλίσσεις, διαρροές, βλάβες εξοπλισμού, μη αναμενόμενες φορτίσεις).

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς αυτούς έχουν εξελιχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, από απλά σημειακά όργανα μέτρησης έως ολοκληρωμένα ψηφιακά οικοσυστήματα. Στις πρώτες δεκαετίες λειτουργίας οργανωμένων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (δεκαετίες 1960-1980), η παρακολούθηση βασιζόταν σχεδόν αποκλειστικά σε χειροκίνητη δειγματοληψία και τοπική ανάγνωση οργάνων από προσωπικό βάρδιας, με ελάχιστη ή καθόλου αυτοματοποιημένη καταγραφή. Η εισαγωγή των πρώτων Προγραμματιζόμενων Λογικών Ελεγκτών (PLC) τη δεκαετία του 1980 επέτρεψε την αυτοματοποίηση συγκεκριμένων λειτουργιών (π.χ. έλεγχος αντλιών βάσει στάθμης), ενώ η ανάπτυξη προσωπικών υπολογιστών και τοπικών δικτύων τη δεκαετία του 1990 οδήγησε στην εμφάνιση των πρώτων συστημάτων SCADA, αρχικά περιορισμένων σε μεμονωμένες εγκαταστάσεις. Η ευρεία διάδοση του Διαδικτύου και των ασύρματων επικοινωνιών τη δεκαετία του 2000-2010 επέτρεψε την ανάπτυξη τηλεμετρίας σε επίπεδο ολόκληρου δικτύου, ενώ η τρέχουσα δεκαετία χαρακτηρίζεται από τη σύγκλιση IoT, τεχνητής νοημοσύνης και -όπως αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο- τεχνολογιών κατανεμημένης αισθητηριακής μέτρησης (Bello, 2023)

Η ελληνική εμπειρία, όπως αντανακλάται στην περίπτωση της ΔΕΥΑΙ, φαίνεται να ακολουθεί αντίστοιχα αντιστοιχία αυτή τη διεθνή πορεία, με τη μετάβαση από τοπικό έλεγχο σε δικτυακή τηλεμετρία και να βρίσκεται επί του παρόντος σε εξέλιξη, ενώ η μετάβαση προς πλήρως ψηφιοποιημένα.

Η κατανόηση της τυπικής τάξης μεγέθους κόστους συμβατικής οργανολογίας αποτελεί χρήσιμο σημείο αναφοράς για τις συγκρίσεις κόστους-οφέλους που ακολουθούν στα

επόμενα κεφάλαια. Ένας τυπικός online αναλυτής παραμέτρου (π.χ. αμμωνιακού αζώτου ή φωσφόρου) για χρήση σε ΕΕΛ κοστίζει συνήθως, συμπεριλαμβανομένης της απαιτούμενης περιοδικής συντήρησης και αναλωσίμων, ένα ποσό που κυμαίνεται σε βάθος πενταετίας σε αρκετές χιλιάδες ευρώ ανά σημείο μέτρησης, ενώ ένας απλούστερος αισθητήρας φυσικής παραμέτρου (θερμοκρασία, στάθμη, παροχή) έχει σαφώς χαμηλότερο κόστος κτήσης αλλά αντίστοιχη ανάγκη περιοδικής βαθμονόμησης και συντήρησης. Το άθροισμα αυτών των επιμέρους κοστολογήσεων, πολλαπλασιαζόμενο επί τον αριθμό των απαιτούμενων σημείων μέτρησης για την επίτευξη πυκνής κάλυψης ενός εκτεταμένου δικτύου, εξηγεί σε μεγάλο βαθμό το υψηλό συνολικό κόστος έργων τηλεμετρίας μεγάλης κλίμακας και αναδεικνύει το οικονομικό σκεπτικό πίσω από την αναζήτηση εναλλακτικών προσεγγίσεων με διαφορετική δομή κόστους.

3.2 Παραδοσιακά συστήματα παρακολούθησης διεργασιών

Οι ΕΕΛ βασίζονται ιστορικά σε ηλεκτροχημικούς και μηχανικούς αισθητήρες, οι οποίοι συχνά απαιτούν συχνή βαθμονόμηση, επηρεάζονται από διάβρωση και έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής σε επιβαρυνμένα περιβάλλοντα (Alexandra Virginia Bounegru, 2025).

Επιπλέον, οι περισσότερες ΕΕΛ πραγματοποιούν διακριτού τύπου δειγματοληψίες, γεγονός που δυσχεραίνει την αξιολόγηση δυναμικών μεταβολών.

3.3 Ανάγκη για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο

Η λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων βασίζεται σε ένα σύνολο φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, οι οποίες απαιτούν σταθερές συνθήκες για την ορθή απόδοση των συστημάτων. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η παροχή αέρα, η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, το pH και το οργανικό φορτίο μεταβάλλονται δυναμικά, επηρεάζοντας άμεσα την απόδοση της επεξεργασίας (Inc. Metcalf & Eddy, 2013). Για τον λόγο αυτό, η συνεχής παρακολούθηση σε πραγματικό

χρόνο αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στη διασφάλιση της λειτουργικής σταθερότητας και της ποιότητας του εξερχόμενου νερού.

Στις εγκαταστάσεις που δεν διαθέτουν συνεχή παρακολούθηση, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται χειροκίνητα ή με περιοδική δειγματοληψία, γεγονός που δημιουργεί σημαντικές καθυστερήσεις στην ανίχνευση προβλημάτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια δυσλειτουργία, όπως π.χ. μείωση του επιπέδου οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού, μπορεί να εντοπιστεί όταν έχει ήδη προκληθεί μείωση της βιολογικής απόδοσης ή εμφάνιση οσμών και ιλύος χαμηλής ποιότητας (George Tchobanoglous, 2014). Η έγκαιρη αντίδραση είναι λοιπόν περιορισμένη, αυξάνοντας το λειτουργικό και περιβαλλοντικό ρίσκο. Από την άλλη, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την αυτόματη αξιολόγηση των παραμέτρων λειτουργίας και τη λήψη άμεσων διορθωτικών μέτρων μέσω συστημάτων αυτοματισμού ή προειδοποιήσεων προς το προσωπικό. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα λειτουργεί σε προληπτικό και όχι σε αντιδραστικό μοντέλο, μειώνοντας τις πιθανότητες αστοχιών, υπερχειλίσης, ενεργειακής σπατάλης και υποβάθμισης της ποιότητας εκροής (Ai-Jie Wang H. L., 2024).

Η ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης ενισχύεται ακόμη περισσότερο λόγω της κλιματικής μεταβλητότητας, η οποία επηρεάζει την εισροή λυμάτων και τα υδραυλικά φορτία. Ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως έντονες βροχοπτώσεις, μπορούν να οδηγήσουν σε απότομες εισροές νερού στα δίκτυα αποχέτευσης, αυξάνοντας τον κίνδυνο υπερφόρτωσης των εγκαταστάσεων (ΕΥΔΑΠ, 2021). Οπότε, τα συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο αποτελούν βασικό μηχανισμό ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των υποδομών.

3.3.1 Περιορισμοί και τεχνολογικά προβλήματα των σημερινών μεθόδων

Οι επικρατούσες μέθοδοι παρακολούθησης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και στα δίκτυα αποχέτευσης βασίζονται κατά κύριο λόγο σε σημειακούς ηλεκτροχημικούς αισθητήρες (π.χ. διαλυμένο οξυγόνο, pH, αγωγιμότητα, οξειδοαναγωγικό δυναμικό), σε αισθητήρες θολότητας/φωτομετρίας και σε περιοδική

δειγματοληψία με εργαστηριακή ανάλυση. Παρότι η εργαστηριακή ανάλυση παρέχει υψηλή ακρίβεια, η υιοθέτηση αυτών των πρακτικών οδηγεί συχνά σε χρονική υστέρηση μεταξύ του συμβάντος και της διάγνωσης, με αποτέλεσμα οι λειτουργικές παρεμβάσεις να γίνονται εκ των υστέρων και όχι προληπτικά (Inc. Metcalf & Eddy, 2013) (George Tchobanoglous, 2014). Σε περιβάλλοντα με έντονες διακυμάνσεις φορτίων, ιδίως σε περιπτώσεις καταιγίδων, εισροής ομβρίων ή βιομηχανικών απορρίψεων, η χρονική καθυστέρηση επιδεινώνει τον κίνδυνο υπερχειλίσεων, υποβάθμισης της ποιότητας εκροής και ενεργοβόρων «διορθωτικών» κύκλων λειτουργίας (ΕΥΔΑΠ, 2021).

Σε επίπεδο αισθητήρων, οι βιολογικές και ανόργανες επικαθίσεις (biofouling και scaling, αντίστοιχα) αποτελούν γενικευμένα προβλήματα. Η επιφανειακή επικαθήση βιομάζας, αλάτων και αιωρούμενων στερεών μεταβάλλει σταδιακά τη μετρούμενη απόκριση, προκαλώντας αισθητηριακή απόκλιση (drift), αύξηση του θορύβου και απώλεια γραμμικότητας. Ως αποτέλεσμα, απαιτούνται συχνές καθαρίσεις και επαναβαθμονόμηση, που αυξάνουν το λειτουργικό κόστος και δημιουργούν «παράθυρα» χωρίς αξιόπιστα δεδομένα (Ai-Jie Wang H. L., 2024). Παράλληλα, η χημική διασταυρούμενη ευαισθησία (cross-sensitivity) σε ιοντική ισχύ, θερμοκρασία και διαλυμένα οργανικά μπορεί να αλλοιώσει τις ενδείξεις, ειδικά σε μέτωπα έντονων μικροβιακών διεργασιών ή μεταβολών φορτίου (George Tchobanoglous, 2014). Στα υποθαλάσσια ή διαβρωτικά τμήματα δικτύων, οι κλασικοί αισθητήρες και τα μεταλλικά εξαρτήματά τους υφίστανται διάβρωση και μηχανικές καταπονήσεις, περιορίζοντας τη διάρκεια ζωής (Inc. Metcalf & Eddy, 2013).

Ένα δεύτερο, κρίσιμο μειονέκτημα είναι η περιορισμένη χωρική κάλυψη. Οι περισσότερες μέθοδοι είναι σημειακές: μετρούν σε ένα ή λίγα σημεία ανά δεξαμενή ή αγωγό, αφήνοντας μεγάλα τμήματα της υποδομής χωρίς επίβλεψη. Έτσι, τοπικά φαινόμενα—όπως διαρροές σε υπόγειους αγωγούς, καθιζήσεις, είσοδοι ομβρίων και θερμικά επεισόδια μπορεί να παραμείνουν αδιάγνωστα μέχρι να εκδηλωθούν ως βλάβη ή υποβάθμιση απόδοσης ((ΥΠΕΝ), 2022). Η απλή αύξηση του αριθμού σημειακών αισθητήρων δεν αποτελεί πάντα λύση, διότι συνεπάγεται εκθετική αύξηση σε καλωδιώσεις, τροφοδοσίες, σημεία συντήρησης και πιθανότητες αστοχίας (Ai-Jie Wang H. L., 2024).

Τρίτο, παρατηρούνται ζητήματα ενσωμάτωσης δεδομένων και λειτουργικής διαλειτουργικότητας. Πολλά συστήματα SCADA προήλθαν από σταδιακές

αναβαθμίσεις και «πατσαρίσματα», με ετερογενείς πρωτόκολλες, διαφορετικές γενιές εξοπλισμού και αποσπασματικές βάσεις δεδομένων. Η συνέπεια είναι κενά ποιότητας δεδομένων, δυσκολία στην ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων και περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής προγνωστικών αλγορίθμων, αφού η πυκνότητα και αξιοπιστία των χρονοσειρών δεν είναι πάντα επαρκείς (ΕΥΔΑΠ, 2021) ((ΥΠΙΕΝ), 2022). Επιπλέον, τα ζητήματα κυβερνοασφάλειας και η απαίτηση για ασφαλή τηλεμετρία επιβάλλουν περιορισμούς στη διασύνδεση συστημάτων τρίτων, αυξάνοντας τη πολυπλοκότητα της ολοκλήρωσης (Ai-Jie Wang H. L., 2024).

Τέλος, τα κόστη κύκλου ζωής των σημερινών μεθόδων—όχι μόνο το αρχικό κόστος αγοράς, αλλά κυρίως συντήρησης, βαθμονόμησης, χημικών αντιδραστηρίων, εργαστηριακών αναλύσεων και ανθρώπινου δυναμικού—είναι σημαντικά. Σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας με εκτεταμένα δίκτυα, το οικονομικό βάρος της «πυκνής» σημειακής παρακολούθησης μπορεί να γίνει απαγορευτικό, ενώ η επιχειρησιακή εξάρτηση από χειρωνακτικές παρεμβάσεις δημιουργεί λειτουργική ευθραυστότητα σε περιόδους αιχμής ή έκτακτων συμβάντων (Inc. Metcalf & Eddy, 2013). Η ελληνική εμπειρία, όπως αποτυπώνεται σε τεχνικές εκθέσεις μεγάλων φορέων ύδρευσης-αποχέτευσης, επιβεβαιώνει ότι το γήρας των δικτύων, οι υδραυλικές αιχμές και η εισροή ομβρίων επιβαρύνουν το σύστημα ακριβώς στα σημεία όπου η συμβατική παρακολούθηση εμφανίζει τα μεγαλύτερα κενά (ΕΥΔΑΠ, 2021) ((ΥΠΙΕΝ), 2022)

Συνολικά, οι σημερινές μέθοδοι, αν και δοκιμασμένες και απαραίτητες για κανονιστική συμμόρφωση, χαρακτηρίζονται από χρονική υστέρηση, αισθητηριακό drift, ανάγκη εντατικής συντήρησης, περιορισμένη χωρική κάλυψη και προκλήσεις ολοκλήρωσης δεδομένων. Τα εγγενή αυτά όρια εξηγούν την αυξανόμενη στροφή της βιβλιογραφίας προς λύσεις που προσφέρουν συνεχή, χωρικά εκτεταμένη και ανθεκτική παρακολούθηση, όπως οι οπτικές ίνες, οι οποίες αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια (Yi Bao, 2019) (Danheng Gao, 2020).

3.3.2 Συμβατικοί σημειακοί αισθητήρες

Οι παραδοσιακές ΕΕΛ βασίζονται σε ένα σύνολο σημειακών (point) αισθητήρων, εγκατεστημένων σε συγκεκριμένα σημεία της διεργασίας:

- Αισθητήρες διαλυμένου οξυγόνου (DO) στις δεξαμενές αερισμού, για τη ρύθμιση της παροχής αέρα.
- Αισθητήρες pH, αγωγιμότητας και θερμοκρασίας, κρίσιμοι για τη σταθερότητα της βιολογικής διεργασίας.
- Θολερόμετρα (turbidity meters) και αισθητήρες αιωρούμενων στερεών, ιδίως στην έξοδο της εγκατάστασης.
- Παροχόμετρα (συνήθως υπερηχητικά ή ηλεκτρομαγνητικά) σε βασικά σημεία του υδραυλικού προφίλ (είσοδος, έξοδος, ανακυκλοφορία ιλύος).
- Αναλυτές COD/BOD/αμμωνιακού αζώτου, online ή με περιοδική δειγματοληψία και εργαστηριακή ανάλυση.
- Στάθμες υγρού σε δεξαμενές και φρεάτια, μέσω αισθητήρων πίεσης, υπερήχων ή ραντάρ.

Οι αισθητήρες αυτοί προσφέρουν αξιόπιστη, ακριβή πληροφορία στο συγκεκριμένο σημείο εγκατάστασής τους, αλλά έχουν εγγενή περιορισμό: παρέχουν μόνο σημειακή πληροφορία (Rodríguez-Alonso, 2024)

. Μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων μέτρησης -π.χ. κατά μήκος ενός αγωγού μεταφοράς λυμάτων μήκους αρκετών χιλιομέτρων- δεν υπάρχει καμία άμεση πληροφορία, με αποτέλεσμα διαρροές, εισροές ομβρίων ή τοπικές αστοχίες να παραμένουν αόρατες έως ότου εκδηλωθούν με ορατό τρόπο (π.χ. καθίζηση εδάφους, οσμές, πλημμύρα).

3.3.3 Συστήματα SCADA

Το ακρωνύμιο SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) αναφέρεται σε συστήματα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων, τα οποία συγκεντρώνουν σε κεντρικό σταθμό (Κεντρικός Σταθμός Ελέγχου, ΚΣΕ) τα σήματα από το σύνολο των σημειακών αισθητήρων και των Προγραμματιζόμενων Λογικών Ελεγκτών (PLC) μιας εγκατάστασης, επιτρέποντας την οπτικοποίηση, καταγραφή και εν μέρει αυτοματοποιημένο έλεγχο της διεργασίας. Τα σύγχρονα συστήματα SCADA είναι πλέον ο κανόνας στις μεσαίες και μεγάλες ΕΕΛ και αποτελούν τη βάση πάνω στην

οποία χτίζονται νεότερες προσεγγίσεις όπως τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins) (Khairullah, 2025)

Ένα σύστημα SCADA, ωστόσο, είναι τόσο καλό όσο και τα δεδομένα που το τροφοδοτούν. Παραμένει δηλαδή εξαρτημένο από την πυκνότητα και την ποιότητα του δικτύου σημειακών αισθητήρων που το τροφοδοτεί, και δεν παρέχει αφ' εαυτού πληροφορία για τμήματα του δικτύου όπου δεν υπάρχει εγκατεστημένη οργανολογία.

3.3.4 Τηλεμετρία δικτύων ύδρευσης-αποχέτευσης

Πέρα από την ίδια την εγκατάσταση επεξεργασίας, κρίσιμο ρόλο παίζει η παρακολούθηση του ευρύτερου δικτύου συλλογής και μεταφοράς λυμάτων και του δικτύου ύδρευσης. Τα συστήματα τηλεμετρίας περιλαμβάνουν συνήθως Τοπικούς Σταθμούς Ελέγχου (ΤΣΕ) εγκατεστημένους σε κρίσιμα σημεία του δικτύου (δεξαμενές, αντλιοστάσια, κόμβοι), οι οποίοι μεταδίδουν δεδομένα παροχής, πίεσης και ποιότητας νερού στον Κεντρικό Σταθμό Ελέγχου μέσω ασύρματων ή ενσύρματων δικτύων επικοινωνίας.

Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τέτοιου έργου είναι αυτό που έχει υλοποιήσει η ΔΕΥΑΙ στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος ΥΜΕΠΕΡΑΑ 2014-2020, το οποίο περιλαμβάνει την εγκατάσταση 29 Τοπικών Σταθμών Ελέγχου (ΤΣΕ) στο εξωτερικό υδραγωγείο, 15 σταθμών τηλεμετρίας παροχής και πίεσης (ΤΣΕΠΠ) σε κόμβους των εσωτερικών δικτύων, 2 σταθμών σε κρίσιμα σημεία του δικτύου (ΤΣΕΠ) και 5 σταθμών παρακολούθησης ποιότητας νερού (ΤΣΕΠΝ), με παράλληλη εγκατάσταση λογισμικού Κεντρικού Σταθμού Ελέγχου, οι δυνατότητες όσο και οι περιορισμοί είναι ιδίως θεσμικοί και χρηματοδοτικοί της συμβατικής προσέγγισης τηλεμετρίας μέσω διακριτών σταθμών ελέγχου.

3.3.5 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) στη διαχείριση λυμάτων

Η ανάπτυξη φθηνών, ασύρματων, χαμηλής κατανάλωσης αισθητήρων (Low-Power Wide-Area Network, LPWAN, π.χ. πρωτόκολλα LoRaWAN, NB-IoT) έχει επιτρέψει τη διάχυση πολύ μεγαλύτερου αριθμού σημείων μέτρησης σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα τηλεμετρίας, με χαμηλότερο κόστος ανά σημείο. Στο πλαίσιο αυτό, οι σύγχρονες προσεγγίσεις «έξυπνης διαχείρισης λυμάτων» βασίζονται σε πυκνά δίκτυα αισθητήρων IoT, τα οποία τροφοδοτούν πλατφόρμες ανάλυσης δεδομένων και προγνωστικής συντήρησης (Roostaei, 2023)

3.3.6 Ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins)

Μια από τις πλέον πρόσφατες και υποσχόμενες εξελίξεις στον τομέα είναι η υιοθέτηση «ψηφιακών διδύμων» δηλαδή δυναμικών εικονικών αναπαραστάσεων μιας φυσικής εγκατάστασης, οι οποίες συγχρονίζονται σε πραγματικό χρόνο με δεδομένα από αισθητήρες SCADA και συστήματα εργαστηριακής πληροφορίας Laboratory Information Management System (LIMS), επιτρέποντας προσομοίωση σεναρίων, προγνωστική συντήρηση και υποστήριξη αποφάσεων (Ai-Jie Wang H. L., 2024)

Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα εφαρμογής περιλαμβάνουν τη «Future City Flow», πλατφόρμα που αναπτύχθηκε από σκανδιναβικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, πανεπιστήμια, η οποία ενσωματώνει υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα με δεδομένα IoT, SCADA και μετεωρολογικές προγνώσεις για τον έλεγχο δικτύων αποχέτευσης, με αποδεδειγμένη μείωση όγκων υπερχείλισης σε πιλοτικές εφαρμογές στη Σουηδία και τη Δανία καθώς και το ψηφιακό δίδυμο που αναπτύχθηκε από τις δημόσιες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας της Σιγκαπούρης σε συνεργασία με την εταιρεία Jacobs, βασισμένο σε δεδομένα SCADA και LIMS (Ai-Jie Wang H. L., 2024)

Ωστόσο, ένα ψηφιακό δίδυμο είναι εξίσου εξαρτημένο από την ποιότητα και την πυκνότητα των δεδομένων εισόδου του όσο και ένα σύστημα SCADA. Χωρίς πυκνά, αξιόπιστα δεδομένα πεδίου - ιδίως σε επίπεδο δικτύου συλλογής και μεταφοράς λυμάτων πέραν, εντός της εγκατάστασης - η ακρίβεια και η χρησιμότητά του περιορίζονται σημαντικά.

3.3.7 Υπολογιστική στην άκρη του δικτύου (edge computing) και κατανεμημένη επεξεργασία δεδομένων

Μια σημαντική τεχνική εξέλιξη που συνοδεύει τη διάδοση αισθητήρων IoT είναι η μετατόπιση μέρους της επεξεργασίας δεδομένων από τον κεντρικό σταθμό προς την «άκρη» του δικτύου (edge computing) δηλαδή σε μικρές υπολογιστικές μονάδες τοποθετημένες κοντά στο σημείο μέτρησης. Η προσέγγιση αυτή μειώνει την απαιτούμενη ζώνη επικοινωνιών (καθώς μεταδίδεται μόνο η επεξεργασμένη, συμπυκνωμένη πληροφορία και όχι το ακατέργαστο σήμα) και επιτρέπει ταχύτερη τοπική απόκριση σε ανωμαλίες, χωρίς εξάρτηση από τη διαθεσιμότητα του κεντρικού δικτύου επικοινωνιών. Η ίδια λογική αρχίζει να εφαρμόζεται και σε συστήματα Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS) όπου μέρος της επεξεργασίας σήματος και μπορεί να πραγματοποιείται τοπικά στη μονάδα καταγραφής πριν από τη μετάδοση προς τον Κεντρικό Σταθμό Ελέγχου, μειώνοντας τον απαιτούμενο όγκο δεδομένων προς μετάδοση και αποθήκευση ζήτημα άμεσα συναφές με την πρόκληση διαχείρισης όγκου δεδομένων.

3.3.8 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και διαλειτουργικότητα

Η αποτελεσματική ενοποίηση πολλαπλών τεχνολογιών παρακολούθησης σημειακών αισθητήρων, IoT κόμβων, και ενδεχομένως μελλοντικά συστημάτων DFOS/FBG- σε ένα ενιαίο σύστημα εποπτείας προϋποθέτει τη χρήση κοινών, τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Πρωτόκολλα όπως το Modbus, το OPC-UA και, πιο πρόσφατα, το MQTT για εφαρμογές IoT, επιτρέπουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ εξοπλισμού διαφορετικών κατασκευαστών, αποτρέποντας τη δημιουργία απομονωμένων «σιλό» πληροφορίας. Η επιλογή εξοπλισμού συμβατού με τέτοια ανοικτά πρότυπα αντί κλειστών, ιδιόκτητων πρωτοκόλλων συγκεκριμένου κατασκευαστή αποτελεί σημαντική παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε οποιαδήποτε μελλοντική προμήθεια εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένης της προμήθειας συστήματος DFOS/FBG, ώστε να διασφαλιστεί η ομαλή ενσωμάτωσή του στο υφιστάμενο ή μελλοντικό σύστημα SCADA της ΔΕΥΑΙ.

3.3.9 Ζητήματα ασφάλειας δεδομένων και ανθεκτικότητας συστημάτων SCADA

Η αυξανόμενη διασύνδεση συστημάτων SCADA και τηλεμετρίας ΕΕΛ με ευρύτερα δίκτυα επικοινωνιών -συμπεριλαμβανομένου του Διαδικτύου, για απομακρυσμένη πρόσβαση χειριστών- εγείρει ζητήματα κυβερνοασφάλειας που δεν πρέπει να παραβλέπονται σε καμία συζήτηση εκσυγχρονισμού υποδομών νερού. Υποδομές κρίσιμης σημασίας, όπως οι ΕΕΛ, αποτελούν δυνητικό στόχο τόσο για τυχαία όσο και για στοχευμένα περιστατικά, με πιθανές συνέπειες που εκτείνονται από τη διακοπή λειτουργίας έως τη σκόπιμη παραποίηση δεδομένων ποιότητας εκροής. Οποιαδήποτε αναβάθμιση προς πιο ψηφιοποιημένα συστήματα παρακολούθησης συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης συστημάτων οπτικών ινών πρέπει συνεπώς να συνοδεύεται από αντίστοιχο σχεδιασμό ασφάλειας δικτύου (τμηματοποίηση δικτύου, έλεγχο πρόσβασης, κρυπτογράφηση επικοινωνιών), ώστε η αύξηση της ψηφιακής επιφάνειας να μην αντισταθμίζεται από αυξημένη τρωτότητα.

3.3.10 Διαχείριση όγκου δεδομένων (data management)

Η μετάβαση από σημειακή σε κατανεμημένη παρακολούθηση συνεπάγεται εκθετική αύξηση του όγκου παραγόμενων δεδομένων. Ένα τυπικό σύστημα SCADA με δεκάδες σημειακούς αισθητήρες μπορεί να παράγει μερικές χιλιάδες μετρήσεις ημερησίως, ενώ ένα σύστημα Distributed Temperature Sensing (DTS) μπορεί να παράγει, άνω των 100.000 σημείων μέτρησης ημερησίως ακόμη και σε σχετικά μικρό μήκος ίνας. Η διαχείριση αυτού του όγκου δεδομένων απαιτεί κατάλληλη υποδομή αποθήκευσης (τοπική ή cloud), αλγόριθμους συμπίεσης/φιλτραρίσματος ώστε να διατηρείται μόνο η κρίσιμη πληροφορία, και σαφή πολιτική διατήρησης δεδομένων (data retention) που να συμβαδίζει τόσο με τις λειτουργικές ανάγκες όσο και με τις απαιτήσεις προστασίας προσωπικών δεδομένων, όπου αυτές εφαρμόζονται (Ladegourdie, (2022)).

3.3.11 Συγκριτική αποτίμηση και το κενό πυκνότητας πληροφορίας

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η εξέλιξη των τεχνολογιών παρακολούθησης ΕΕΛ έχει ακολουθήσει μια πορεία από τη σημειακή μέτρηση (μεμονωμένοι αισθητήρες) στην κεντριοποιημένη εποπτεία (SCADA), στη διάχυτη ασύρματη μέτρηση (IoT) και, τελικά, στην ολιστική εικονική αναπαράσταση (ψηφιακά δίδυμα). Στον Πίνακα 2 αποτυπώνονται τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας.

Τεχνολογία	Χωρική ανάλυση	Τυπικό κόστος	Ωριμότητα σε ΕΕΛ	Κύριος περιορισμός
Σημειακοί αισθητήρες (DO, pH, παροχή)	Μεμονωμένο σημείο	Χαμηλό/μεσαίο ανά μονάδα	Πολύ υψηλή, καθιερωμένη	Μηδενική κάλυψη μεταξύ σημείων
SCADA	Όσο και το δίκτυο αισθητήρων που τροφοδοτεί	Μεσαίο (λογισμικό/υπ οδομή)	Πολύ υψηλή	Εξαρτάται πλήρως από πυκνότητα αισθητήρων εισόδου
Τηλεμετρία διακριτών σταθμών	Ανά σταθμό (δεκάδες-εκατοντάδες μέτρα μεταξύ σταθμών)	Υψηλό ανά σταθμό	Υψηλή	Υψηλό συνολικό κόστος για πυκνή κάλυψη
IoT (LPWAN αισθητήρες)	Πυκνότερη, χαμηλού κόστους ανά κόμβο	Χαμηλό ανά κόμβο, υψηλό συνολικά σε μεγάλη κλίμακα	Αναδυόμενη	Περιορισμένη διάρκεια ζωής μπαταρίας, θέματα διαλειτουργικότητας
Ψηφιακά δίδυμα	Εξαρτάται από ποιότητα δεδομένων εισόδου	Υψηλό (ανάπτυξη λογισμικού/μολύσεων)	Αναδυόμενη, με πιλοτικές εφαρμογές διεθνώς	Τόσο καλό όσο τα δεδομένα εισόδου του

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά τεχνολογιών παρακολούθησης

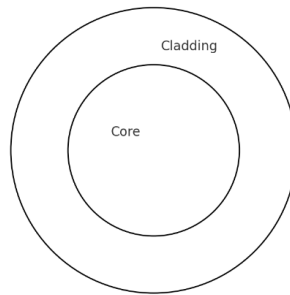
Ένας κοινός περιορισμός όλων των προαναφερθεισών τεχνολογιών είναι ότι η πληροφορία εξακολουθεί να προέρχεται από διακριτά σημεία μέτρησης, ακόμη και όταν αυτά είναι πυκνά κατανεμημένα, και όχι από συνεχή χωρική παρακολούθηση της

υποδομής. Ως αποτέλεσμα, παραμένουν περιοχές χωρίς άμεση πληροφορία μεταξύ των σημείων μέτρησης, γεγονός που περιορίζει την έγκαιρη ανίχνευση τοπικών μεταβολών ή βλαβών. Το συγκεκριμένο κενό καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικό σε γραμμικές υποδομές, όπως αγωγοί μεταφοράς λυμάτων, κύριοι συλλεκτές και περίμετροι εγκαταστάσεων. Οι τεχνολογίες κατανεμημένης αισθητηριακής μέτρησης με οπτικές ίνες (DFOS) προσεγγίζουν το πρόβλημα με διαφορετική φιλοσοφία, μετατρέποντας ολόκληρο το μήκος της οπτικής ίνας σε ένα συνεχές αισθητήριο πεδίο. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει τον έγκαιρο εντοπισμό διαρροών, θερμικών ανωμαλιών, μηχανικών παραμορφώσεων ή άλλων τοπικών συμβάντων, χωρίς να απαιτείται εγκατάσταση μεγάλου αριθμού σημειακών αισθητήρων.

3.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ: ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Μια οπτική ίνα αποτελείται από τον πυρήνα (core) και τον μανδύα (cladding), που αποτελούν δύο στρώματα υλικού με διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Εικόνα 1. Ο πυρήνας έχει υψηλότερο δείκτη διάθλασης, γεγονός που επιτρέπει στο φως να παραμένει εγκλωβισμένο εντός του μέσω του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Η συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα επιτρέπει τη μετάδοση φωτεινών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλές απώλειες και ελάχιστη εξασθένηση του σήματος, καθιστώντας τις οπτικές ίνες ιδιαίτερα αξιόπιστες σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα μέτρησης (Yi Bao, 2019).

Λόγω της δομής αυτής, η οπτική ίνα μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα ως μέσο μετάδοσης και ως μέσο αισθητηριακής ανίχνευσης. Ο μηχανισμός παρακολούθησης βασίζεται στη μεταβολή των χαρακτηριστικών του φωτός (όπως το μήκος κύματος ή η ένταση) ανάλογα με τη φυσική μεταβολή στην οποία εκτίθεται η ίνα. Έτσι, θερμικές, μηχανικές ή χημικές μεταβολές μετατρέπονται σε μετρήσιμες οπτικές διαφοροποιήσεις (Danheng Gao, 2020).



Εικόνα 1 Δομή οπτικής ίνας

3.5 Κατηγορίες αισθητήρων οπτικών ινών

Η θεμελιώδης ιδέα πίσω από την κατανομημένη αισθητηριακή με οπτικές ίνες (Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS) είναι η μετατροπή της ίδιας της οπτικής ίνας, που παραδοσιακά χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης δεδομένων, σε συνεχές αισθητήριο στοιχείο σε όλο της το μήκος. Παλμοί φωτός εισάγονται σε ένα άκρο της ίνας και το φως που οπισθοσκεδάζεται καθ' όλο το μήκος της αναλύεται ως προς την ένταση, τη συχνότητα, τη φάση ή την πόλωσή του, ώστε να εξαχθεί πληροφορία για φυσικές παραμέτρους (θερμοκρασία, παραμόρφωση, δόνηση) σε κάθε σημείο της διαδρομής (Brian Culshaw, 2008). Η τεχνική αυτή, γνωστή ως οπτική ανακλασιμετρία χρονικού πεδίου (Optical Time Domain Reflectometry, OTDR) ή, σε πιο εξελιγμένες υλοποιήσεις, οπτική ανακλασιμετρία συχνοτικού πεδίου (OFDR), επιτρέπει τη μετατροπή ενός απλού καλωδίου οπτικής ίνας μήκους δεκάδων χιλιομέτρων σε χιλιάδες «εικονικούς» αισθητήρες, χωρίς να απαιτούνται τροφοδοσία ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα κατά μήκος της γραμμής (Danheng Gao, 2020).

Τρία είναι τα φυσικά φαινόμενα σκέδασης του φωτός στα οποία στηρίζεται η πλειονότητα των τεχνολογιών DFOS.

- Σκέδαση Rayleigh. Πρόκειται για ελαστική σκέδαση που προκαλείται από τυχαίες μικροανομοιογένειες του δείκτη διάθλασης κατά μήκος της ίνας, χωρίς μετατόπιση μήκους κύματος. Αποτελεί τη βάση των τεχνικών DAS/DVS (Distributed Acoustic/Vibration Sensing), μέσω της συσχετισμένης οπτικής ανακλασιμετρίας χρονικού πεδίου (Coherent-OTDR, C-OTDR) ή της ευαίσθητης στη φάση OTDR

(Φ-OTDR): μεταβολές στη φάση του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός αποκαλύπτουν δονήσεις ή ακουστικά σήματα κατά μήκος της ίνας.

- Σκέδαση Raman. Πρόκειται για ανελαστική σκέδαση από τις μοριακές δονήσεις του υλικού της ίνας, η οποία παράγει συνιστώσες Stokes και anti-Stokes· ο λόγος έντασής τους εξαρτάται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία, χωρίς ευαισθησία σε παραμόρφωση. Αυτή η ιδιότητα καθιστά τη σκέδαση Raman ιδανική βάση για συστήματα DTS (Raman Optical Time Domain Reflectometry, ROTDR), τα οποία παρέχουν θερμοκρασιακά προφίλ σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς την πολυπλοκότητα της διασταυρούμενης ευαισθησίας θερμοκρασίας-παραμόρφωσης.
- Σκέδαση Brillouin. Πρόκειται επίσης για ανελαστική σκέδαση, προερχόμενη όμως από ακουστικά φωνόνια, με τυπική μετατόπιση συχνότητας της τάξης των 11 GHz. Σε αντίθεση με τη σκέδαση Raman, η σκέδαση Brillouin είναι ταυτόχρονα ευαίσθητη τόσο στη θερμοκρασία όσο και στην παραμόρφωση (διασταυρούμενη ευαισθησία), γεγονός που απαιτεί πρόσθετες τεχνικές αποσύζευξης των δύο μεγεθών. Αποτελεί τη βάση των συστημάτων BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, μέτρηση από το ένα άκρο της ίνας) και BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis, μέτρηση από τα δύο άκρα, με χρήση διεγερμένης σκέδασης Brillouin και μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο).

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται και υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν δύο ή και τρία από τα παραπάνω φαινόμενα σκέδασης σε μία ενιαία διάταξη, επιτρέποντας ταυτόχρονη μέτρηση θερμοκρασίας, παραμόρφωσης και δόνησης με το ίδιο καλώδιο οπτικής ίνας όπου ένα ενιαίο δίκτυο ίνας θα μπορούσε δυνητικά να καλύψει ταυτόχρονα ανάγκες θερμοκρασιακής παρακολούθησης (π.χ. διαρροές) και δομικής παρακολούθησης (π.χ. δεξαμενές).

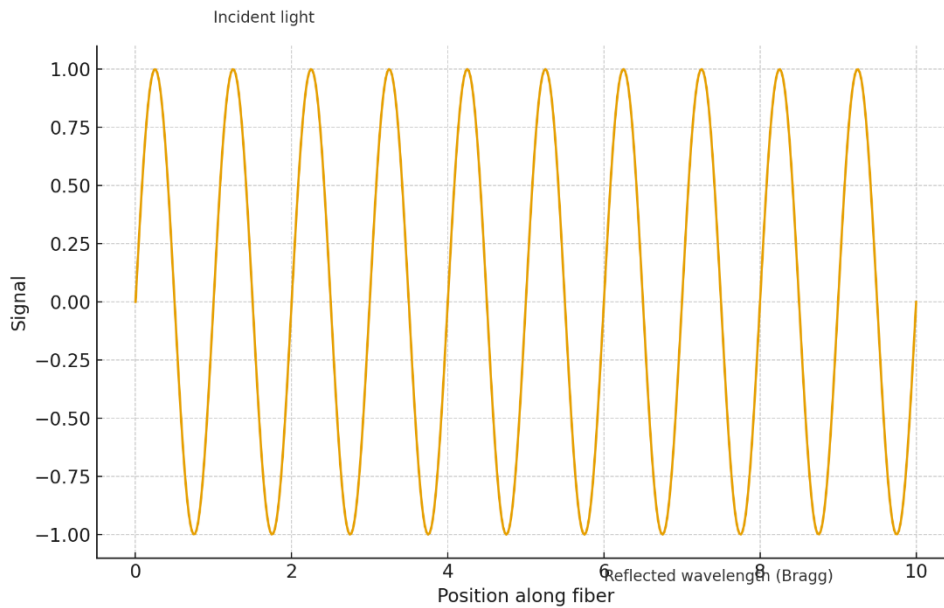
3.5.1 Οι αισθητήρες Fiber Bragg Grating (FBG)

Σε αντίθεση με τις κατανεμημένες τεχνικές DTS/DAS (Distributed Temperature Sensing)/(Distributed Acoustic Sensing) οι αισθητήρες Φράγματος Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) λειτουργούν με διαφορετική αρχή: πρόκειται για περιοδικές διαμορφώσεις του δείκτη διάθλασης εντός του πυρήνα της ίνας, οι οποίες ανακλούν επιλεκτικά ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος («μήκος κύματος Bragg»). μεταβολές

στην παραμόρφωση ή τη θερμοκρασία στο σημείο του φράγματος μετατοπίζουν αυτό το μήκος κύματος, το οποίο καταγράφεται από τη μονάδα καταγραφής. Πολλαπλά φράγματα με διαφορετικό μήκος κύματος αναφοράς μπορούν να πολυπλέκονται στην ίδια ίνα, επιτρέποντας παρακολούθηση πολλών διακριτών σημείων (σε αντίθεση με την πραγματικά συνεχή κατανεμημένη παρακολούθηση DTS/DAS).

Η τεχνολογία FBG έχει καθιερωθεί κυρίως στη δομική παρακολούθηση υγείας (Structural Health Monitoring, SHM) κατασκευών πολιτικού μηχανικού, χάρη σε πλεονεκτήματα όπως το μικρό βάρος, η ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η αντοχή στη διάβρωση και η δυνατότητα ενσωμάτωσης εντός δομικών στοιχείων. Εφαρμογές περιλαμβάνουν την παρακολούθηση υπόγειων κατασκευών σε περιοχές επίχωσης, όπου συνδυασμένοι αισθητήρες FBG κατέγραψαν την επίδραση παλιρροϊκών μεταβολών, βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και κυκλοφορίας οχημάτων στη ρηγμάτωση δομικών στοιχείων (F. Baldini, 2006), καθώς και σύνθετα συστήματα δύο αισθητήρων —ενός ευαίσθητου σε παραμόρφωση και ενός ευαίσθητου σε υγρασία για την ταυτόχρονη παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας και στεγανότητας σε υποθαλάσσιους υδατοστεγείς συνδέσμους, με μέθοδο αποσύζευξης της επίδρασης της πίεσης από εκείνη της υγρασίας (Yi Bao, 2019).

Για τον τομέα της διαχείρισης υδάτων, η συνάφεια των FBG έγκειται κυρίως στη δυνατότητα παρακολούθησης της δομικής κατάστασης δεξαμενών, χωνευτήρων και άλλων κατασκευών σκυροδέματος μιας ΕΕΛ (ρηγματώσεις, καθιζήσεις, παραμορφώσεις), κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο για παλαιότερες εγκαταστάσεις υπό συνθήκες αυξημένου φορτίου λειτουργίας. Αξίζει επίσης να σημειωθεί η ανάπτυξη αισθητήρων FBG από πολυμερές υλικό (Polymer Optical FBG) για την ανίχνευση αλατότητας σε εδάφη, με προφανή εφαρμογή στην παρακολούθηση ενδεχόμενης διείσδυσης λυμάτων ή υφάλμυρου νερού σε παρακείμενους υδροφορείς γύρω από εγκαταστάσεις επεξεργασίας (Yi Bao, 2019).



Εικόνα 2 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα FBG

3.5.2 Interferometric Sensors

Οι interferometric αισθητήρες βασίζονται στην αρχή ότι οι φυσικές μεταβολές στο περιβάλλον της οπτικής ίνας μπορούν να επηρεάσουν τη φάση του φωτός που διαδίδεται μέσα σε αυτήν. Η μεταβολή της φάσης εκδηλώνεται ως διαφορά στο μήκος κύματος ή στον χρόνο διαδρομής του φωτεινού σήματος, η οποία μπορεί να καταγραφεί και να μετατραπεί σε πληροφορία για συγκεκριμένη φυσική μεταβλητή, όπως θερμοκρασία, πίεση ή μηχανική καταπόνηση (Yi Bao, 2019). Οι αισθητήρες αυτοί δεν ανιχνεύουν μόνο τη μεταβολή της έντασης του φωτός, αλλά αξιοποιούν τα φαινόμενα συμβολής (interference) μεταξύ δύο ή περισσότερων φωτεινών κυμάτων, προσφέροντας υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια.

Οι πιο συνηθισμένες αρχιτεκτονικές interferometric αισθητήρων είναι οι διατάξεις Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac και Fabry-Perot. Στους αισθητήρες τύπου Mach-Zehnder, η δέσμη φωτός διαχωρίζεται σε δύο παράλληλα μονοπάτια: το ένα εκτίθεται σε περιβαλλοντικές μεταβολές ενώ το άλλο λειτουργεί ως σημείο αναφοράς. Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο δεσμών, όταν επανασυνδυάζονται, επιτρέπει την εξαγωγή της μεταβολής της φυσικής παραμέτρου που μετράται (Danheng Gao, 2020). Στους αισθητήρες Fabry-Perot, αντίθετα, η μέτρηση βασίζεται στη δημιουργία

μικροσκοπικής «κοιλότητας» μεταξύ δύο ανακλαστικών επιφανειών, όπου η μεταβολή της απόστασης ή της πίεσης αλλάζει τον τρόπο συμβολής του φωτός (Brian Culshaw, 2008). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των interferometric αισθητήρων είναι η εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία, η οποία επιτρέπει την ανίχνευση ακόμη και μικρών δομικών παραμορφώσεων, θερμικών διακυμάνσεων ή διαρροών σε αγωγούς. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακριβής και συνεχής παρακολούθηση σε μεγάλες αποστάσεις, όπως σε δίκτυα αποχέτευσης ή σε υπόγειες και υποθαλάσσιες υποδομές (Manuel Bertulessi, 2023).

Ωστόσο, οι αισθητήρες αυτοί παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς. Η υψηλή ευαισθησία τους μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη καταγραφή θορύβου, ιδίως σε περιβάλλοντα με έντονες δονήσεις ή μεταβολές πίεσης. Επιπλέον, η εγκατάσταση και ρύθμισή τους απαιτεί ειδική τεχνική εξειδίκευση και κατάλληλη προστασία της οπτικής ίνας, ώστε να εξασφαλιστεί σταθερότητα και αξιοπιστία των μετρήσεων σε βάθος χρόνου (Brian Culshaw, 2008). Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η ευαισθησία, η ανθεκτικότητα και η δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο καθιστούν τους interferometric αισθητήρες εξαιρετικά κατάλληλους για κρίσιμες υποδομές, όπως οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

3.5.2 Διανεμημένη αισθητήρια παρακολούθηση (Distributed Sensing) (DTS, DAS, DSS)

Ένα από τα πλέον κρίσιμα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι η δυνατότητα διανεμημένης παρακολούθησης, δηλαδή η μέτρηση παραμέτρων σε όλο το μήκος της ίνας, σαν να υπήρχαν χιλιάδες ενσωματωμένοι αισθητήρες συνεχόμενα (Hongxuan Xu, 2025). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μεγάλους αγωγούς αποχέτευσης, υπόγεια δίκτυα και δεξαμενές, όπου είναι αναγκαία η έγκαιρη ανίχνευση διαρροών, θερμικών μεταβολών ή μηχανικής καταπόνησης.

Εικόνα 3 Διανεμημένη παρακολούθηση κατά μήκος αγωγού

Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τον άμεσο εντοπισμό συμβάντων όπως ρηγματώσεις, εισροές ομβρίων, υπερφόρτωση ή υπερθέρμανση συστημάτων, παρέχοντας τη δυνατότητα λήψης προληπτικών μέτρων πριν η κατάσταση εξελιχθεί σε σοβαρή λειτουργική αστοχία.

Distributed Acoustic Sensing (DAS)

Η τεχνολογία Distributed Acoustic Sensing (DAS) αποτελεί μία από τις πιο εξελιγμένες μορφές διανεμημένης αισθητηριακής παρακολούθησης, καθώς επιτρέπει την ανίχνευση ακουστικών κυμάτων, δονήσεων και μικροπαραμορφώσεων κατά μήκος ολόκληρης της οπτικής ίνας, η οποία λειτουργεί ως ένας συνεχής αισθητήρας (Hartog A. H., 2017). Η βασική αρχή λειτουργίας βασίζεται στη σκέδαση Rayleigh: όταν ένας παλμός φωτός διοχετεύεται στην ίνα, ένα μικρό μέρος του φωτός ανακλάται προς τα πίσω λόγω μικροσκοπικών φυσικών ατελειών της γυάλινης δομής. Οι μικρές μηχανικές μεταβολές στο περιβάλλον της ίνας μεταβάλλουν το πρότυπο αυτής της σκέδασης, και η μεταβολή αυτή καταγράφεται και αναλύεται σε πραγματικό χρόνο.

Έτσι, ένα μόνο καλώδιο οπτικών ινών μπορεί να λειτουργήσει ως χιλιάδες αισθητήρες ταυτόχρονα, με δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης σε αποστάσεις που μπορούν να ξεπεράσουν τα 40 χιλιόμετρα, ανάλογα με το σύστημα και το επίπεδο ενίσχυσης σήματος. Αυτή η δυνατότητα καθιστά το DAS εξαιρετικά αποτελεσματικό για δίκτυα αποχέτευσης μεγάλης έκτασης, όπου οι συμβατικοί σημειακοί αισθητήρες αδυνατούν να προσφέρουν επαρκή χωρική κάλυψη.

Στο πλαίσιο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και των δικτύων μεταφοράς, το DAS χρησιμοποιείται για την ανίχνευση διαρροών και θραύσεων αγωγών, μέσω χαρακτηριστικών προτύπων δόνησης που διαφοροποιούνται από τη φυσιολογική ροή, τον εντοπισμό εισροής ομβρίων, ιδίως σε παλαιωμένα δίκτυα, την επιτήρηση υποθαλάσσιων ή υπόγειων αγωγών, όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη και την

επιτήρηση δομικής υγείας δεξαμενών και αντλιοστασίων, με ανίχνευση μηχανικών ανωμαλιών πριν εξελιχθούν σε βλάβες (Manuel Bertulesi, 2023).

Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αισθητήρων, το DAS διαθέτει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως την πλήρη χωρική κάλυψη σε πραγματικό χρόνο, την υψηλή ευαισθησία σε μικροπαραμορφώσεις και ταλαντώσεις, την μηδενική ανάγκη εγκατάστασης πολλών σημειακών αισθητήρων, το ότι δεν απαιτεί ηλεκτρική τροφοδότηση στο πεδίο (η μέτρηση γίνεται από το άκρο της ίνας) και την μεγάλη ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά και υγρά περιβάλλοντα (Hartog A. H., 2017).

Ωστόσο, ορισμένοι τεχνολογικοί περιορισμοί παραμένουν. Η ποιότητα του σήματος επηρεάζεται από τη μηχανική σταθερότητα της ίνας και την καλή επαφή με την επιφάνεια παρακολούθησης. Επιπλέον, η επεξεργασία των δεδομένων απαιτεί υπολογιστική ισχύ και εξειδικευμένους αλγορίθμους, καθώς ο όγκος δεδομένων που παράγεται μπορεί να είναι πολύ μεγάλος.

Παρά τους περιορισμούς, η τεχνολογία DAS θεωρείται σήμερα στρατηγικής σημασίας για τις «έξυπνες» υποδομές ύδατος, καθώς επιτρέπει την προληπτική διαχείριση και την έγκαιρη ανίχνευση αστοχιών σε συστήματα μεγάλης κλίμακας.

Distributed Temperature Sensing (DTS)

Η τεχνολογία Distributed Temperature Sensing (DTS) αποτελεί τεχνολογία διανεμημένης αισθητηριακής καταγραφής θερμοκρασίας κατά μήκος ολόκληρης της οπτικής ίνας. Η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο της σκέδασης Raman, όπου ένα μέρος του φωτός που εισέρχεται στην ίνα ανακλάται με μεταβολή στο μήκος κύματος, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού (Danheng Gao, 2020). Με την ανάλυση αυτής της ανακλώμενης ακτινοβολίας, είναι δυνατή η εξαγωγή συνεχούς θερμοκρασιακού προφίλ σε πραγματικό χρόνο.

Το DTS αποτελεί την πλέον ώριμη και διαδεδομένη τεχνολογία DFOS, με εφαρμογή σε αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου εδώ και περισσότερες από δύο δεκαετίες έχει σημαντική εφαρμογή στις δεξαμενές αερισμού και στους αγωγούς μεταφοράς λυμάτων, όπου η θερμοκρασία αποτελεί κρίσιμο λειτουργικό δείκτη. Η αύξηση της θερμοκρασίας στις βιολογικές διεργασίες μπορεί να υποδηλώνει υπερφόρτωση μικροοργανισμών ή ανεπαρκή αερισμό, ενώ σε αγωγούς, απότομες θερμικές μεταβολές συχνά υποδηλώνουν εισροή βιομηχανικών αποβλήτων, θερμικά φορτία ή επιφανειακή ρωγμή που επιτρέπει τη διείσδυση εξωτερικού νερού (George Tchobanoglous, 2014).

Σε αντίθεση με τους συμβατικούς θερμομετρικούς αισθητήρες, οι οποίοι καταγράφουν θερμοκρασία σε ένα μόνο σημείο, το DTS προσφέρει συνεχή χωρική καταγραφή, επιτρέποντας τον εντοπισμό ανωμαλιών με ακρίβεια θέσης της τάξης των λίγων μέτρων, σε μήκη εγκατάστασης που ξεπερνούν τα 20–30 km. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι καθοριστικής σημασίας για τη διαχείριση εκτεταμένων δικτύων αποχέτευσης, όπου οι περισσότερες βλάβες συμβαίνουν σε σημεία χωρίς πρόσβαση ή δυνατότητα συνεχούς επιτήρησης.

Στην περίπτωση των δικτύων λυμάτων και ύδρευσης, η αρχή λειτουργίας εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι τα λύματα είναι συνήθως θερμότερα από το περιβάλλον έδαφος· μια διαρροή προκαλεί επομένως τοπική άνοδο της θερμοκρασίας του εδάφους γύρω από το σημείο διαρροής, ανιχνεύσιμη από καλώδιο DTS τοποθετημένο παράλληλα με τον αγωγό. Η ίδια λογική έχει εφαρμοστεί και για τον εντοπισμό εισροών ομβρίων υδάτων σε παντοροϊκά δίκτυα αποχέτευσης, μέσω καλωδίου τοποθετημένου εντός του αγωγού, καθώς και για την ανίχνευση παράνομων συνδέσεων σε δίκτυα ομβρίων. Ερευνητική μελέτη σκοπιμότητας εξέτασε μάλιστα τη χρήση προσωρινά εισαγόμενου καλωδίου οπτικής ίνας εντός αγωγών λυμάτων υπό πίεση, με την είσοδο νερού από τυχόν διαρροές να προκαλεί τοπική πτώση θερμοκρασίας ανιχνεύσιμη από το DTS μια προσέγγιση ιδιαίτερα ελκυστική για υφιστάμενα (retrofit) δίκτυα, όπου η μόνιμη εγκατάσταση καλωδίου δεν είναι πάντα εφικτή.

Μια παραλλαγή της τεχνολογίας, η ενεργός κατανεμημένη αισθητηριακή θερμοκρασίας (Active DTS, ADTS), χρησιμοποιεί ενεργά θερμαινόμενα καλώδια οπτικής ίνας (Actively Heated Fiber Optic, AHFO) τοποθετημένα παράλληλα με τον αγωγό: η μεταβολή των θερμικών ιδιοτήτων του περιβάλλοντος εδάφους λόγω διαρροής μπορεί να συσχετιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, μέσω θερμοδραυλικής μοντελοποίησης, με το ενδεχόμενο ατύχημα. Σε εφαρμογές πετρελαίου, τα όρια ανίχνευσης φτάνουν το 0,01% της συνολικής παροχής, ενώ σε πραγματικές εγκαταστάσεις η τεχνολογία DTS χρησιμοποιείται σήμερα και για συνεχή θερμική παρακολούθηση υποδομών όπως τερματικοί σταθμοί υγροποιημένου φυσικού αερίου και συστήματα μεταφοράς νερού μεγάλης κλίμακας.

Ωστόσο, η ποιότητα των μετρήσεων επηρεάζεται από την καλή επαφή της ίνας με το μέσο, τη μηχανική σταθερότητα και την ανάγκη σωστής ερμηνείας των δεδομένων, ειδικά όταν υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοχωρητικότητα του περιβάλλοντος (Danheng Gao, 2020). Παρά τις προκλήσεις, το DTS θεωρείται μία

από τις πιο ώριμες και αξιόπιστες τεχνολογίες διανεμημένης παρακολούθησης (Liu, 2019)

Distributed Strain Sensing (DSS)

Το Distributed Strain Sensing (DSS) επικεντρώνεται στην καταγραφή μηχανικών παραμορφώσεων κατά μήκος της οπτικής ίνας. Η μέθοδος βασίζεται στη σκέδαση Brillouin, όπου οι μεταβολές της μηχανικής τάσης στο περιβάλλον της ίνας μεταβάλλουν τη συχνότητα του ανακλώμενου φωτός (Manuel Bertulesi, 2023). Με αυτόν τον τρόπο, η ίνα λειτουργεί ως ένας συνεχής αισθητήρας δομικής καταπόνησης, χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης πολλών μεμονωμένων αισθητήρων.

Στην επεξεργασία λυμάτων, η τεχνολογία DSS χρησιμοποιείται κυρίως για την παρακολούθηση υπόγειων ή υποθαλάσσιων αγωγών, όπου η καθίζηση του εδάφους ή η διάβρωση μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική καταπόνηση και τελικά σε θραύση, την δομική επιτήρηση δεξαμενών, όπου η διαστολή ή η παραμόρφωση του σκυροδέματος λειτουργεί ως προειδοποίηση για έλλειψη στεγανότητας και την ανίχνευση διαρροών, μέσω χαρακτηριστικών προτύπων παραμόρφωσης στο σημείο της ρωγμής.

Τα συνεχή δεδομένα παραμόρφωσης επιτρέπουν στις εγκαταστάσεις να εντοπίζουν «προβλήματα πριν γίνουν προβλήματα», δηλαδή σε στάδιο μικροαστοχιών, πριν εμφανιστεί υδραυλική ή λειτουργική δυσλειτουργία (Brian Culshaw, 2008).

Τα συστήματα DSS είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε παλιά δίκτυα, όπως συμβαίνει σε πολλούς ελληνικούς δήμους, όπου η προληπτική επιτήρηση μπορεί να μειώσει δραστικά το κόστος επισκευών και τον κίνδυνο ρυπάνσεων ((ΥΠΕΝ), 2022).

Εξειδικευμένοι οπτικοί αισθητήρες ποιοτικών παραμέτρων λυμάτων

Πέραν των κατανεμημένων τεχνικών DTS/DAS και των σημειακών FBG, υπάρχει και μια ξεχωριστή κατηγορία οπτικών αισθητήρων που στοχεύει όχι σε φυσικές/δομικές παραμέτρους αλλά απευθείας σε ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων. Οι αισθητήρες αυτοί εκμεταλλεύονται φασματοσκοπικές αρχές απορρόφηση, σκέδαση, επανεκπομπή και ανάκλαση φωτός για τον ταχύ προσδιορισμό παραμέτρων όπως το χρώμα, το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) και το Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD), προσφέροντας εναλλακτική στην παραδοσιακή εργαστηριακή ανάλυση δειγμάτων, η οποία είναι σχετικά ακριβή, χρονοβόρα και παρέχει μόνο στιγμιότυπα της ποιότητας του λύματος. Ανασκοπήσεις της βιβλιογραφίας καταλήγουν ότι, με κατάλληλη διαμόρφωση, βαθμονόμηση και επιλογή χαρακτηριστικών της ίνας,

η ακρίβεια των οπτικών αισθητήρων μπορεί να προσεγγίσει αυτή των συμβατικών εργαστηριακών μεθόδων, ανοίγοντας τον δρόμο για online και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση περισσότερων παραμέτρων λυμάτων.

Μια δεύτερη σημαντική εφαρμογή αφορά την παρακολούθηση της μικροβιολογικά προκαλούμενης διάβρωσης (Microbiologically Induced Corrosion, MIC) σε δίκτυα αποχέτευσης φαινόμενο κατά το οποίο μικροβιακή δραστηριότητα παράγει θειικό οξύ που διαβρώνει τις κατασκευές από σκυρόδεμα, με σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο στη συντήρηση υποδομών αποχέτευσης παγκοσμίως. Οπτικοί αισθητήρες pH, υγρασίας και υδρόθειου (H₂S) έχουν αναπτυχθεί ειδικά για τη συνεχή παρακολούθηση αυτών των συνθηκών εντός του ιδιαίτερα όξινου και διαβρωτικού περιβάλλοντος ενός δικτύου αποχέτευσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εγκατάσταση αισθητήρα υγρασίας ενισχυμένου με τεχνολογία 4G για μετάδοση δεδομένων και αυτόνομη τροφοδοσία μπαταρίας σε πραγματικό δίκτυο αποχέτευσης εγκατάστασης λυμάτων στο Σίδνεϊ της Αυστραλίας, ο οποίος λειτούργησε αποτελεσματικά για διάστημα άνω των έξι μηνών εντός ιδιαίτερα διαβρωτικού περιβάλλοντος, χωρίς να απαιτηθεί καμία βαθμονόμηση.

Τεχνολογία	Φυσικός μηχανισμός	Μετρούμενο μέγεθος	Τυπική χωρική ανάλυση	Τυπικό μέγιστο εύρος
DAS	Σκέδαση Rayleigh (φασική OFDR/OTDR)	Δόνηση/ήχος	1-10 m	Έως ~40-50 km
DTS	Σκέδαση Raman	Θερμοκρασία	0,25-1 m	Έως ~10-30 km
DSS	Σκέδαση Brillouin	Παραμόρφωση (και θερμοκρασία)	0,5-2 m	Έως ~50-70 km
FBG	Ανάκλαση πλέγματος Bragg	Παραμόρφωση, θερμοκρασία, (έμμεσα) χημικές παράμετροι	Σημειακό (πολυπλεγμένο)	Δεκάδες αισθητήρες ανά ίνα

Πίνακας 4 Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών DFOS/FBG

3.6 Περιβαλλοντική ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής

Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής μιας εγκατάστασης οπτικής ίνας αισθητηριακής χρήσης σε περιβάλλον δικτύου αποχέτευσης εξαρτάται σημαντικά από την ποιότητα του προστατευτικού περιβλήματος (jacketing) του καλωδίου. Καλώδια με εξωτερική επένδυση από ανθεκτικά πολυμερή (π.χ. πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, HDPE, ή φθοριούχα πολυμερή για ιδιαίτερα διαβρωτικά περιβάλλοντα) μπορούν να διατηρήσουν την ακεραιότητά τους για δεκαετίες, ακόμη και σε άμεση επαφή με υγρά απόβλητα ή σε περιβάλλον με αυξημένη συγκέντρωση υδρόθειου. Η ίδια η γυάλινη ίνα, απαλλαγμένη από μεταλλικά στοιχεία, δεν υπόκειται στους μηχανισμούς ηλεκτροχημικής διάβρωσης που περιορίζουν τη διάρκεια ζωής συμβατικών μεταλλικών αισθητήρων και καλωδιώσεων σε αντίστοιχο περιβάλλον -πλεονέκτημα που αντισταθμίζει, σε βάθος χρόνου, το υψηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης.

3.7 Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα των Οπτικών Ινών στη Διαχείριση Λυμάτων

Η εφαρμογή οπτικών ινών στη διαχείριση λυμάτων βασίζεται σε συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά που τις καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλες για απαιτητικά και διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως αυτά των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και των δικτύων αποχέτευσης. Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης τους σχετίζονται με την υψηλή ευαισθησία, την ακρίβεια μετρήσεων, την αντοχή σε χημικούς και φυσικούς παράγοντες και την λειτουργική ασφάλεια (Mohammad Hany Yassin, 2024).

Ευαισθησία

Οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν πολύ υψηλή ευαισθησία σε μικρομεταβολές φυσικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, οι δονήσεις και η μηχανική καταπόνηση. Αυτό οφείλεται στη δυνατότητά τους να συλλαμβάνουν υποκατώφλιες μεταβολές στο φάσμα ή στη φάση του φωτός που διαδίδεται μέσα στον πυρήνα της ίνας (Yi Bao, 2019). Σε συστήματα λυμάτων, η υψηλή ευαισθησία επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση

διαρροών, καθιζήσεων εδάφους, εισροής ομβρίων και υπερφόρτισης μονάδων επεξεργασίας, προτού αυτά εξελιχθούν σε λειτουργικές αστοχίες (Manuel Bertulesi, 2023).

Ακρίβεια

Οι οπτικοί αισθητήρες παρουσιάζουν σταθερή ακρίβεια σε βάθος χρόνου, καθώς δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, γαλβανική διάβρωση ή χημική αλλοίωση, όπως συμβαίνει με πολλούς ηλεκτροχημικούς αισθητήρες (Brian Culshaw, 2008). Επιπλέον, η δυνατότητα συνεχούς βαθμονόμησης μέσω λογισμικού εξασφαλίζει χαμηλό αισθητηριακό drift, γεγονός κρίσιμο για εγκαταστάσεις που λειτουργούν 24/7 και απαιτούν σταθερή επιχειρησιακή ακρίβεια.

Αντοχή

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι η ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά, υγρά και βιολογικά φορτισμένα περιβάλλοντα. Οι ίνες δεν απαιτούν επαφή με το υγρό μέσο και μπορούν να ενσωματωθούν σε προστατευτικά καλύμματα, εξασφαλίζοντας πολύ μεγάλο χρόνο ζωής σε σχέση με τους συμβατικούς αισθητήρες (Inc. Metcalf & Eddy, 2013). Το γεγονός αυτό μειώνει σημαντικά το κόστος συντήρησης και την ανάγκη συχνών παρεμβάσεων, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό σε δυσπρόσιτες περιοχές των δικτύων αποχέτευσης.

Ασφάλεια

Οι οπτικές ίνες δεν μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα, καθιστώντας τις απολύτως ασφαλείς σε περιβάλλοντα με πιθανές συσσωρεύσεις αερίων, υψηλή υγρασία ή χημικά φορτία (Hartog A. H., 2017). Επιπλέον, επειδή η μέτρηση γίνεται από το άκρο της ίνας, δεν απαιτείται η εγκατάσταση ενεργών ηλεκτρικών στοιχείων μέσα σε επικίνδυνες περιοχές, μειώνοντας τον κίνδυνο σπινθήρων, πυρκαγιάς ή εκρήξεων. Η ασφάλεια αυτή αποτελεί βασικό πλεονέκτημα σε αντλιοστάσια, βιολογικές δεξαμενές και υπόγειους αγωγούς.

Συνολικά, η χρήση οπτικών ινών ενισχύει την προληπτική διαχείριση των υποδομών, βελτιώνει τη λειτουργική συνέχεια, μειώνει το κόστος συντήρησης και συμβάλλει στη μετάβαση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων σε μοντέλο “έξυπνων” και αυτοματοποιημένων δικτύων (Ai-Jie Wang H. L., 2024).

Υψηλό αρχικό κόστος

η ίδια η οπτική ίνα είναι σχετικά φθηνή, ο εξοπλισμός ανάλυσης σήματος (π.χ. μονάδες DTS/DAS) παραμένει σημαντική επένδυση κεφαλαίου, ιδίως σε σχέση με μεμονωμένους απλούς αισθητήρες.

Ανάγκη κατάλληλης όδευσης του καλωδίου

Για να αξιοποιηθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα της συνεχούς χωρικής κάλυψης, η οπτική ίνα πρέπει να τοποθετηθεί σε στενή φυσική επαφή ή γειτνίαση με το προς παρακολούθηση στοιχείο (π.χ. εξωτερικά ή εντός του τοιχώματος ενός αγωγού), κάτι που σε υφιστάμενα δίκτυα μπορεί να απαιτεί εκσκαφές ή ειδικές μεθόδους εγκατάστασης χωρίς εκσκαφή (trenchless installation).

Η παρακολούθηση μιας ΕΕΛ έχει διανύσει σημαντική πορεία, από τα παραδοσιακά συστήματα SCADA έως τις σύγχρονες τεχνολογίες οπτικών ινών (FBG, DTS, DAS, DSS), οι οποίες προσφέρουν αυξημένη ευαισθησία και ακρίβεια, χωρίς όμως να είναι απαλλαγμένες από περιορισμούς, όπως το κόστος και οι απαιτήσεις όδευσης του καλωδίου. Το θεωρητικό αυτό υπόβαθρο αποτελεί τη βάση της συνέχειας της εργασίας. Για να διερευνηθεί κατά πόσο οι τεχνολογίες αυτές τεκμηριώνονται στη βιβλιογραφία και εφαρμόζονται στην πράξη, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, η οποία συνδυάζει βιβλιογραφική ανασκόπηση με τη μελέτη περίπτωσης της Μονάδας Επεξεργασίας Λυμάτων Ιωαννίνων, ώστε τα συμπεράσματα να στηρίζονται τόσο σε επιστημονική τεκμηρίωση όσο και σε πραγματικά δεδομένα λειτουργίας.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά την αποτελεσματικότητα, το κόστος και τη βιωσιμότητα των οπτικών αισθητήρων στα δίκτυα αποχέτευσης και παρουσιάστηκε η εφαρμογή των οπτικών αισθητήρων σε μια ΕΕΑ (ΕΕΑ Ιωαννίνων).

4.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η αναζήτηση της σχετικής βιβλιογραφίας ακολούθησε δομημένα πρωτόκολλα για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος επιλογής (selection bias). Περιορίστηκε στις πηγές της τελευταίας δεκαετίας με έμφαση στην πρόσφατη πενταετία, ώστε να διασφαλιστεί η επικαιρότητα των τεχνολογικών δεδομένων. Για την ανάκτηση των πληροφοριών αξιοποιήθηκαν διεθνείς ακαδημαϊκές βάσεις δεδομένων υψηλού κύρους, καθώς και γκρίζα βιβλιογραφία (grey literature) από τεχνικές εκθέσεις. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν:

- Scopus & Web of Science: Επιλέχθηκαν λόγω της αυστηρής διαδικασίας αξιολόγησης (peer-review) που διασφαλίζει την ποιότητα των δημοσιεύσεων στον τομέα της μηχανικής περιβάλλοντος και της φωτονικής.
- ScienceDirect: Χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση εξειδικευμένων άρθρων σχετικά με την αρχιτεκτονική των οπτικών ινών και τους αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος.
- Google Scholar: Αξιοποιήθηκε ως συμπληρωματικό εργαλείο για τον εντοπισμό ευρύτερων αναφορών και ετεροαναφορών (citations).
- Ελληνικά Ιδρυματικά Αποθετήρια: Έγινε αναζήτηση στο Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών (ΕΑΔΔ) και σε αποθετήρια ελληνικών πολυτεχνικών σχολών για τον εντοπισμό μελετών προσαρμοσμένων στα ελληνικά δεδομένα.

Η αναζήτηση βασίστηκε σε συνδυασμούς λέξεων-κλειδιών (Boolean operators AND/OR) για να καλύψει τόσο το τεχνικό σκέλος (οπτικές ίνες) όσο και το πεδίο εφαρμογής (λύματα). Χρησιμοποιήθηκαν όροι όπως:

- “Fiber optic sensors wastewater” και “FBG (Fiber Bragg Grating) wastewater treatment” για τον εντοπισμό σημειακών αισθητήρων.
- “Distributed Sensing sewer networks” και “DAS/DTS application in sewers” για τεχνολογίες καταναμεμημένης ακουστικής και θερμικής ανίχνευσης.
- “Smart sewer systems” και “IoT wastewater monitoring” για τη διασύνδεση με συστήματα SCADA.

Αντίστοιχοι ελληνικοί όροι: «οπτικές ίνες λύματα», «έξυπνα δίκτυα αποχέτευσης», «διανεμημένη παρακολούθηση αγωγών».

Για να διασφαλιστεί η συνάφεια και η ποιότητα της ανασκόπησης, εφαρμόστηκαν αυστηρά κριτήρια επιλογής όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 5, τα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού πηγών που χρησιμοποιήθηκαν στη βιβλιογραφική επισκόπηση, με βάση τέσσερις άξονες: το χρονικό πλαίσιο, τη θεματολογία, τον τύπο πηγής και τη γεωγραφία. Ειδικότερα η επιλογή του 2015 ως χρονικού ορίου οφείλεται στη ραγδαία ωρίμανση των τεχνολογιών Καταναμεμημένης Ανίχνευσης (Distributed Sensing) εκείνη την περίοδο, η οποία κατέστησε οικονομικά βιώσιμη τη χρήση τους σε δίκτυα κοινής ωφέλειας. Δημοσιεύσεις που αφορούν υποδομές νερού/λυμάτων, ανίχνευση διαρροών και ποιοτικό έλεγχο, προερχόμενες από peer-reviewed άρθρα, διατριβές ή τεχνικές αναφορές φορέων, με έμφαση σε διεθνείς και ελληνικές μελέτες συμβατές με την ευρωπαϊκή νομοθεσία.

Κριτήριο	Κριτήρια Ένταξης (Inclusion)	Κριτήρια Αποκλεισμού (Exclusion)
Χρονικό Πλαίσιο	Δημοσιεύσεις μετά το 2015 (έμφαση σε 2019-2024).	Μελέτες πριν το 2015 (τεχνολογικά παρωχημένες).
Θεματολογία	Εφαρμογές σε υποδομές νερού/λυμάτων, ανίχνευση διαρροών, ποιοτικός έλεγχος.	Αμιγώς τηλεπικοινωνιακές μελέτες (FTTH) χωρίς περιβαλλοντική εφαρμογή.
Τύπος Πηγής	Peer-reviewed άρθρα, διδακτορικές διατριβές, Τεχνικές αναφορές φορέων (ΕΥΔΑΠ, ΔΕΥΑ).	Διαφημιστικό υλικό, άρθρα γνώμης, πηγές χωρίς βιβλιογραφική τεκμηρίωση.

Κριτήριο	Κριτήρια Ένταξης (Inclusion)	Κριτήρια Αποκλεισμού (Exclusion)
Γεωγραφία	Διεθνείς μελέτες με έμφαση στην Ε.Ε. και μελέτες περίπτωσης στην Ελλάδα.	Μελέτες με τοπικούς περιορισμούς μη εφαρμόσιμους στην ευρωπαϊκή νομοθεσία.

Πίνακας 6 Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού πηγών.

Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια:

1. Θεματική Ομαδοποίηση (Thematic Analysis): Οι πηγές κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα (σημειακοί vs κατανεμημένοι) και την παράμετρο μέτρησης (θερμοκρασία, πίεση, χημική σύσταση) (Braun, 2006)
2. Συγκριτική Αξιολόγηση: Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των τεχνολογιών ως προς:
 - Την ακρίβεια μέτρησης και τη χωρική ανάλυση.
 - Το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.
 - Τη συμβατότητα με υπάρχουσες υποδομές αποχέτευσης (retrofitting).
3. Εξαγωγή Συμπερασμάτων: Συντέθηκαν τα ευρήματα για να απαντηθεί το πώς η τεχνολογία συμβάλλει στην πρόληψη περιβαλλοντικών ατυχημάτων και στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των Βιολογικών Καθαρισμών.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε ανέδειξε το εύρος των διαθέσιμων τεχνολογιών οπτικής ανίχνευσης, τα κριτήρια αξιολόγησής τους, καθώς και τους βασικούς άξονες σύγκρισης ως προς την ακρίβεια, το κόστος και τη συμβατότητα με τις υφιστάμενες υποδομές. Στο πλαίσιο της θεωρητικής βιβλιογραφίας, διαπιστώθηκε ότι οι τεκμηριωμένες εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σχετικά περιορισμένες, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εμβάθυνση μέσω μιας συγκεκριμένης, υφιστάμενης εφαρμογής. Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεθοδολογία της μελέτης περίπτωσης που επιλέχθηκε, καθώς και τα κριτήρια βάσει των οποίων η υπό εξέταση εγκατάσταση κρίθηκε κατάλληλη να λειτουργήσει ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής.

4.2 Μεθοδολογία Μελέτης Περίπτωσης (Case Study Methodology)

Στην παρούσα εργασία, ως μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε η εφαρμογή οπτικών ινών στη Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων (ΜΕΛ) Ιωαννίνων. Η επιλογή της συγκεκριμένης μονάδας βασίστηκε στα εξής χαρακτηριστικά που την καθιστούν πρότυπο (reference project):

- Τεχνολογική Ωριμότητα: Αποτελεί μία από τις λίγες πλήρως λειτουργικές εφαρμογές οπτικών ινών σε ελληνικό δίκτυο λυμάτων, προσφέροντας πραγματικά δεδομένα λειτουργίας και όχι μόνο θεωρητικούς σχεδιασμούς.
- Καινοτομία Υλοποίησης: Το έργο υλοποιήθηκε από εγχώριο φορέα (ΔΕΛΤΑ ΣΙΓΜΑ Α.Ε.), αποδεικνύοντας τη δυνατότητα μεταφοράς τεχνογνωσίας στην ελληνική αγορά.
- Πολυπαραμετρική Παρακολούθηση: Το σύστημα ενσωματώνει συνδυασμό τεχνολογιών DTS (Distributed Temperature Sensing) για έλεγχο θερμικών φορτίων και DSS (Distributed Strain Sensing) για στατική επάρκεια αγωγών, κάτι που σπάνια συναντάται σε ενιαία εφαρμογή.

Δια συνδεσιμότητα: Η πλήρης διασύνδεση με το κεντρικό σύστημα ελέγχου SCADA της εγκατάστασης επιτρέπει την αξιολόγηση της τεχνολογίας σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου (real-time monitoring).

Η μελέτη περίπτωσης των Ιωαννίνων αποτελεί «αποδεικτικό παράδειγμα» (proof of concept) της εφαρμοσιμότητας της τεχνολογίας. Μέσω της ανάλυσης των τεχνικών αναφορών της ΔΕΛΤΑ ΣΙΓΜΑ Α.Ε., πώς η θεωρητική γνώση (που αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια) μεταφράζεται σε πρακτική λύση για τη βιομηχανία επεξεργασίας λυμάτων.

Οι περιορισμοί στη μελέτη περίπτωσης αφορούσαν τη :

Διαθεσιμότητα οικονομικών στοιχείων και την έλλειψη μακροχρόνιων δεδομένων. Λόγω του εμπορικού απορρήτου πολλών τεχνολογικών παροχών, η πρόσβαση σε ακριβή κοστολογικά στοιχεία υλοποίησης (CAPEX/OPEX) είναι περιορισμένη. Επίσης, καθώς η τεχνολογία είναι σχετικά νέα στον τομέα των λυμάτων (σε αντίθεση με το πετρέλαιο/αέριο), υπάρχουν περιορισμένες μελέτες που να εξετάζουν τη γήρανση των οπτικών ινών σε χημικά επιβαρυνμένο περιβάλλον σε βάθος 20ετίας.

Ανάλυση και Λειτουργική Βελτιστοποίηση της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Ιωαννίνων: Από τη Συμβατική Διαχείριση στα Έξυπνα Συστήματα Παρακολούθησης

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης εστιάζει στη λειτουργική ανάλυση, τις τεχνικές προδιαγραφές και τον στρατηγικό εκσυγχρονισμό της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Ιωαννίνων. Η Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Ιωαννίνων (ΔΕΥΑΙ) είναι το νομικό πρόσωπο ιδιωτικού δικαίου που έχει την ευθύνη ύδρευσης, αποχέτευσης και επεξεργασίας λυμάτων για τον Δήμο Ιωαννιτών, ο οποίος, σύμφωνα με την Απογραφή Πληθυσμού-Κατοικιών του 2021 της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής, αριθμεί 86.494 κατοίκων, με την ίδια την πόλη των Ιωαννίνων να έχει πληθυσμό 64.896 κατοίκων και τον ευρύτερο μητροπολιτικό δήμο να φτάνει τους 113.978 κατοίκους. Ο Δήμος Ιωαννιτών συγκεντρώνει περίπου το ένα τρίτο του συνολικού πληθυσμού της Περιφέρειας Ηπείρου, καθιστώντας τον τον πλέον αστικοποιημένο δήμο της περιοχής ((ΕΛΣΤΑΤ), 2023)

Η ΔΕΥΑΙ λειτουργεί υπό το θεσμικό πλαίσιο του Ν. 1069/1980 για τις Δημοτικές Επιχειρήσεις Ύδρευσης-Αποχέτευσης, υπό την εποπτεία του Δήμου Ιωαννιτών, και έχει την ευθύνη τόσο του δικτύου ύδρευσης όσο και του δικτύου αποχέτευσης ακαθάρτων και της ΕΕΛ. Από την επισκόπηση της επίσημης δραστηριότητάς της, προκύπτει ότι η επιχείρηση βρίσκεται σε φάση ενεργού επενδυτικού προγραμματισμού, με πλήθος παράλληλων έργων υποδομής, κατασκευή δικτύων αποχέτευσης ακαθάρτων, επέκταση εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, προμήθεια και εγκατάσταση συστημάτων παρακολούθησης υδροληψιών- πολλά εκ των οποίων συγχρηματοδοτούνται από ευρωπαϊκούς πόρους.

Η συγκεκριμένη υποδομή αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της περιβαλλοντικής προστασίας του λεκανοπεδίου των Ιωαννίνων, λειτουργώντας ως ασπίδα για το ευαίσθητο και ευτροφικό οικοσύστημα της λίμνης Παμβώτιδας. Η μελέτη διαρθρώνεται σε τρεις κύριους άξονες: α) την αναλυτική περιγραφή της γραμμής ύδατος και της γραμμής ιλύος, β) την αξιολόγηση της ενεργειακής ανάκτησης μέσω της παραγωγής βιοαερίου, και γ) την τεχνικοοικονομική διερεύνηση της ενσωμάτωσης καινοτόμων τεχνολογιών παρακολούθησης. Ειδικότερα, εξετάζεται η μετάβαση από τα συμβατικά συστήματα ελέγχου (SCADA με διακριτούς αισθητήρες) σε κατανεμημένα

συστήματα οπτικών ινών (Distributed Temperature/Strain Sensing DTS/DSS). Η μελέτη περίπτωσης, βασισμένη σε δεδομένα εφαρμογής της εταιρείας ΔΕΛΤΑ ΣΙΓΜΑ Α.Ε., καταδεικνύει πώς η ψηφιακή αναβάθμιση μετατρέπει το παθητικό δίκτυο σε ένα «έξυπνο» σύστημα προληπτικής συντήρησης, επιτυγχάνοντας μείωση του λειτουργικού κόστους, αύξηση του χρόνου ζωής των υποδομών και μεγιστοποίηση της περιβαλλοντικής ασφάλειας.

5.1 Το Γεωγραφικό και Περιβαλλοντικό Πλαίσιο

Η ΕΕΛ Ιωαννίνων εξυπηρετεί τον διευρυμένο Καλλικρατικό Δήμο, μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από έντονη οικιστική ανάπτυξη και τουριστική δραστηριότητα. Το αποχετευτικό δίκτυο μεταφέρει τα λύματα σε μια περιοχή χαμηλότερου υψομέτρου, όπου βρίσκεται η μονάδα. Η κρισιμότητα της θέσης έγκειται στην εγγύτητα με τη λίμνη Παμβώτιδα. Η λίμνη, ένα ρηχό πολυμικτικό οικοσύστημα, αντιμετωπίζει εδώ και δεκαετίες φαινόμενα ευτροφισμού λόγω εισροών θρεπτικών συστατικών (αζώτου και φωσφόρου) από γεωργικές απορροές και αστικά λύματα (Μαρτάκης, 2018)

Οι έντονες βροχοπτώσεις που χαρακτηρίζουν το κλίμα της Ηπείρου, σε συνδυασμό με την εποχική αύξηση του πληθυσμού, προκαλούν μεγάλες διακυμάνσεις στα υδραυλικά φορτία εισόδου. Αυτό απαιτεί από την ΕΕΛ υψηλή ευελιξία και ανθεκτικότητα (resilience), ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα έκπλυσης της βιομάζας ή υπερχειλίσσης ακατέργαστων λυμάτων στον αποδέκτη.

5.2 Τεχνική Περιγραφή Της ΕΕΛ Ιωαννίνων (Γραμμή Ύδατος)

5.2.1 Σχεδιασμός και Δυναμικότητα

Η ΕΕΛ Ιωαννίνων είναι η κεντρική εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων που εξυπηρετεί την πόλη των Ιωαννίνων και τους γειτονικούς οικισμούς του Δήμου Ιωαννιτών, ακολουθώντας σύμφωνα με τις διαθέσιμες δημόσιες πηγές- τυπική διάταξη συμβατικής δευτεροβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας, με σταδιακή προσθήκη προηγμένων μονάδων διαχείρισης ιλύος τα τελευταία έτη. Επισημαίνεται ρητά ότι η

πλήρης τεχνική περιγραφή όλων των επιμέρους μονάδων επεξεργασίας δεν είναι διαθέσιμη μέσω δημόσια προσβάσιμων πηγών κατά τον χρόνο εκπόνησης της παρούσας εργασίας, και συνεπώς η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται σε όσα στοιχεία έχουν δημοσιοποιηθεί από τη ΔΕΥΑΙ, τον Δήμο Ιωαννιτών.

5.2.2 Υδραυλική δυναμικότητα

Με τη λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού η ποσότητα 26.000 κυβικών μέτρων ως ποσότητα λυμάτων που πρόκειται να τυγχάνει επεξεργασίας στο πλαίσιο αναβαθμισμένης λειτουργίας της εγκατάστασης. Η ακριβής χρονική βάση αναφοράς δεν προσδιορίζεται με απόλυτη σαφήνεια στις διαθέσιμες πηγές, ωστόσο το μέγεθος αυτό είναι συμβατό με μια εγκατάσταση σχεδιασμένη να εξυπηρετεί πληθυσμό της τάξης των 100.000-150.000 ισοδύναμων κατοίκων, λαμβάνοντας υπόψη τυπική ειδική παροχή αστικών λυμάτων (περίπου 150-250 λίτρα ανά κάτοικο ημερησίως, συμπεριλαμβανομένης της διείσδυσης υπόγειων και ομβρίων υδάτων σε παλαιότερα δίκτυα), μέγεθος συμβατό με τον συνολικό πληθυσμό του ευρύτερου Δήμου Ιωαννιτών και την εποχιακή τουριστική επιβάρυνση της περιοχής.

5.2.3 Πρόσφατη αναβάθμιση: η Μονάδα Ηλιακής Ξήρανσης Ιλύος

Η σημαντικότερη πρόσφατη επένδυση υποδομής στην ΕΕΛ Ιωαννίνων είναι η νέα Μονάδα Ηλιακής Ξήρανσης Ιλύος, τα εγκαίνια της οποίας πραγματοποιήθηκαν στις 19 Ιουνίου 2026 από τον Δήμο Ιωαννιτών και τη ΔΕΥΑΙ. Η μονάδα διαθέτει σύστημα ηλιακών ξηραντηρίων σε μορφή θερμοκηπίων, συνολικής ωφέλιμης επιφάνειας 3.960 τετραγωνικών μέτρων, με δυνατότητα επεξεργασίας άνω των 8.000 τόνων αφυδατωμένης ιλύος ετησίως. Σκοπός της μονάδας είναι η σημαντική μείωση του όγκου της παραγόμενης λυματολάσπης και η ολοκληρωμένη διαχείρισή της με περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο, στο πλαίσιο προώθησης της κυκλικής οικονομίας.

Η μονάδα αυτή αποτελεί ενδεικτικό παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο η ΕΕΛ Ιωαννίνων βρίσκεται σε μια μεταβατική φάση εκσυγχρονισμού των υποδομών διαχείρισης ιλύος.

5.3 Το δίκτυο αποχέτευσης και οι διαρθρωτικές του προκλήσεις

Πέραν της ίδιας της εγκατάστασης επεξεργασίας, κρίσιμο ρόλο για τη συνολική απόδοση του συστήματος παίζει η κατάσταση του δικτύου συλλογής και μεταφοράς λυμάτων. Με λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού αντιμετωπίζεται η ύπαρξη χρόνιου προβλήματος της αποχέτευσης, με παράνομες συνδέσεις και παλαιότητα αγωγών, το οποίο συνδέεται με αυξημένη και μη ελεγχόμενη εισροή ομβρίων υδάτων στο δίκτυο ακαθάρτων, ιδίως σε περιόδους έντονης βροχόπτωσης.

5.4 Το έργο τηλεμετρίας: υλοποίηση, απένταξη και σημασία για την παρούσα εργασία

5.4.1 Περιγραφή του έργου

Στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Υποδομές Μεταφορών, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη» (ΥΜΕΠΕΡΑΑ) 2014-2020, η ΔΕΥΑΙ είχε ενταχθεί, τον Μάρτιο του 2023, σε έργο συνολικού προϋπολογισμού 8,9 εκατομμυρίων ευρώ με τίτλο «Προμήθεια και εγκατάσταση συστημάτων παρακολούθησης υδροληψιών ΔΕΥΑ Ιωαννίνων», με στόχο την εγκατάσταση προηγμένων συστημάτων τηλεμετρίας τόσο στο εξωτερικό υδραγωγείο όσο και στα εσωτερικά δίκτυα της πόλης. Σύμφωνα με επίσημη ενημέρωση της ΔΕΥΑΙ, το πρώτο υποέργο του έργου (Υποέργο 1) είχε ολοκληρωθεί σε ποσοστό 100%, περιλαμβάνοντας:

- 29 Τοπικούς Σταθμούς Ελέγχου (ΤΣΕ) στο εξωτερικό υδραγωγείο·
- 15 σταθμούς τηλεμετρίας παροχής και πίεσης (ΤΣΕΠΠ) σε κόμβους των εσωτερικών δικτύων·
- 2 σταθμούς σε κρίσιμα σημεία του δικτύου (ΤΣΕΠ)·
- 5 σταθμούς παρακολούθησης ποιότητας νερού (ΤΣΕΠΝ)·

καθώς και την προμήθεια και εγκατάσταση λογισμικού Κεντρικού Σταθμού Ελέγχου (ΚΣΕ), με δοκιμαστική λειτουργία ήδη σε εξέλιξη.

5.5 Ευρύτερο επενδυτικό πρόγραμμα της ΔΕΥΑΙ

Πέραν της μονάδας ηλιακής ξήρανσης ιλύος και του έργου τηλεμετρίας, η επισκόπηση της δραστηριότητας της ΔΕΥΑΙ αναδεικνύει ένα ευρύτερο, πολυεπίπεδο πρόγραμμα έργων υποδομής σε εξέλιξη, στο οποίο περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, η κατασκευή δικτύων αποχέτευσης ακαθάρτων στη Δημοτική Ενότητα Ιωαννίνων και η επέκταση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων του Δήμου Ιωαννιτών. Η ύπαρξη αυτού του παράλληλου προγράμματος έργων εκσκαφής και επέκτασης δικτύου ενισχύει ακριβώς το επιχείρημα σχετικά με τη δυνατότητα ενσωμάτωσης καλωδίου οπτικής ίνας με οριακό πρόσθετο κόστος, αξιοποιώντας εκσκαφές που θα πραγματοποιηθούν. Παράλληλα, αντιμετωπίζει την πολυπλοκότητας διαχείρισης ενός δικτύου υποδομών αυτής της κλίμακας όπως προγραμματισμένες διακοπές υδροδότησης λόγω εργασιών συντήρησης ή λόγω εργασιών τρίτων φορέων (1069/1980)

5.6 Γεωγραφικό και περιβαλλοντικό πλαίσιο: η λίμνη Παμβώτιδα ως τελικός αποδέκτης

Η γεωγραφική θέση της πόλης των Ιωαννίνων, χτισμένης στις όχθες της λίμνης Παμβώτιδας, προσδίδει ιδιαίτερη περιβαλλοντική ευαισθησία στη λειτουργία της ΕΕΛ. Η Παμβώτιδα είναι κλειστή λίμνη, χωρίς σημαντική φυσική απορροή προς τη θάλασσα, γεγονός που την καθιστά εγγενώς ευάλωτη σε φαινόμενα ευτροφισμού από τυχόν ανεπαρκώς επεξεργασμένη είσοδο θρεπτικών (αζώτου, φωσφόρου). Η λίμνη αποτελεί ταυτόχρονα σημαντικό οικολογικό πόρο (προστατευόμενη περιοχή, ενδιαίτημα ενδημικών ειδών) και πόλο τουριστικής δραστηριότητας και αναψυχής, γεγονός που εξηγεί εν μέρει την αυξημένη δημόσια ευαισθησία γύρω από τη λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού, καθώς οποιαδήποτε υποψία υποβάθμισης της ποιότητας της λίμνης προσλαμβάνεται από την τοπική κοινωνία ως ζήτημα άμεσης καθημερινής σημασίας και όχι ως αφηρημένο περιβαλλοντικό θέμα.

Η υδρολογική ιδιαιτερότητα μιας κλειστής λίμνης ενισχύει περαιτέρω το επιχείρημα υπέρ συνεχούς, τεκμηριωμένης παρακολούθησης της ποιότητας εκροής: σε αντίθεση με έναν ποταμό ή παράκτιο αποδέκτη με σημαντική ανανέωση, μια κλειστή λίμνη συσσωρεύει σταδιακά την επίδραση οποιασδήποτε χρόνιας, έστω και μικρής,

υπέρβασης ορίων εκροής, καθιστώντας την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων μετά την εκδήλωση ορατών συμπτωμάτων.

5.7 Εποχιακή διακύμανση φορτίου: τουρισμός, φοιτητικός πληθυσμός και υδραυλική καταπόνηση

Τα Ιωάννινα φιλοξενούν σημαντικό αριθμό φοιτητών λόγω της παρουσίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, καθώς και αυξημένη τουριστική κίνηση σε συγκεκριμένες περιόδους του έτους. Η εποχιακή αυτή διακύμανση πληθυσμού συνεπάγεται αντίστοιχη διακύμανση του υδραυλικού και ρυπαντικού φορτίου που καλείται να διαχειριστεί η ΕΕΛ, με συνέπειες τόσο στην ενεργειακή κατανάλωση όσο και στη σταθερότητα της βιολογικής διεργασίας.

Ένα σύστημα συνεχούς παρακολούθησης, ανεξαρτήτως τεχνολογίας, είναι εγγενώς καταλληλότερο για τη διαχείριση τέτοιων εποχιακών διακυμάνσεων σε σχέση με στατικές παραδοχές σχεδιασμού, καθώς επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή λειτουργικών παραμέτρων στις πραγματικές, μεταβαλλόμενες συνθήκες φορτίου, αντί σε σταθερές, συντηρητικές ρυθμίσεις σχεδιασμένες για τη «χειρότερη περίπτωση». Η δυνατότητα αυτή αποτελεί άμεση σύνδεση με τους στόχους ενεργειακής απόδοσης της Οδηγίας (ΕΕ) 2024/3019.

5.8 Συγκριτική τοποθέτηση έναντι άλλων ελληνικών ΔΕΥΑ

Η ΔΕΥΑΙ δεν λειτουργεί σε θεσμικό κενό, αλλά εντάσσεται σε ένα ευρύτερο σύνολο περίπου 120 Δημοτικών Επιχειρήσεων Ύδρευσης-Αποχέτευσης που δραστηριοποιούνται στην ελληνική περιφέρεια, πολλές εκ των οποίων αντιμετωπίζουν συναφείς προκλήσεις κλίμακας, χρηματοδότησης και τεχνικής επάρκειας. Μεγαλύτεροι φορείς κοινής ωφέλειας, όπως η ΕΥΑΘ (Θεσσαλονίκη) ή η ΕΥΔΑΠ (Αθήνα), λειτουργώντας υπό καθεστώς ανώνυμης εταιρείας με ευρύτερη οικονομική βάση και μεγαλύτερη κλίμακα εξυπηρετούμενου πληθυσμού, έχουν προχωρήσει συγκριτικά ταχύτερα σε πιλοτικές εφαρμογές ψηφιακής παρακολούθησης και

ανάλυσης δεδομένων, αξιοποιώντας τόσο ίδιους πόρους όσο και εξειδικευμένο προσωπικό σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Αντίθετα, ΔΕΥΑ μεσαίας κλίμακας όπως η ΔΕΥΑΙ, αλλά και αντίστοιχοι φορείς σε άλλες περιφερειακές πρωτεύουσες συγκρίσιμου πληθυσμιακού μεγέθους, αντιμετωπίζουν συνηθέστερα τον συνδυασμό περιορισμένης οικονομικής αυτονομίας, εξάρτησης από συγχρηματοδοτούμενα προγράμματα, και μικρότερης δυνατότητας απορρόφησης εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού. Η θέση αυτή της ΔΕΥΑΙ ως αντιπροσωπευτικού παραδείγματος «μεσαίας κλίμακας» ελληνικού φορέα διαχείρισης λυμάτων.

5.9 Ενδεικτική χαρτογράφηση κρίσιμων σημείων δικτύου

Η ακριβής χαρτογράφηση του δικτύου αποχέτευσης της ΔΕΥΑΙ κρίνεται απαραίτητη για την ιεράρχηση των κρίσιμων σημείων του συστήματος που θα ωφελούνταν περισσότερο από ενισχυμένη παρακολούθηση.

1. Οι κύριοι συλλεκτές μεταφοράς λυμάτων από τις πυκνότερα κατοικημένες Δημοτικές Ενότητες (Ιωαννινών, με πληθυσμό 59.037 κατοίκων σύμφωνα με την Απογραφή 2021, και Παμβώτιδος) προς την ΕΕΛ, ως τα σημεία με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση φορτίου και συνεπώς τον μεγαλύτερο κίνδυνο σε περίπτωση αστοχίας.
2. Τα σημεία σύνδεσης παλαιότερων τμημάτων δικτύου με νεότερες επεκτάσεις, όπου η ασυμβατότητα υλικών ή η διαφορετική παλαιότητα αυξάνει στατιστικά την πιθανότητα διαρροών.
3. Οι περιοχές πλησίον της λίμνης Παμβώτιδας, όπου η υψηλή στάθμη υπόγειου νερού ενισχύει τον κίνδυνο εισροών σε δίκτυα βαρύτητας, όπως αναφέρθηκε έμμεσα στη δημόσια συζήτηση περί ροής ομβρίων.
4. Τα αντλιοστάσια ανύψωσης εντός του δικτύου, ως σημεία συγκέντρωσης μηχανολογικού κινδύνου.

Η ιεράρχηση αυτή προτείνεται ως σημείο εκκίνησης τον προσδιορισμό του τμήματος δικτύου που θα επιλεγεί για την πιλοτική Φάση Α του πλαισίου ενσωμάτωσης, η τελική

επιλογή του οποίου θα πρέπει φυσικά να βασιστεί σε πραγματικά δεδομένα ιστορικού βλαβών της ΔΕΥΑΙ, μη διαθέσιμα στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

5.10 Συνθετική αποτίμηση: SWOT ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης

Η υφιστάμενη κατάσταση παρακολούθησης της ΕΕΛ Ιωαννίνων και του συνδεδεμένου δικτύου μπορεί να συνοψιστεί μέσω μιας ποιοτικής ανάλυσης SWOT (Δυνατά σημεία, Αδυναμίες, Ευκαιρίες, Απειλές):

- Δυνατά σημεία: Ενεργός επενδυτικός προγραμματισμός και πρόσφατη υλοποίηση σημαντικών έργων υποδομής (Μονάδα Ηλιακής Ξήρανσης Ιλύος). Ήδη υλοποιημένη, σε μεγάλο βαθμό, υποδομή τηλεμετρίας δικτύου ύδρευσης, με Κεντρικό Σταθμό Ελέγχου σε δοκιμαστική λειτουργία. Θεσμική εμπειρία διαχείρισης συγχρηματοδοτούμενων έργων υποδομής.
- Αδυναμίες: Η τηλεμετρία επικεντρώνεται κυρίως στο δίκτυο ύδρευσης, με περιορισμένη τεκμηριωμένη κάλυψη του δικτύου αποχέτευσης και μεταφοράς λυμάτων. Τα διαρθρωτικά προβλήματα δικτύου αποχέτευσης (παλαιότητα, παράνομες συνδέσεις, εισροές ομβρίων).
- Ευκαιρίες: Το νέο κανονιστικό πλαίσιο (Οδηγία ΕΕ 2024/3019) δημιουργεί θεσμική πίεση και δυνητικά νέες χρηματοδοτικές ευκαιρίες για επενδύσεις σε ψηφιακή παρακολούθηση. Η τρέχουσα φάση αναβάθμισης υποδομών (μονάδα ξήρανσης ιλύος, ήδη εν εξελίξει επεκτάσεις δικτύου) προσφέρει την ευκαιρία για την ενσωμάτωση οπτικών ινών με οριακό πρόσθετο κόστος

Απειλές: Πιθανή αντίσταση στην αλλαγή ή έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού για τη διαχείριση νέων τεχνολογιών.

5.11 Στάδια Επεξεργασίας, Διαχείριση Ιλύος και Καινοτόμα Συστήματα Παρακολούθησης στην ΕΕΛ Ιωαννίνων

5.11.1 Προκαταρκτική Επεξεργασία (Pre-treatment)

Η εισροή των λυμάτων γίνεται μέσω του κεντρικού συλλεκτήριου αγωγού με την χρήση το κοχλία του Αρχιμήδη όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4. Το στάδιο της προεπεξεργασίας είναι καθοριστικό για την προστασία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού των επόμενων βαθμίδων:

1. Εσχάρωση (Screening): Χρησιμοποιούνται αυτόματες εσχάρες (χονδρές και λεπτές) για την συγκράτηση στερεών (ξύλα, πλαστικά, υφάσματα) όπως παρουσιάζεται την Εικόνα 5. Τα παρακρατήματα συμπιέζονται και οδηγούνται προς υγειονομική ταφή. Η αστοχία σε αυτό το στάδιο μπορεί να οδηγήσει σε έμφραξη των αντλιών ή των διαχυτών αέρα.
2. Εξάμμωση - Λιποσυλλογή (Grit & Grease Removal): Σε αεριζόμενες δεξαμενές πραγματοποιείται ο διαχωρισμός. Η άμμος, έχοντας μεγαλύτερο ειδικό βάρος, καθιζάνει και απομακρύνεται για να μην προκαλέσει φθορές (abrasion) στους σωλήνες και μείωση του ωφέλιμου όγκου των αντιδραστήρων. Τα λίπη και έλαια, που επιπλέουν με τη βοήθεια φυσαλίδων αέρα, συλλέγονται από την επιφάνεια όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Η αφαίρεσή τους είναι κρίσιμη, καθώς η παρουσία τους στη βιολογική βαθμίδα εμποδίζει τη μεταφορά οξυγόνου στη βιομάζα.



Εικόνα 4 Μεταφορά λημμάτων με χρήση κοχλία του Αρχιμήδη



Εικόνα 5 Στάδιο εσχάρωσης



Εικόνα 6 Στάδιο Λιποσυλλογής

5.11.2 Δευτεροβάθμια (Βιολογική) Επεξεργασία

Ο πυρήνας της ΕΕΛ Ιωαννίνων είναι οι βιολογικοί αντιδραστήρες. Λόγω των αυστηρών ορίων εκροής για τη λίμνη, εφαρμόζεται σχήμα διεργασιών για Βιολογική Αφαίρεση Αζώτου και Φωσφόρου (BNR - Biological Nutrient Removal). Η διαδικασία περιλαμβάνει διακριτές ζώνες:

- **Αναερόβια Ζώνη (Anaerobic Zone):** Εδώ εισέρχονται τα λύματα αναμεμειγμένα με την ανακυκλοφορία της ιλύος. Απουσία οξυγόνου και νιτρικών, ευνοείται η ανάπτυξη μικροοργανισμών που συσσωρεύουν φώσφορο (PAOs - Polyphosphate Accumulating Organisms). Οι οργανισμοί αυτοί απελευθερώνουν φώσφορο σε αυτό το στάδιο, για να τον προσλάβουν σε πολλαπλάσια ποσότητα στην αερόβια ζώνη, επιτυγχάνοντας την απομάκρυνσή του από το υγρό στοιχείο.

- Ανοξική Ζώνη (Anoxic Zone): Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η απονιτροποίηση. Τα νιτρικά ιόντα, που παράγονται στην αερόβια ζώνη και επιστρέφουν εδώ μέσω εσωτερικής ανακυκλοφορίας, ανάγονται σε αέριο άζωτο που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Η διαδικασία απαιτεί πηγή άνθρακα, η οποία παρέχεται από το οργανικό φορτίο των εισερχόμενων λυμάτων.
- Αερόβια Ζώνη (Aerobic Zone): Με την παροχή μηχανικού αερισμού (φυσητήρες και δίσκοι διάχυσης) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7, επιτυγχάνονται δύο στόχοι: α) Η οξείδωση της οργανικής ύλης (μείωση BOD) από ετερότροφα βακτήρια και β) η νιτροποίηση, δηλαδή η οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά από αυτότροφα βακτήρια (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*).

Η παρακολούθηση του Διαλυμένου Οξυγόνου (DO) και του δυναμικού οξειδοαναγωγής (ORP) σε αυτές τις δεξαμενές είναι ζωτικής σημασίας για την ενεργειακή απόδοση και τη βιολογική σταθερότητα.



Εικόνα 7 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

5.11.3 Τριτοβάθμια Επεξεργασία και Τελική Διάθεση

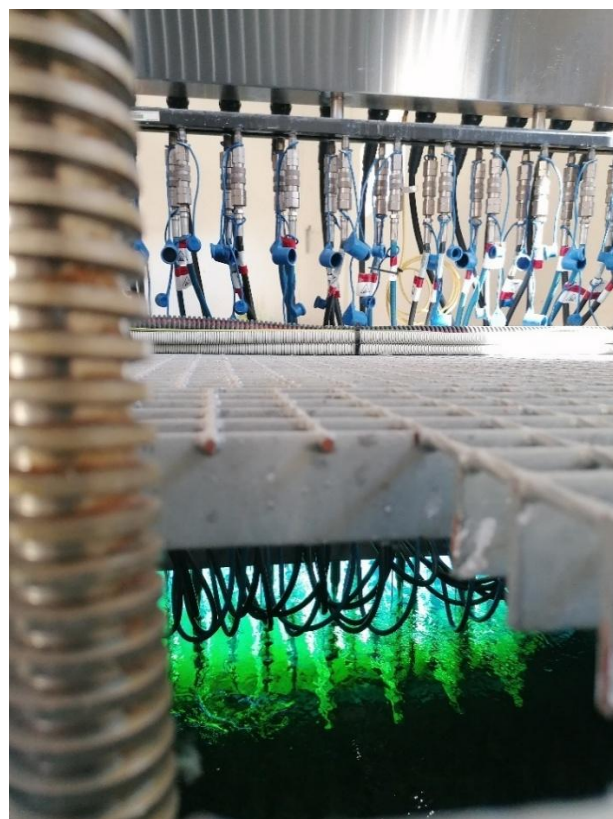
Τα επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται στις Δεξαμενές Τελικής Καθίζησης, όπου διαχωρίζεται η ενεργός ιλύς από το καθαρό υπερκείμενο υγρό όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8. Το καθαρό νερό υφίσταται διύλιση μέσω φίλτρων άμμου για την περαιτέρω μείωση των αιωρούμενων στερεών (TSS) και απολύμανση (συνήθως με χλωρίωση ή υπεριώδη ακτινοβολία UV) για την εξάλειψη παθογόνων μικροοργανισμών (κολοβακτηρίδια) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 9 και Εικόνα 10. Η τελική εκροή, πλήρως απαλλαγμένη από ρύπους βάσει της νομοθεσίας, διοχετεύεται στον αποδέκτη, συμβάλλοντας στον υδατικό ισοζύγιο της λίμνης χωρίς να τη επιβαρύνει.



Εικόνα 8 Τριτοβάθμια επεξεργασία δεξαμενές τελικής καθίζησης



Εικόνα 9 Στάδιο χλωρίωσης



Εικόνα 10 Στάδιο με υπεριώδη ακτινοβολία UV

5.12 Διαχείριση Ιλύος Και Ενεργειακή Αξιοποίηση

5.12.1 Γραμμή Επεξεργασίας Ιλύος

Η διαχείριση της παραγόμενης λάσπης (ιλύος) αποτελεί το πιο δαπανηρό και περίπλοκο τμήμα της λειτουργίας μιας ΕΕΛ. Στα Ιωάννινα, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- **Μηχανική Πύκνωση:** Η πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια ιλύς οδηγούνται σε ταινιοπυκνωτές ή τράπεζες βαρύτητας για την αφαίρεση μέρους του ύδατος, μειώνοντας τον υδραυλικό όγκο που θα εισέλθει στους χωνευτές.
- **Αναερόβια Χώνευση:** Η πυκνωμένη ιλύς εισέρχεται σε κλειστούς αναερόβιους χωνευτές. Υπό μεσόφιλες συνθήκες (θερμοκρασία ~35-37°C) και απουσία οξυγόνου, αναερόβια βακτήρια διασπούν την οργανική ύλη και στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η συλλογή τη ίλης. Η διαδικασία αυτή σταθεροποιεί την ιλύ (μειώνει την οσμή και τα παθογόνα) και μειώνει τη μάζα των στερεών κατά περίπου 30-40%.
- **Αφυδάτωση:** Η χωνεμένη ιλύς, όντας πλέον σταθεροποιημένη, οδηγείται σε μονάδα μηχανικής αφυδάτωσης (φυγόκεντροι διαχωριστές - decanters). Με τη προσθήκη πολυηλεκτρολύτη, επιτυγχάνεται περιεκτικότητα σε στερεά περίπου 20-25%, καθιστώντας την κατάλληλη για μεταφορά και τελική διάθεση (π.χ. κομποστοποίηση ή υγειονομική ταφή) στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται ο ρομποτικός μηχανισμός διάστασης στο χώρο του θερμοκηπίου.

Τα στάδια επεξεργασίας και διαχειρίσεις στην στην ΕΕΛ Ιωαννίνων παρουσιάζονται στην Εικόνα 13.

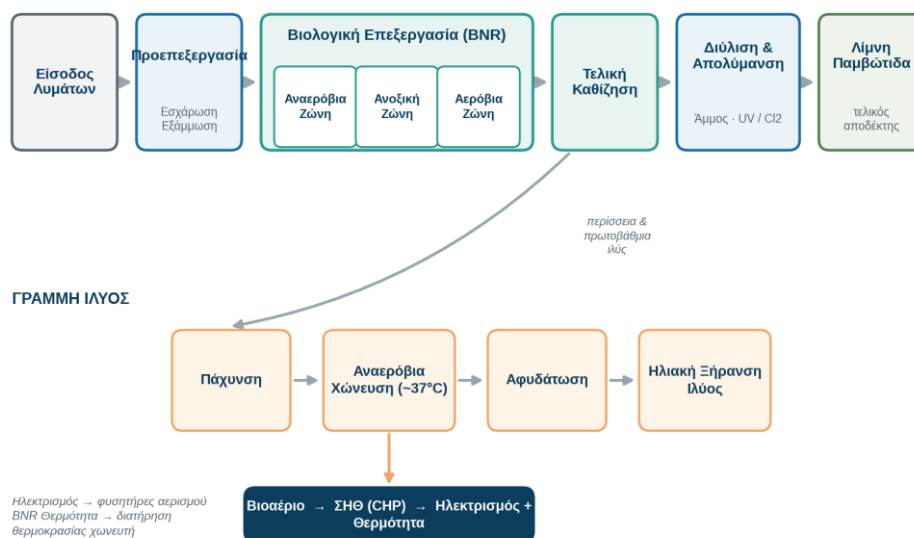


Εικόνα 11 Στάδιο συλλογής μετά την αναερόβια χώνευση



Εικόνα 12 Στάδιο αφυδάτωσης και διάστρωσης με ρομποτικό όχημα

Γραμμή Επεξεργασίας της ΕΕΛ Ιωαννίνων ΓΡΑΜΜΗ ΥΔΑΤΟΣ



Εικόνα 13 Γραμμή επεξεργασίας ΕΕΛ Ιωαννίνων

5.12.2 Ενεργειακή Αυτονόμηση: Βιοαέριο και ΣΗΘ

Το σημαντικότερο υποπροϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο, ένα μείγμα μεθανίου (60-65%) και διοξειδίου του άνθρακα. Στην ΕΕΛ Ιωαννίνων, το βιοαέριο δεν καίγεται απλώς σε πυρσό, αλλά αξιοποιείται ενεργειακά σε μονάδες Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ - CHP).

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο της μονάδας, καλύπτοντας σημαντικό μέρος των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων των φυσητήρων αερισμού. Παράλληλα, η θερμική ενέργεια που ανακτάται από τα καυσάερια και το σύστημα ψύξης της μηχανής ΣΗΘ χρησιμοποιείται για τη θέρμανση των χωνευτών, διατηρώντας τη θερμοκρασία στους 37°C, απαραίτητη προϋπόθεση για τη βέλτιστη απόδοση των μεθανογόνων βακτηρίων. Αυτή η διαδικασία μειώνει δραστικά το ενεργειακό αποτύπωμα της εγκατάστασης και το λειτουργικό κόστος.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε στο Κεφάλαιο 5 προέκυψε σαφής εικόνα της ΕΕΛ Ιωαννίνων. Η εγκατάσταση με στέρεη συμβατική υποδομή, ενισχυμένη πρόσφατα από σημαντικές επενδύσεις όπως η Μονάδα Ηλιακής Ξήρανσης Ιλύος και ενταγμένη σε ενεργό επενδυτικό πρόγραμμα της ΔΕΥΑΙ. Η SWOT ανάλυση ανέδειξε όμως και τα όρια της σημερινής παρακολούθησης: τηλεμετρία εστιασμένη κυρίως στην ύδρευση,

διαρθρωτικά προβλήματα αποχέτευσης, και εξάρτηση από συγκεκριμένους χρηματοδοτικούς κύκλους. Η ΕΕΛ διαθέτει, συνεπώς, την ωριμότητα υποδομών για τον εκσυγχρονισμό, όχι όμως ακόμη τη συνεχή, κατανομημένη εποπτεία που θα επέτρεπε τη μετάβαση από την αντιδραστική στην προληπτική διαχείριση. Σε αυτό το κενό εστιάζει το Κεφάλαιο 6, παρουσιάζοντας την εφαρμογή τεχνολογιών οπτικών ινών ως απάντηση στη μετάβαση από τα συμβατικά συστήματα ελέγχου προς τα έξυπνα συστήματα παρακολούθησης.

Εκσυγχρονισμός Συστημάτων Παρακολούθησης - Η Εφαρμογή Οπτικών Ινών

6.1 Η Ανάγκη Μετάβασης σε Συστήματα Κατανεμημένης Παρακολούθησης

Οι εφαρμογές των οπτικών ινών στον τομέα της διαχείρισης λυμάτων έχουν σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία, καθώς οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) καλούνται να ανταποκριθούν σε αυξανόμενες απαιτήσεις για συνεχή παρακολούθηση, βελτιστοποίηση της λειτουργικής αξιοπιστίας, μείωση του λειτουργικού κόστους και συμμόρφωση με αυστηρότερα περιβαλλοντικά πρότυπα (J. M. Lopez-Higuera, 2011). Στο πλαίσιο αυτό εντάσσεται και ο εκσυγχρονισμός της παρακολούθησης της ΕΕΛ Ιωαννίνων, ο οποίος αποτελεί το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου.

Μέχρι πρόσφατα, η λειτουργία της βασιζόταν αποκλειστικά στο παραδοσιακό μοντέλο SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), το οποίο αντλεί δεδομένα από σημειακούς ηλεκτροχημικούς αισθητήρες. Παρά τη χρησιμότητά τους, οι αισθητήρες αυτοί παρουσιάζουν εγγενείς αδυναμίες: παρέχουν δεδομένα μόνο για το συγκεκριμένο σημείο τοποθέτησής τους, αφήνοντας «τυφλά σημεία» εκατοντάδων μέτρων στο δίκτυο σωληνώσεων· είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στο επιθετικό χημικό περιβάλλον των λυμάτων (υδροθείο, μεθάνιο, οξέα), το οποίο προκαλεί γρήγορη φθορά (drift) στις ενδείξεις τους και απαιτεί συχνή βαθμονόμηση και αντικατάσταση· και οδηγούν, τέλος, σε αντιδραστική και όχι προληπτική λειτουργία, καθώς βλάβες όπως μια διαρροή αγωγού γίνονταν αντιληπτές μόνο αφού είχαν ήδη προκαλέσει ορατό πρόβλημα.

Πέραν αυτών των λειτουργικών περιορισμών, η επιλογή τεχνολογίας οπτικών ινών ενισχύεται και από εγγενή πλεονεκτήματα ιδιαίτερα κρίσιμα για το περιβάλλον μιας ΕΕΛ. Η οπτική ίνα έχει παθητική φύση και δεν απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια στο σημείο της μέτρησης, γεγονός που εξαλείφει τον κίνδυνο σπινθηρισμού σε χώρους όπου ενδέχεται να συσσωρεύονται εύφλεκτα αέρια όπως το μεθάνιο που παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση ενώ παράλληλα προσφέρει πλήρη ατρωσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (David Krohn, 2014).

Στο πλαίσιο του εκσυγχρονισμού, κρίθηκε συνεπώς αναγκαία η εφαρμογή μιας τεχνολογίας που θα προσέφερε συνεχή, χωρικά κατανεμημένη εποπτεία αντί για σημειακή καταγραφή. Επιλέχθηκε η λύση των κατανεμημένων αισθητήρων οπτικών ινών (Distributed Fiber Optic Sensing) DFOS, η οποία υλοποιήθηκε με βάση τις προδιαγραφές της εταιρείας ΔΕΛΤΑ ΣΙΓΜΑ Α.Ε.

6.2 Το Πλαίσιο Υιοθέτησης στην Ελλάδα και Διεθνώς

Πριν από την παρουσίαση της συγκεκριμένης εφαρμογής στην ΕΕΛ Ιωαννίνων, είναι χρήσιμο να τοποθετηθεί η περίπτωση αυτή στο ευρύτερο πλαίσιο αντίστοιχων πρωτοβουλιών, ώστε να αναδειχθεί τόσο η πρωτοπορία όσο και η αντιπροσωπευτικότητά της.

6.2.1 Ελληνικές Εφαρμογές

Στην Ελλάδα, η υιοθέτηση της τεχνολογίας οπτικών ινών στη διαχείριση λυμάτων ακολουθεί σταθερά ανοδική πορεία, συμβαδίζοντας με τις ευρωπαϊκές οδηγίες για την ψηφιοποίηση των υδάτινων πόρων. Αν και βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο σε σύγκριση με βιομηχανικές εφαρμογές, έχουν ήδη υλοποιηθεί εμβληματικά έργα που αποδεικνύουν την τεχνική ωριμότητα της μεθόδου.

Μία από τις πρώτες και σημαντικότερες προσπάθειες πραγματοποιήθηκε στο Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων (ΚΕΛ) Ψυττάλειας της ΕΥΔΑΠ, τη μεγαλύτερη εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων της χώρας και μία από τις μεγαλύτερες στην Ευρώπη, η οποία εξυπηρετεί το μεγαλύτερο μέρος του λεκανοπεδίου Αττικής. Η εφαρμογή τεχνολογιών διανεμημένης παρακολούθησης και προηγμένων δικτύων οπτικών ινών για τη μεταφορά δεδομένων στοχεύει εκεί στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής λειτουργίας των δεξαμενών αερισμού και στον έλεγχο της απόδοσης των βιολογικών διεργασιών σε πραγματικό χρόνο (ΕΥΔΑΠ, 2021). διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης υπό συνεχείς κυκλικές φορτίσεις και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας (ΕΥΔΑΠ, 2021). Η υποδομή αυτή επιτρέπει την ταχεία μεταφορά δεδομένων από χιλιάδες αισθητήρες προς το κεντρικό κέντρο ελέγχου,

δημιουργώντας τη βάση για μελλοντική πλήρη ενσωμάτωση συστημάτων DTS για θερμική χαρτογράφηση της βιομάζας.

Αντίστοιχες καινοτόμες δράσεις έχουν πραγματοποιηθεί και στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Θεσσαλονίκης (ΕΥΑΘ), όπου στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων μελετήθηκε η χρήση Distributed Acoustic Sensing (DAS) για τον εντοπισμό διαρροών, παράνομων συνδέσεων και υπερχειλίσεων στους κεντρικούς αγωγούς μεταφοράς λυμάτων προς τον Θερμαϊκό Κόλπο, με στόχο την πρόληψη αστοχιών λόγω πιέσεων από υδροστατική φόρτιση και διάβρωση και την προστασία του ευαίσθητου θαλάσσιου οικοσυστήματος (Ορφανός Δημήτριος, 2023). Παράλληλα, στην Κρήτη, πιλοτικά έργα έχουν εφαρμοστεί σε δημοτικά δίκτυα αποχέτευσης, όπου οι μεταβολές θερμοκρασίας κατά μήκος των αγωγών (μέσω DTS) χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση παράνομης εισροής ομβρίων ή θαλασσινού νερού κατά τις περιόδους έντονων βροχοπτώσεων ή υψηλής παλίρροιας, ανίχνευση ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς η αραίωση των λυμάτων μειώνει την απόδοση της βιολογικής επεξεργασίας. Τα παραπάνω παραδείγματα καταδεικνύουν ότι, παρά το γεγονός πως η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε μεταβατικό στάδιο μαζικής υιοθέτησης, η Ελλάδα διαθέτει πλέον πραγματικές περιπτώσεις επιτυχημένης εφαρμογής. Η πιο ολοκληρωμένη εφαρμογή σε επίπεδο εθνικών υποδομών τεκμηριώνεται, ωστόσο, στη Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων Ιωαννίνων, όπου εγκαταστάθηκε σύστημα διανεμημένης παρακολούθησης βασισμένο σε αισθητήρες οπτικών ινών από την εταιρεία ΔΕΛΤΑ ΣΙΓΜΑ Α.Ε.

6.2.2 Διεθνείς Εφαρμογές

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η χρήση οπτικών ινών σε δίκτυα λυμάτων έχει προχωρήσει πιο συστηματικά. Στη Γερμανία και την Ολλανδία, η τεχνολογία των διανεμημένων αισθητήρων εφαρμόζεται σε αγωγούς αποχέτευσης μήκους άνω των 20 χιλιομέτρων, για τη συνεχή ανίχνευση σημείων καθίζησης, υπερχειλίσης και φθοράς λόγω γήρανσης των υλικών. Σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων στη Δανία, αισθητήρες FBG έχουν ενσωματωθεί σε δεξαμενές αερισμού, επιτρέποντας την προσαρμοστική ρύθμιση της παροχής οξυγόνου βάσει πραγματικών θερμικών μεταβολών. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, τεχνολογίες Distributed Acoustic Sensing χρησιμοποιούνται για την επιτήρηση δικτύων αποχέτευσης αστικών περιοχών μεγάλου πληθυσμού, όπου

εντοπίζονται διαρροές και φαινόμενα εισροής/διείσδυσης υπόγειων υδάτων, συμβάλλοντας στη μείωση απωλειών και στη σταθεροποίηση της υδραυλικής συμπεριφοράς των δικτύων (Bertulesi, 2023).

6.3 Αρχές Σχεδιασμού και Αρχιτεκτονική του Συστήματος

Το πλαίσιο ολοκλήρωσης του συστήματος στην ΕΕΛ Ιωαννίνων βασίστηκε σε τρεις θεμελιώδεις αρχές σχεδιασμού. Πρώτον, στόχευσε στη συμπλήρωση και όχι στην αντικατάσταση των υφιστάμενων συστημάτων τηλεμετρίας, ενισχύοντας τις δυνατότητές τους. Δεύτερον, έδωσε έμφαση στην ιεράρχηση της χωρικής κάλυψης υψηλής αξίας, ώστε οι διαθέσιμοι πόροι να επικεντρωθούν σε τομείς όπου μπορούν να προσφέρουν τα σημαντικότερα οφέλη (Inaudi, 2010). Τρίτον, επιδιώχθηκε η πλήρης ενσωμάτωση των νέων δεδομένων στο υφιστάμενο περιβάλλον λειτουργίας, ώστε το σύστημα να αξιοποιείται ενιαία από τους χειριστές αντί να λειτουργεί ως αποκομμένο παράλληλο σύστημα.

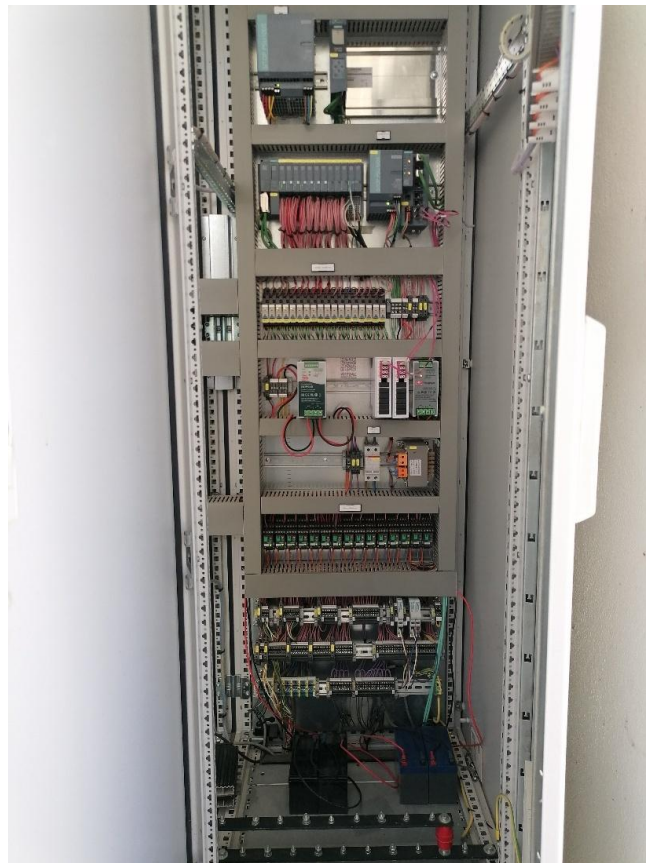
Με βάση τις αρχές αυτές, η αρχιτεκτονική του συστήματος οργανώθηκε σε τρία επίπεδα:

- Επίπεδο 1 — Αισθητήριο επίπεδο (οπτικές ίνες): εγκατάσταση καλωδίου οπτικής ίνας αισθητηριακής χρήσης (sensing cable) κατά μήκος επιλεγμένων τμημάτων του δικτύου μεταφοράς λυμάτων και εντός/περιμετρικά της ίδιας της ΕΕΛ, σε συνδυασμό με σημειακούς αισθητήρες FBG σε κρίσιμα σημεία (δεξαμενές, έξοδος επεξεργασμένης εκροής).
- Επίπεδο 2 — Μονάδες καταγραφής (interrogators): κεντρικές μονάδες DTS/DAS/DSS και μονάδα ανάγνωσης FBG (FBG interrogator), εγκατεστημένες εντός της ΕΕΛ, οι οποίες μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ψηφιακά δεδομένα όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 14 και Εικόνα 15.
- Επίπεδο 3 — Επίπεδο ανάλυσης και ενσωμάτωσης: λογισμικό επεξεργασίας σήματος και αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition), το οποίο μετατρέπει τα ακατέργαστα οπτικά δεδομένα σε αξιοποιήσιμα συμβάντα (π.χ. «πιθανή διαρροή στη θέση X, στα Y μέτρα από την αφετηρία») και τα διοχετεύει προς

το υφιστάμενο ή υπό ολοκλήρωση σύστημα SCADA / Κεντρικού Σταθμού Ελέγχου της ΔΕΥΑΙ, ώστε να αξιοποιείται ενιαία από τους χειριστές αντί να λειτουργεί ως αποκομμένο παράλληλο σύστημα.



Εικόνα 14 Μονάδες καταγραφής (interrogators).



Εικόνα 15 Μονάδες DTS/DAS/DSS σε κάθε στάδιο.

Η διασύνδεση του συστήματος με το κεντρικό SCADA επιτρέπει την προληπτική συντήρηση, καθώς καθιστά δυνατό τον έγκαιρο εντοπισμό πρώιμων δομικών παραμορφώσεων λόγω εδαφικών μετακινήσεων και θερμικών ανωμαλιών που σχετίζονται με τη ροή, πριν αυτές οδηγήσουν σε λειτουργικά προβλήματα, μειώνοντας δραστικά τον χρόνο απόκρισης των συνεργειών

6.4 Αρχές Λειτουργίας των Τεχνολογιών Κατανεμημένης Αισθητηριακής Ίνας

Η καινοτομία των συστημάτων που εγκαταστάθηκαν στην ΕΕΛ Ιωαννίνων έγκειται στη χρήση του ίδιου του καλωδίου οπτικής ίνας ως αισθητήρα σε όλο το μήκος του: κάθε τεχνολογία εκμεταλλεύεται διαφορετικό φαινόμενο σκέδασης (backscattering) του φωτός που ταξιδεύει μέσα στην ίνα, ώστε η ίδια η γραμμή να λειτουργεί ως πυκνό πλέγμα χιλιάδων «εικονικών» αισθητήρων σε όλο της το μήκος συχνά δεκάδων χιλιομέτρων χωρίς ενδιάμεση τροφοδοσία ή ηλεκτρονικά (Bertulesi, 2023). Η δυνατότητα αυτή εγκατάστασης ενός «συνεχούς αισθητήρα» (distributed sensing) κατά μήκος αγωγών και δεξαμενών καθιστά τις οπτικές ίνες ιδανικές για τα εκτεταμένα και δυσπρόσιτα δίκτυα αποχέτευσης, επιτρέποντας τη χωρική διακριτοποίηση των μετρήσεων με ακρίβεια μέτρου (Hartog A. H., 2017)

Οι τέσσερις βασικές τεχνολογίες που αξιοποιήθηκαν συνοψίζονται παρακάτω.

(Distributed Temperature Sensing) (DTS) - Φαινόμενο Raman: όταν ένας παλμός λέιζερ διαδίδεται στην ίνα, μέρος του φωτός σκεδάζεται λόγω μοριακών δονήσεων. Η ανάλυση του φάσματος Raman —συγκεκριμένα ο λόγος έντασης μεταξύ των συνιστωσών Stokes και Anti-Stokes του σκεδαζόμενου φωτός όπου επιτρέπει τον υπολογισμό της απόλυτης θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της ίνας, με ακρίβεια της τάξης των $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ανά μέτρο μήκους (Soto, 2007).

(Distributed Strain Sensing) (DSS) - Φαινόμενο Brillouin: η σκέδαση Brillouin σχετίζεται με την πυκνότητα του υλικού και επηρεάζεται από τη μηχανική παραμόρφωση (strain)· η συχνότητα Brillouin μετατοπίζεται ανάλογα με την αξονική τάση που ασκείται στην ίνα (Danheng Gao, 2020). Το σύστημα αυτό μετρά μικρομετατοπίσεις και τάσεις, ικανό να ανιχνεύσει καθιζήσεις εδάφους ή δομικές

ρωγμές πριν αυτές οδηγήσουν σε θραύση (Hartog A. H., 2017) αποτελεί, δηλαδή, πρώιμο δείκτη φθοράς που επιτρέπει προληπτική παρέμβαση πριν από την εμφάνιση ορατής βλάβης (Brian Culshaw, 2008).

(Distributed Acoustic Sensing) (DAS) - Φαινόμενο Rayleigh: η τεχνολογία αυτή εκμεταλλεύεται τη σκέδαση Rayleigh για να μετατρέψει την οπτική ίνα σε μια συστοιχία χιλιάδων εικονικών μικροφώνων, ανιχνεύοντας δονητικές και ακουστικές μεταβολές που συνδέονται με τη ροή των ρευστών (Bertulesi, 2023). Σε περίπτωση διαρροής, η εκτόνωση υγρού ή αερίου δημιουργεί χαρακτηριστικό ακουστικό θόρυβο υψηλής συχνότητας, ενώ η εισροή εξωτερικών υδάτων δημιουργεί στροβιλισμό· μέσω προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος, το σύστημα διακρίνει τον θόρυβο κανονικής λειτουργίας από το σήμα βλάβης, εντοπίζοντας τα σημεία αστοχίας με ακρίβεια λίγων μέτρων και σε πραγματικό χρόνο.

(Fiber Bragg Grating) (FBG) - Φαινόμενο Fresnel: πρόκειται για σημειακούς ή κατανεμημένους αισθητήρες που εγγράφονται στον πυρήνα της ίνας και ανακλούν συγκεκριμένο μήκος κύματος φωτός ανάλογα με τη μηχανική τάση και τη θερμοκρασία στο σημείο εγκατάστασής τους.

Χημικοί αισθητήρες (Optrodes): μια νεότερη εξέλιξη είναι η χρήση οπτικών χημικών αισθητήρων. Μέσω επίστρωσης του άκρου της ίνας ή του περιβλήματός της με ειδικά ευαίσθητα πολυμερή, καθίσταται δυνατή η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου (DO), του pH και της συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων μέσω φαινομένων φθορισμού ή απορρόφησης, προσέγγιση που προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τα ηλεκτροχημικά ηλεκτρόδια, τα οποία απαιτούν συχνή βαθμονόμηση (F. Baldini, 2006).

6.5 Εφαρμογές ανά Τομέα Υποδομής της ΕΕΛ Ιωαννίνων

Με βάση την αρχιτεκτονική και τις τεχνολογίες που περιεγράφηκαν παραπάνω και παρουσιάζονται στην Εικόνα 16, το δίκτυο οπτικών ινών σχεδιάστηκε ώστε να καλύπτει τους τομείς της εγκατάστασης όπου η συνεχής, χωρικά κατανεμημένη παρακολούθηση προσφέρει τη μεγαλύτερη προστιθέμενη αξία.

Γραμμή επεξεργασίας της ΕΕΛ Ιωαννίνων

Εφαρμογή τεχνολογιών παρακολούθησης με οπτικές (νέες ανά στάδιο)

ΓΡΑΜΜΗ ΎΔΑΤΟΣ



↓ περίσσεια & πρωτοβάθμια ιλύς

ΓΡΑΜΜΗ ΙΛΥΟΣ



Βιοαέριο → ΣΗΘ (CHP) → Ηλεκτρισμός + Θερμότητα (DTS, FBG)

DTS Κατανεμμένη μέτρηση θερμοκρασίας (φαινόμενο Raman) — έλεγχος θερμοκρασίας χώνευσης, ζωνών BNR, CHP
DSS Κατανεμμένη μέτρηση παραμόρφωσης (φαινόμενο Brillouin) — καθιζήσεις, δομικές ρωγμές δεξαμενών
DAS Κατανεμμένη ακουστική ανίχνευση (φαινόμενο Rayleigh) — εντοπισμός διαρροών σε αγωγούς
FBG Σημειακοί/κατανεμμένοι αισθητήρες (φαινόμενο Fresnel) — τοπική τάση & θερμοκρασία εξοπλισμού
Optrodes Χημικοί οπτικοί αισθητήρες — διαλυμένο οξυγόνο, pH, βαρέα μέταλλα

Εικόνα 16 τέσσερις βασικές τεχνολογίες χρήσης οπτικών ινών

6.5.1 Δεξαμενές Βιολογικής Επεξεργασίας

Η καρδιά μιας ΕΕΛ είναι οι δεξαμενές βιολογικού καθαρισμού, όπου η ακριβής παρακολούθηση των συνθηκών είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της βιωσιμότητας της βιομάζας και την αποδοτική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Η εγκατάσταση DTS εντός των δεξαμενών βιολογικής επεξεργασίας προσφέρει συνεχές θερμικό προφίλ, χρήσιμο για την παρακολούθηση της σταθερότητας της βιολογικής διεργασίας, ενώ στην ΕΕΛ Ιωαννίνων επιτρέπει επιπλέον τον εντοπισμό παράνομων απορρίψεων βιομηχανικών αποβλήτων οι οποίες συχνά έχουν υψηλότερη θερμοκρασία ή δυσλειτουργιών στις ίδιες τις δεξαμενές αερισμού. Η δυνατότητα τρισδιάστατης χωρικής χαρτογράφησης επιτρέπει την άμεση ανίχνευση «νεκρών ζωνών» (dead zones) με χαμηλή αερόβια δράση ή περιοχών υπερφόρτωσης, όπου η θερμοκρασία αυξάνεται δυσανάλογα (Yi Bao, 2019), ενισχύοντας τη δυναμική ρύθμιση του συστήματος αερισμού και κατευθύνοντας το οξυγόνο εκεί που πραγματικά χρειάζεται. Δεδομένου ότι ο αερισμός καταναλώνει τυπικά το 50–60% της συνολικής ενέργειας μιας ΕΕΛ, το όφελος αυτό μεταφράζεται άμεσα σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση της παραγωγής περίσσειας ιλύος (Inc. Metcalf & Eddy, 2013).

Παράλληλα με τις λειτουργικές παραμέτρους, εξίσου κρίσιμη είναι και η δομική υγεία των δεξαμενών. Σημειακοί αισθητήρες FBG έχουν τοποθετηθεί σε κρίσιμα σημεία των δεξαμενών· η ενσωμάτωσή τους στα τοιχώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα επιτρέπει

την παρακολούθηση των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την πλήρωση και την εκκένωση (Yi Bao, 2019), ώστε να εντοπίζονται πρόωρα φαινόμενα ρωγμών, ενανθράκωσης του σκυροδέματος ή μηχανικής κόπωσης, επιτρέποντας στοχευμένες παρεμβάσεις συντήρησης χωρίς ανάγκη διακοπής της λειτουργίας ή εκκένωσης της δεξαμενής για οπτική επιθεώρηση.

6.5.2 Δίκτυο Μεταφοράς Λυμάτων και Ανίχνευση Διαρροών

Δεδομένων των τεκμηριωμένων προβλημάτων παλαιότητας του δικτύου και των εισροών, πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση καλωδίου DAS/DTS κατά μήκος του κύριου καταθλιπτικού αγωγού μεταφοράς λυμάτων προς την ΕΕΛ, με στόχο την έγκαιρη ανίχνευση διαρροών και ασυνήθιστων εισροών. Τα δίκτυα αποχέτευσης αποτελούν, εξάλλου, συστήματα μεγάλης έκτασης που συχνά βρίσκονται σε υπόγεια περιβάλλοντα όπου η φυσική πρόσβαση είναι περιορισμένη και δαπανηρή, με την ακεραιότητά τους να είναι κρίσιμη για την αποφυγή μόλυνσης του υδροφόρου ορίζοντα. Μια ξαφνική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να υποδεικνύει είσοδο βιομηχανικού θερμού φορτίου, ενώ χαρακτηριστικά μοτίβα δόνησης μπορούν να αποκαλύψουν διαρροές ή θραύσεις σωληνώσεων πολύ πριν αυτές γίνουν ορατές στην επιφάνεια.

Η τεχνολογία DSS συμβάλλει συμπληρωματικά προς την ίδια κατεύθυνση: η σταδιακή μεταβολή της καταπόνησης σε έναν υπόγειο αγωγό μπορεί να υποδεικνύει καθίζηση του εδάφους, μετακίνηση γεωλογικών στρωμάτων ή διόγκωση λόγω έμφραξης. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τα παλαιωμένα δίκτυα της Ελλάδας, όπου η φθορά των υλικών σε συνδυασμό με τη σεισμικότητα αυξάνει τον κίνδυνο αστοχιών.

6.5.3 Περίμετρος Εγκατάστασης

Η χρήση DAS για την προστασία περιμέτρου αποτελεί ήδη ώριμη τεχνολογία σε άλλους τομείς υποδομών και αξιοποιήθηκε αντίστοιχα για την ασφάλεια των εγκαταστάσεων της ΕΕΛ Ιωαννίνων, ενώ παράλληλα η εγκατάσταση DTS εντός των

δεξαμενών βιολογικής επεξεργασίας προσφέρει συνεχές θερμικό προφίλ χρήσιμο και για τη γενικότερη επιτήρηση της περιμέτρου.

6.5.4 Υποβρύχιος Αγωγός Διάθεσης προς τη Λίμνη Παμβώτιδα

Οι υποβρύχιοι αγωγοί διάθεσης επεξεργασμένων λυμάτων αποτελούν κρίσιμες υποδομές, εκτεθειμένες σε απαιτητικές συνθήκες όπως η διάβρωση, οι μετακινήσεις του πυθμένα και τα ρεύματα του αποδέκτη· στην περίπτωση της ΕΕΛ Ιωαννίνων, αποδέκτης είναι η λίμνη Παμβώτιδα. Η πλήρης πρόσβαση σε τέτοια σημεία για επιθεώρηση με δύτες ή ROVs (Remotely Operated Vehicles) είναι εξαιρετικά δύσκολη, αποσπασματική και κοστοβόρα, γεγονός που αναδεικνύει τη χρήση οπτικών ινών ως την πλέον κατάλληλη μέθοδο μακροχρόνιας παρακολούθησης (Structural Health Monitoring SHM). Με τον συνδυασμό των τεχνολογιών DTS και DSS, η εγκατάσταση μπορεί να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την πίεση, την παραμόρφωση και τη θερμική συμπεριφορά του αγωγού (Hongxuan Xu, 2025) μια απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένο σημείο, για παράδειγμα, μπορεί να υποδηλώνει ρήγμα και ανάμειξη των θερμότερων λυμάτων με το ψυχρότερο νερό του αποδέκτη. Επιπλέον, η τεχνολογία DAS μπορεί να ανιχνεύσει την πρόσκρουση αντικειμένων ή την απρόβλεπτη μετατόπιση του αγωγού, ειδοποιώντας άμεσα τους διαχειριστές για την αποτροπή περιβαλλοντικής καταστροφής. Η ενσωμάτωση των ινών γίνεται συνήθως κατά την κατασκευή του αγωγού (embedded sensors) ή μεταγενέστερα εξωτερικά, προστατευμένες σε ειδικά περιβλήματα (armored cables) για αντοχή στην υδροστατική πίεση (Inaudi Daniele, 2010) η ίδια λογική που ακολουθήθηκε και στη χωροθέτηση του δικτύου της ΕΕΛ Ιωαννίνων.

6.5.5 Μονάδα Ηλιακής Ξήρανσης Ιλύος

Η νέα μονάδα ηλιακής ξήρανσης αποτελεί ιδανικό υποψήφιο για ενσωμάτωση αισθητήρων FBG/DTS ήδη από τη φάση κατασκευής και λειτουργίας της, για την παρακολούθηση της κατανομής θερμοκρασίας και υγρασίας εντός των θερμοκηπίων

ξήρανσης παράμετροι κρίσιμες για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού ξήρανσης και της ενεργειακής απόδοσης της μονάδας.

6.5.6 Έξοδος Επεξεργασμένης Εκροής

Η εγκατάσταση αισθητήρα τύπου FBG για έμμεση χημική ανίχνευση στην έξοδο της εγκατάστασης ενισχύει τη συνεχή παρακολούθηση συμμόρφωσης με τους περιβαλλοντικούς όρους λειτουργίας, προσφέροντας ταχύτερη ανίχνευση αποκλίσεων σε σχέση με την περιοδική δειγματοληψία και ενισχύοντας παράλληλα τη διαφάνεια. Η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί εν δυνάμει και τη λογική των χημικών αισθητήρων (optrodes) δηλαδή τη μέτρηση παραμέτρων όπως το διαλυμένο οξυγόνο, το pH ή η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων μέσω οπτικών φαινομένων αντί ηλεκτροχημικών ηλεκτροδίων.

6.6 Υλικά και Τεχνική Εγκατάσταση

Η υλοποίηση του δικτύου απαιτήσε εξειδικευμένα υλικά, ικανά να αντέξουν στο ιδιαίτερα επιθετικό περιβάλλον μιας ΕΕΛ και σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας, οι οποίες μπορούν να κυμανθούν από -200°C έως $+300^{\circ}\text{C}$ ανάλογα με τον τύπο του καλωδίου. Χρησιμοποιήθηκε οπτική ίνα τύπου Single Mode (1550 nm), θωρακισμένη με ανοξείδωτο χάλυβα AISI 316L για μηχανική προστασία, με εξωτερικό περίβλημα από HDPE (Πολυαιθυλένιο Υψηλής Πυκνότητας). Η επιλογή αυτή δεν είναι τυχαία: η ίδια η κατασκευή της ίνας από πυρίτιο (SiO_2) την καθιστά εγγενώς χημικά αδρανή και ανθεκτική στη διάβρωση, επιτρέποντας την άμεση επαφή με διαβρωτικά υγρά απόβλητα χωρίς ανάγκη συχνής αντικατάστασης, ενώ το εξωτερικό περίβλημα HDPE προσφέρει επιπλέον εξαιρετική αντοχή στη χημική προσβολή από το υδρόθειο και τα χλωριόντα, καθώς και στη βιολογική διάβρωση από μύκητες και βακτήρια.

Η χωροθέτηση του δικτύου οπτικών ινών περιέλαβε τρεις βασικές διαδρομές: τον κεντρικό αγωγό προσαγωγής (monitoring ροής και διαρροών), την περίμετρο των βιολογικών αντιδραστήρων (θερμικός έλεγχος βιομάζας) και τον υποβρύχιο αγωγό διάθεσης προς τη λίμνη (έλεγχος ακεραιότητας). Η στήριξη πραγματοποιήθηκε με ειδικά άγκιστρα που αποτρέπουν την απευθείας επαφή με τα λύματα, ελαχιστοποιώντας την απόσβεση σήματος ($<0,25$ dB/km) και εξασφαλίζοντας τη μακροζωία της εγκατάστασης.

6.7 Τεχνικοοικονομική Αξιολόγηση

6.7.1 Οικονομική Ανάλυση

Σε σχέση με το υφιστάμενο μοντέλο τηλεμετρίας διακριτών σταθμών (51 σταθμοί για προϋπολογισμό 8,9 εκατομμυρίων ευρώ, δηλαδή μέσο κόστος της τάξης των 170.000 ευρώ ανά σταθμό, συμπεριλαμβανομένων λογισμικού, υποδομής επικοινωνιών και έργων πολιτικού μηχανικού), μια λύση DFOS προσφέρει διαφορετική λογική κόστους: το κύριο κόστος επενδύεται στη μονάδα καταγραφής (interrogator) και στην εγκατάσταση του καλωδίου, ενώ το οριακό κόστος επέκτασης της χωρικής κάλυψης ανά επιπλέον μέτρο δικτύου είναι συγκριτικά χαμηλό, ιδίως όταν συνδυάζεται με ήδη προγραμματισμένα έργα εκσκαφής ή ανακατασκευής δικτύου. Η εφαρμογή των συστημάτων DTS/DSS συνεπάγεται, βεβαίως, υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης σε σύγκριση με τους συμβατικούς αισθητήρες, κόστος που περιλαμβάνει τις μονάδες ανάγνωσης (interrogators), την προμήθεια των ειδικών καλωδίων και την εξειδικευμένη εγκατάσταση. Η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης, ωστόσο, αποδεικνύεται μέσω της δραστηκής μείωσης του λειτουργικού κόστους σε τρεις άξονες: στη μείωση συντήρησης, καθώς η παλαιά πρακτική απαιτούσε εβδομαδιαίους ελέγχους και συχνές αντικαταστάσεις αισθητήρων, ενώ η οπτική ίνα έχει χρόνο ζωής άνω των 20 ετών χωρίς ανάγκη επαναβαθμονόμησης στην αποφυγή καταστροφικών βλαβών, καθώς το κόστος επισκευής μιας θραύσης αγωγού —ιδίως αν απαιτούνται εκσκαφές ή υποβρύχιες εργασίες όπου είναι τεράστιο, ενώ το σύστημα DSS επιτρέπει την παρέμβαση ήδη από το στάδιο της μικρορωγμής, μειώνοντας το κόστος επισκευής κατά τάξεις μεγέθους· και στην ενεργειακή εξοικονόμηση, καθώς η βελτιστοποίηση του

αερισμού μέσω ακριβούς θερμικής παρακολούθησης δεδομένου ότι η διαλυτότητα του οξυγόνου εξαρτάται από τη θερμοκρασία οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ρεύματος στους φυσητήρες.

Τα ευρήματα αυτά συνάδουν με ευρύτερες διεθνείς αναλύσεις κόστους-οφέλους για τις τεχνολογίες DFOS. Αναλύσεις συνολικού κόστους ιδιοκτησίας σε ορίζοντα 5–10 ετών τείνουν να ευνοούν τις κατανεμημένες λύσεις έναντι δικτύων συμβατικών αισθητήρων, καθώς οι τελευταίοι συσσωρεύουν κόστη τακτικής βαθμονόμησης, αντικατάστασης και βλαβών που, σωρευτικά σε μια δεκαετία, έχουν εκτιμηθεί στο 150–250% του αντίστοιχου κόστους ενός συστήματος κατανεμημένης αισθητηριακής. Ενδεικτικά, σε εφαρμογές πετρελαίου/φυσικού αερίου, τομέας από τον οποίο τα ευρήματα δεν πρέπει βεβαίως να μεταφέρονται άκριτα στη διαχείριση λυμάτων, η υιοθέτηση DFOS έχει συσχετιστεί με αύξηση παραγωγικότητας έως 15% και μείωση λειτουργικού κόστους έως 20%, δίνοντας μια τάξη μεγέθους του δυνητικού οφέλους. Αξιοσημείωτο είναι, τέλος, ότι ασφαλιστικοί οργανισμοί προσφέρουν, σε ορισμένες περιπτώσεις, εκπτώσεις ασφαλίστρου 10–30% σε εγκαταστάσεις με ολοκληρωμένα συστήματα κατανεμημένης παρακολούθησης, αναγνωρίζοντας έμμεσα τη μείωση κινδύνου που αυτά προσφέρουν

6.7.1 Λειτουργική Βελτιστοποίηση και Περιβαλλοντική – Κοινωνική Αξία

Η μετάβαση από τη σημειακή (κάθε 50 m) στη συνεχή (κάθε 1 m) παρακολούθηση άλλαξε ουσιαστικά τη φιλοσοφία λειτουργίας της ΕΕΛ. Το σύστημα παρέχει πλέον δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (Real Time Monitoring), επιτρέποντας στους μηχανικούς να βλέπουν συνολικά την «εικόνα» της ροής και της θερμοκρασίας σε όλο το δίκτυο, αντί για αποσπασματικές μετρήσεις.

Το σημαντικότερο όφελος, ωστόσο, είναι περιβαλλοντικό. Η έγκαιρη ανίχνευση διαρροών αποτρέπει τη διοχέτευση ακατέργαστων λυμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα ή στη λίμνη Παμβώτιδα. Σε μια περιοχή όπου η οικονομία στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στον τουρισμό και την πρωτογενή παραγωγή, η προστασία του οικοσυστήματος μεταφράζεται άμεσα σε οικονομική αξία: η τεχνολογία ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο επιβολής προστίμων από την Ευρωπαϊκή Ένωση και διαφυλάσσει την κοινωνική αποδοχή της εγκατάστασης.

6.8 Σύγκριση DFOS/FBG έναντι Συμβατικής Τηλεμετρίας

Ο Πίνακας 7 συνοψίζει τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο προσεγγίσεων ως προς τα βασικά κριτήρια απόδοσης, κόστους και καταλληλότητας εφαρμογής.

Κριτήριο	Συμβατική τηλεμετρία (διακριτοί σταθμοί)	Συστήματα οπτικών ινών (DFOS/FBG)
Χωρική κάλυψη	Σημειακή, σε προκαθορισμένες θέσεις	Συνεχής κατά μήκος της ίνας
Αρχικό κόστος ανά σημείο	Σχετικά υψηλό (εξοπλισμός και επικοινωνίες ανά σταθμό)	Χαμηλό οριακό κόστος ανά μέτρο μετά την αρχική επένδυση
Κόστος κεντρικής μονάδας	Μέτριο (λογισμικό ΚΣΕ)	Υψηλό (interrogator DTS/DAS/FBG)
Ανθεκτικότητα σε διαβρωτικό περιβάλλον	Περιορισμένη διάρκεια ζωής ηλεκτρονικών αισθητήρων	Υψηλή, λόγω αδρανούς υλικού ίνας
Ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού	Μέτρια	Υψηλή (ερμηνεία σήματος, βαθμονόμηση)
Εξάρτηση από χρηματοδοτικό κύκλο συγκεκριμένου προγράμματος	Τεκμηριωμένος κίνδυνος (απένταξη 2026)	Δυνατότητα μικρότερων, σταδιακών επενδύσεων
Ωριμότητα σε εφαρμογές λυμάτων ειδικά	Πολύ υψηλή, καθιερωμένη πρακτική	Αναδυόμενη αλλά τεκμηριωμένη σε συγκεκριμένες εφαρμογές
Ενδεδειγμένη χρήση	Σημειακές κρίσιμες παράμετροι διεργασίας (DO, pH, παροχή)	Γραμμικές υποδομές, δύσκολα προσβάσιμα/διαβρωτικά περιβάλλοντα

Πίνακας 8 Σύγκριση DFOS/FBG έναντι της συμβατικής τηλεμετρίας

Ο πίνακας δείχνει ότι οι δύο προσεγγίσεις δεν είναι ανταγωνιστικές αλλά συμπληρωματικές, με κάθε μία να υπερτερεί σε διαφορετικό πεδίο εφαρμογής. Το εύρημα αυτό ενισχύει την πρόταση «υβριδικής» αρχιτεκτονικής που ακολουθήθηκε και στην ΕΕΛ Ιωαννίνων, όπου τα δεδομένα οπτικών ινών ενσωματώνονται στο υφιστάμενο σύστημα SCADA και τηλεμετρίας αντί να το αντικαθιστούν.

6.9 Τεχνολογικοί Περιορισμοί και Προκλήσεις Εφαρμογής

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, η εφαρμογή των οπτικών ινών στη διαχείριση λυμάτων δεν στερείται προκλήσεων, οι οποίες επηρεάζουν την υιοθέτησή της σε ευρύτερη κλίμακα. Πρωτίστως, το αρχικό κόστος εγκατάστασης παραμένει υψηλότερο σε σχέση με τους συμβατικούς ηλεκτροχημικούς αισθητήρες, γεγονός που συχνά λειτουργεί αποτρεπτικά για εγκαταστάσεις με περιορισμένο προϋπολογισμό. Το κόστος αυτό αφορά τόσο την προμήθεια μονάδων καταγραφής (interrogators) υψηλών προδιαγραφών όσο και την εξειδικευμένη εργατική δύναμη που απαιτείται για την εγκατάσταση καλωδίου σε δύσκολα περιβάλλοντα, παράγοντας που αναδεικνύεται συχνά ως ο βασικότερος ανασταλτικός παράγοντας υιοθέτησης της τεχνολογίας. Επιπλέον, εγκαταστάσεις που λειτουργούν με συστήματα ελέγχου παλαιότερης γενιάς, όπως αρχιτεκτονικές SCADA βασισμένες σε ηλεκτρικά σήματα, ενδέχεται να απαιτήσουν προσαρμογές λογισμικού και υποδομών ώστε να ενσωματώσουν επιτυχώς αισθητήρες οπτικών ινών.

Ένα ακόμη ζήτημα αφορά την ανάγκη ύπαρξης εξειδικευμένου προσωπικού, τόσο για τη σωστή εγκατάσταση όσο και για την ερμηνεία των δεδομένων, καθώς οι μεταβολές στο μήκος κύματος ή στην ένταση του φωτός απαιτούν κατάλληλη αναλυτική επεξεργασία για να μεταφραστούν σε φυσικές παραμέτρους. Οι κατανεμημένες τεχνολογίες παράγουν, εξάλλου, δεδομένα πολύ μεγαλύτερου όγκου και συχνότητας δειγματοληψίας από τους συμβατικούς αισθητήρες, γεγονός που μετατοπίζει την πρόκληση από τη συλλογή στην ουσιαστική αξιοποίηση της πληροφορίας — ζήτημα που οδηγεί άμεσα στην ανάγκη ένταξής τους σε ευρύτερα συστήματα διαχείρισης δεδομένων.

Παρά τις προκλήσεις αυτές, η διεθνής και ελληνική εμπειρία δείχνει ότι, σε βάθος χρόνου, η τεχνολογία επιφέρει μειωμένο λειτουργικό κόστος λόγω της αντοχής της σε διάβρωση και της ελάχιστης ανάγκης βαθμονόμησης.

6.10 Έξυπνα Δίκτυα, Βιομηχανία 4.0 και Μελλοντικές Προοπτικές

Η ενσωμάτωση των οπτικών ινών αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της μετάβασης προς τα «Έξυπνα Δίκτυα Αποχέτευσης» (Smart Sewer Systems). Στο νέο αυτό παράδειγμα, η λειτουργία των εγκαταστάσεων παύει να είναι στατική και βασίζεται στη συνεχή ροή δεδομένων (Big Data), την ανάλυση σε πραγματικό χρόνο και την αυτοπροσαρμοζόμενη λειτουργία, μια εξέλιξη που συνδέεται άμεσα με την υιοθέτηση των αρχών της Βιομηχανίας 4.0 (Industry 4.0) στον τομέα των υδάτων (Water 4.0), όπου αισθητήρες, δίκτυα δεδομένων, συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης και προηγμένοι αυτοματισμοί συνεργάζονται για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών.

6.10.1 Από τους Σημειακούς στους Κατανεμημένους Αισθητήρες

Σε αντίθεση με τους συμβατικούς σημειακούς αισθητήρες, οι οποίοι παρέχουν αποσπασματική εικόνα, οι τεχνολογίες DAS, DTS και DSS παρέχουν χωρικά κατανεμημένη και συνεχή πληροφορία, λειτουργώντας ουσιαστικά ως το «νευρικό σύστημα» της υποδομής. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία ενός «Ψηφιακού Διδύμου» (Digital Twin) του δικτύου, δηλαδή ενός ψηφιακού αντιγράφου που προσομοιώνει την κατάσταση του φυσικού δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η χρήση οπτικών ινών καθίσταται ιδιαίτερα αποτελεσματική για:

- Ανίχνευση διαρροών και θραύσεων: μείωση του Non-Revenue Water σε δίκτυα ύδρευσης και αποφυγή ρύπανσης σε δίκτυα αποχέτευσης.
- Εντοπισμό εισροής/εισδοχής: διάκριση μεταξύ λυμάτων και ομβρίων υδάτων βάσει θερμοκρασιακού προφίλ.
- Γεωτεχνική παρακολούθηση: προστασία υπόγειων αγωγών σε περιοχές με γεωλογική αστάθεια ή έντονη σεισμικότητα.
- Ασφάλεια υποδομών: προστασία από κακόβουλες ενέργειες ή ατυχήματα τρίτων κοντά στους αγωγούς.

6.10.2 Προληπτική Συντήρηση, Αυτοματισμός και Ερευνητικές Κατευθύνσεις

Η αξία των «έξυπνων δικτύων» μεγιστοποιείται μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων. Οι μετρήσεις από τους αισθητήρες οπτικών ινών τροφοδοτούν πλατφόρμες προγνωστικής ανάλυσης (predictive analytics)· μέσω μηχανικής μάθησης, το σύστημα μπορεί να προβλέψει μια βλάβη πριν αυτή συμβεί, ανιχνεύοντας για παράδειγμα την αυξανόμενη καταπόνηση σε έναν σωλήνα πριν τη θραύση (Yi Bao, 2019). Αυτό επιτρέπει τη μετάβαση από τη διορθωτική συντήρηση (run-to-failure) στην προληπτική συντήρηση, μειώνοντας δραστικά το λειτουργικό κόστος (OPEX) και επεκτείνοντας τον χρόνο ζωής των παγίων. Επιπλέον, η σύζευξη με συστήματα ελέγχου SCADA επιτρέπει την αυτόματη ρύθμιση των διεργασιών: αν, για παράδειγμα, το σύστημα DTS ανιχνεύσει πτώση της θερμοκρασίας ή της βιολογικής δράσης σε μια δεξαμενή, μπορεί να δώσει εντολή στους φυσητήρες να αυξήσουν την παροχή αέρα αυτόματα, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Οι μελλοντικές εξελίξεις συνδέονται περαιτέρω με τη σύγκλιση της τεχνολογίας οπτικών ινών με την τεχνητή νοημοσύνη, την προγνωστική ανάλυση και τα ευρύτερα έξυπνα συστήματα διαχείρισης υδάτων (Smart Water Systems). Ταυτόχρονα, η τεχνολογία μπορεί να αποτελέσει μοχλό ανάπτυξης για κυκλικές πρακτικές διαχείρισης νερού, όπου το επεξεργασμένο νερό επαναχρησιμοποιείται με ασφάλεια σε γεωργικές ή βιομηχανικές εφαρμογές, υπό την προϋπόθεση συνεχούς και αξιόπιστης παρακολούθησης των ποιοτικών του χαρακτηριστικών. Η ερευνητική κοινότητα διερευνά, τέλος, υβριδικά συστήματα αισθητήρων που συνδυάζουν οπτικές ίνες με χημικούς ή μικροβιακούς ανιχνευτές, με στόχο την ολοκληρωμένη περιβαλλοντική παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.

Συνολικά, η χρήση οπτικών ινών στα έξυπνα δίκτυα οδηγεί σε μια ριζική αλλαγή παραδείγματος: από την παθητική παρακολούθηση και την εκ των υστέρων αντίδραση, στην ενεργή, προληπτική και αυτορυθμιζόμενη διαχείριση, διασφαλίζοντας τη βιωσιμότητα των υδατικών πόρων για τις επόμενες γενιές.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης και συμπληρωματικής μελέτης περίπτωσης, τη συνεισφορά των τεχνολογιών οπτικών ινών στη σύγχρονη διαχείριση και παρακολούθηση λυμάτων. Αφετηρία της ανάλυσης υπήρξε η διαπίστωση ότι τα καθιερωμένα συστήματα παρακολούθησης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων είναι βασισμένα σε σημειακούς ηλεκτροχημικούς αισθητήρες και σε συστήματα SCADA και παρουσιάζουν διαρθρωτικούς περιορισμούς: ευπάθεια στη διάβρωση, ανάγκη συχνής βαθμονόμησης, χρονική υστέρηση μεταξύ συμβάντος και διάγνωσης και, κυρίως, μηδενική πληροφόρηση για τα ενδιάμεσα σημεία ενός εκτεταμένου δικτύου αγωγών και δεξαμενών.

Απέναντι σε αυτό το «κενό πυκνότητας πληροφορίας» μεταξύ διαδοχικών σημείων μέτρησης, οι τεχνολογίες κατανεμημένης αισθητηριακής μέτρησης οπτικών ινών (Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS) και οι σημειακοί αισθητήρες Fiber Bragg Grating (FBG) αναδείχθηκαν, στο σύνολο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, ως μια ποιοτικά διαφορετική και τεχνικά ώριμη εναλλακτική λύση, ικανή να μετατρέψει ολόκληρο το μήκος μιας οπτικής ίνας σε συνεχές αισθητήριο πεδίο. Η μελέτη περίπτωσης της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων Ιωαννίνων προσέφερε το πρακτικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο δοκιμάστηκαν τα θεωρητικά αυτά ευρήματα υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός ελληνικού, μεσαίας κλίμακας φορέα ύδρευσης-αποχέτευσης.

Απάντηση στα Ερευνητικά Ερωτήματα

Η εργασία τέθηκε να απαντήσει σε τρία συγκεκριμένα τα ερευνητικά ερωτήματα , τα ευρήματα των οποίων συνοψίζονται ως εξής.

Ως προς το πρώτο ερώτημα, ποιες είναι οι κατηγορίες οπτικών αισθητήρων που μπορούν να εφαρμοστούν στη διαχείριση. Η ανασκόπηση κατέδειξε τέσσερις βασικές οικογένειες τεχνολογιών, καθεμία θεμελιωμένη σε διαφορετικό φυσικό φαινόμενο σκέδασης του φωτός εντός της ίνας. Η Distributed Temperature Sensing (DTS), βασισμένη στη σκέδαση Raman, αποτελεί την πλέον ώριμη τεχνολογία και προσφέρει συνεχές θερμοκρασιακό προφίλ σε μήκη εγκατάστασης άνω των 20-30 km. Η Distributed Acoustic Sensing (DAS), βασισμένη στη σκέδαση Rayleigh, μετατρέπει

την ίνα σε συστοιχία χιλιάδων εικονικών μικροφώνων και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην ανίχνευση διαρροών και δονητικών ανωμαλιών. Η Distributed Strain Sensing (DSS), βασισμένη στη σκέδαση Brillouin, καταγράφει μηχανικές παραμορφώσεις και λειτουργεί ως πρώιμος δείκτης δομικής κόπωσης πριν αυτή εξελιχθεί σε ορατή βλάβη. Τέλος, οι σημειακοί αισθητήρες Fiber Bragg Grating (FBG) προσφέρουν εστιασμένη ακρίβεια σε συγκεκριμένα κρίσιμα σημεία και δεξαμενές, δομικές συνδέσεις, υποθαλάσσιους αγωγούς, ενώ οι αναδυόμενοι οπτικοί χημικοί αισθητήρες (optrodes) επεκτείνουν τη λογική της τεχνολογίας και σε ποιοτικές παραμέτρους του ίδιου του λύματος, όπως το διαλυμένο οξυγόνο, το pH και, εμμέσως, το COD/BOD.

Ως προς το δεύτερο ερώτημα, ποιες διεργασίες μπορούν να προσφέρουν μετρήσιμη βελτίωση. Η βιβλιογραφία και η μελέτη περίπτωσης συγκλίνουν σε τρεις βασικούς άξονες εφαρμογής. Πρώτον, στην έγκαιρη ανίχνευση διαρροών, θραύσεων και παράνομων εισροών ομβρίων σε δίκτυα αποχέτευσης, όπου η συνεχής χωρική κάλυψη αντικαθιστά τη σημειακή δειγματοληψία και μειώνει δραστικά τον χρόνο μεταξύ συμβάντος και ανίχνευσης. Δεύτερον, στη λειτουργική βελτιστοποίηση των δεξαμενών βιολογικής επεξεργασίας, μέσω θερμοκρασιακής χαρτογράφησης που επιτρέπει τη δυναμική κατεύθυνση της παροχής οξυγόνου εκεί όπου μια παράμετρος με άμεσο ενεργειακό αντίκτυπο, δεδομένου ότι ο αερισμός καταναλώνει τυπικά το 50-60% της συνολικής ενέργειας μιας ΕΕΛ (Inc. Metcalf & Eddy, 2013). Τρίτον, στη δομική παρακολούθηση υποδομών αυξημένου κινδύνου, όπως δεξαμενές οπλισμένου σκυροδέματος και υποθαλάσσιοι αγωγοί διάθεσης επεξεργασμένων λυμάτων, όπου η συμβατική οπτική επιθεώρηση είναι δαπανηρή, αποσπασματική ή, σε αρκετές περιπτώσεις, ανέφικτη.

Ως προς το τρίτο ερώτημα, ποιοι είναι οι παράγοντες που περιορίζουν την ευρεία εφαρμογή τους. Η ανάλυση ανέδειξε το υψηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης ιδίως των μονάδων καταγραφής (interrogators) και την ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού για την εγκατάσταση και την ερμηνεία των δεδομένων, την απαίτηση στενής φυσικής επαφής του καλωδίου με το προς παρακολούθηση στοιχείο (γεγονός που σε υφιστάμενα δίκτυα συνεπάγεται συχνά εκσκαφές), καθώς και τον σημαντικά αυξημένο όγκο και ρυθμό παραγωγής δεδομένων, ο οποίος μετατοπίζει την πρόκληση από τη συλλογή στην ουσιαστική αξιοποίηση της πληροφορίας μέσω κατάλληλων συστημάτων διαχείρισης δεδομένων. Συνολικά, όπως προέκυψε από τη συγκριτική αποτίμηση των δύο προσεγγίσεων στη μελέτη περίπτωσης, οι καταναεμημένες

τεχνολογίες οπτικών ινών δεν λειτουργούν ανταγωνιστικά αλλά συμπληρωματικά προς τα υφιστάμενα συστήματα σημειακών αισθητήρων και SCADA, ενισχύοντας ακριβώς εκείνα τα τμήματα του δικτύου όπου η σημειακή παρακολούθηση αφήνει «τυφλά σημεία».

Ευρήματα από τη Μελέτη Περίπτωσης της ΕΕΛ Ιωαννίνων

Η μελέτη περίπτωσης της ΕΕΛ Ιωαννίνων λειτούργησε ως αποδεικτικό παράδειγμα (proof of concept) της εφαρμοσιμότητας των παραπάνω τεχνολογιών σε έναν ελληνικό, μεσαίας κλίμακας φορέα διαχείρισης λυμάτων. Το πιλοτικό σύστημα διανεμημένης παρακολούθησης της εταιρείας ΔΕΛΤΑ ΣΙΓΜΑ Α.Ε., που συνδυάζει τεχνολογίες DTS και DSS σε κρίσιμα τμήματα των αγωγών μεταφοράς, των δεξαμενών καθίζησης και του υποθαλάσσιου αγωγού διάθεσης, επιβεβαίωσε πρακτικά τα θεωρητικά πλεονεκτήματα που τεκμηριώθηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση: πλήρη χωρική κάλυψη μέτρηση ανά μόλις 1 μέτρο αντί της προηγούμενης σημειακής δειγματοληψίας ανά 50 μέτρα και ανθεκτικότητα σε ένα ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον χάρη στη θωράκιση από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 316L και εξωτερικό περίβλημα HDPE, και δυνατότητα ενσωμάτωσης με το υφιστάμενο σύστημα SCADA της ΔΕΥΑΙ.

Ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα της μελέτης περίπτωσης είναι η διαφορετική οικονομική λογική που προσφέρουν οι δύο προσεγγίσεις. Το ολοκληρωμένο έργο τηλεμετρίας διακριτών σταθμών της ΔΕΥΑΙ, στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος ΥΜΕΠΕΡΑΑ 2014-2020, κόστισε συνολικά 8,9 εκατομμύρια ευρώ για 51 σταθμούς ελέγχου, δηλαδή περίπου 170.000 ευρώ ανά σταθμό. Μια λύση DFOS, αντίθετα, μετατοπίζει το κύριο βάρος του κόστους στη μονάδα καταγραφής και στην αρχική εγκατάσταση καλωδίου, με συγκριτικά χαμηλό οριακό κόστος για κάθε επιπλέον μέτρο χωρικής κάλυψης. Η ταυτόχρονη υλοποίηση παράλληλων έργων υποδομής από τη ΔΕΥΑΙ η νέα Μονάδα Ηλιακής Ξήρανσης Ιλύος που εγκαινιάστηκε τον Ιούνιο του 2026, καθώς και τα προγραμματισμένα έργα επέκτασης του δικτύου αποχέτευσης όπου προσφέρει, όπως ανέδειξε η ανάλυση της μελέτης ένα ρεαλιστικό παράθυρο ευκαιρίας για την ενσωμάτωση καλωδίου οπτικής ίνας κατά τη διάρκεια ήδη προγραμματισμένων εκσκαφών, με οριακό πρόσθετο κόστος.

Παράλληλα, η μελέτη περίπτωσης ανέδειξε και μια σαφή αδυναμία της υφιστάμενης κατάστασης: το έργο τηλεμετρίας της ΔΕΥΑΙ επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στο δίκτυο ύδρευσης, ενώ η τεκμηριωμένη κάλυψη του δικτύου αποχέτευσης και μεταφοράς λυμάτων παραμένει περιορισμένη όπως ακριβώς η περιοχή όπου η

προστιθέμενη αξία μιας λύσης DFOS/FBG είναι μεγαλύτερη, δεδομένης της γειτνίασης της εγκατάστασης με το ευαίσθητο, κλειστό υδάτινο σύστημα της λίμνης Παμβώτιδας. Η υδρολογική ιδιαιτερότητα μιας κλειστής λίμνης, χωρίς σημαντική φυσική ανανέωση, ενισχύει το επιχείρημα υπέρ συνεχούς και τεκμηριωμένης παρακολούθησης της ποιότητας εκροής, καθώς οποιαδήποτε χρόνια, έστω και μικρή, υπέρβαση ορίων μπορεί να συσσωρευτεί σε βάθος χρόνου με τρόπο δυσδιάκριτο από τις παραδοσιακές μεθόδους περιοδικού ελέγχου.

Συνεισφορά και Πρακτική Αξία της Εργασίας

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται, πρώτον, στη χαρτογράφηση και συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών DFOS/FBG ειδικά στο πλαίσιο της διαχείρισης λυμάτων —έναν τομέα όπου η σχετική βιβλιογραφία παραμένει αναλογικά περιορισμένη σε σύγκριση με πιο ώριμους κλάδους εφαρμογής, όπως η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου ή η δομική παρακολούθηση κατασκευών πολιτικού μηχανικού. Δεύτερον, στη μεταφορά αυτής της θεωρητικής γνώσης σε ένα συγκεκριμένο, τεκμηριωμένο ελληνικό πλαίσιο εφαρμογής, μέσω της μελέτης περίπτωσης της ΕΕΛ Ιωαννίνων, η οποία λειτουργεί ως σημείο αναφοράς (reference project) για αντίστοιχους φορείς μεσαίας κλίμακας στην ελληνική περιφέρεια. Τρίτον, στην ανάδειξη μιας πρακτικά αξιοποιήσιμης στρατηγικής σταδιακής υιοθέτησης —της ενσωμάτωσης καλωδίου οπτικής ίνας παράλληλα με ήδη προγραμματισμένα έργα εκσκαφής και επέκτασης δικτύου η οποία μειώνει ουσιαστικά το βασικότερο ανασταλτικό εμπόδιο της τεχνολογίας, δηλαδή το αρχικό κόστος εγκατάστασης.

Περιορισμοί της Έρευνας

Η παρούσα εργασία υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς,. Ειδικότερα, η περιορισμένη διαθεσιμότητα δημόσια προσβάσιμων στοιχείων, δεν επέτρεψε μια πλήρως τεκμηριωμένη ανάλυση. Επιπλέον, καθώς η εφαρμογή οπτικών ινών στον τομέα των λυμάτων παραμένει σχετικά πρόσφατη σε σύγκριση με πιο ώριμους κλάδους, δεν υπάρχουν ακόμη επαρκή μακροχρόνια δεδομένα (σε βάθος 20ετίας) σχετικά με τη γήρανση του καλωδίου εντός ενός τόσο χημικά επιβαρυνμένου περιβάλλοντος όσο αυτό ενός δικτύου αποχέτευσης. Τέλος, η μεθοδολογία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, από τη φύση της, δεν περιλαμβάνει πρωτογενή πειραματική επαλήθευση των αναφερόμενων επιδόσεων, οι οποίες βασίζονται στην τριγωνοποίηση ευρημάτων.

Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα και τους περιορισμούς της, η παρούσα εργασία καταλήγει σε τέσσερις κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή. Πρώτων, στη διερεύνηση υβριδικών αρχιτεκτονικών αισθητήρων, οι οποίες συνδυάζουν κατανεμημένη φυσική παρακολούθηση (DTS/DAS/DSS) με σημειακούς οπτικούς χημικούς αισθητήρες (optrodes), για την ολοκληρωμένη, σε πραγματικό χρόνο, παρακολούθηση τόσο των δομικών όσο και των ποιοτικών παραμέτρων του λύματος. Δεύτερων, στην παρακολούθηση της μακροχρόνιας απόδοσης του πιλοτικού συστήματος της ΕΕΛ Ιωαννίνων μετά την πάροδο αρκετών ετών λειτουργίας, ώστε να παραχθούν πρωτογενή, ελληνικά δεδομένα διάρκειας ζωής και αξιοπιστίας που σήμερα απουσιάζουν από τη διεθνή βιβλιογραφία ειδικά για τον κλάδο της επεξεργασίας λυμάτων.

Καταληκτική Παρατήρηση

Συνολικά, η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η τεχνολογία των οπτικών ινών δεν αποτελεί απλώς μια ακόμη βελτίωση επί των υφιστάμενων συστημάτων παρακολούθησης, αλλά μια ποιοτική μετάβαση στον τρόπο με τον οποίο μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων «αντιλαμβάνεται» τον εαυτό της και το δίκτυο που εξυπηρετεί: από τη διακριτή, σημειακή και εκ των υστέρων παρακολούθηση, σε μια συνεχή, χωρικά πυκνή και εν πολλοίς προληπτική εποπτεία. Στο πλαίσιο των αυξημένων απαιτήσεων που θέτει η νέα Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής, υποχρέωση τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας, στόχοι ενεργειακής ουδετερότητας και ρητή προώθηση της ψηφιοποίησης η ικανότητα ενός φορέα να παρακολουθεί συνεχώς και αξιόπιστα το δίκτυό του δεν αποτελεί πλέον προαιρετική αναβάθμιση αλλά προϋπόθεση συμμόρφωσης και βιώσιμης λειτουργίας.

Η περίπτωση της ΕΕΛ Ιωαννίνων αποδεικνύει ότι η μετάβαση αυτή είναι εφικτή ακόμη και για φορείς μεσαίας κλίμακας, υπό την προϋπόθεση στρατηγικού σχεδιασμού που αξιοποιεί συνέργειες με ήδη προγραμματισμένα έργα υποδομής. Παρά τις τεχνικές, οικονομικές και οργανωτικές προκλήσεις που καταγράφηκαν, υπερβαίνουν τους περιορισμούς, καθιστώντας την ευρύτερη υιοθέτηση των οπτικών ινών μια ρεαλιστική και αναγκαία προοπτική για το μέλλον της ελληνικής και διεθνούς υποδομής επεξεργασίας λυμάτων.

Βιβλιογραφία

- (ΕΛΣΤΑΤ), Ε. Σ. (2023). Αποτελέσματα Απογραφής Πληθυσμού. Ελληνική Στατιστική Αρχή.
- (ΥΠΕΝ), Υ. Π. (2022, 9 30). Εθνικό Σχέδιο για τη Διαχείριση Αστικών Λυμάτων. *Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο Διαχείρισης Λυμάτων Οικισμών Προτεραιότητας*. Αθήνα.
- 1069/1980, Ν. (χ.χ.). Περί κινήτρων διά την ίδρυσιν Επιχειρήσεων.
- Ai-Jie Wang, H. L. (2024). Digital twins for wastewater treatment: A technical review. *Engineering*,, σσ. 21-35.
- Ai-Jie Wang, H. L. (2024, 5). Digital Twins for Wastewater Treatment: A Technical Review,. *Engineering*, σσ. 21-35.
- Alexandra Virginia Bounegru, A. D. (2025, 2 13). Electrochemical Sensors and Biosensors for the Detection of Pharmaceutical Contaminants in Natural Waters—A Comprehensive Review. *Chemosensors*.
- Bello, A. J. (2023). A systemic review of the cybersecurity challenges in Australian water infrastructure management. *Water*, 15(1).
- Bertulesi, M. B. (2023). Experimental investigations of distributed fiber optic sensors for water pipeline monitoring. *Sensors*,, 23(13).
- Braun, V. &. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research*, 3(2), σσ. 77-101.
- Brian Culshaw, M. I. (2008, 5 9). Fiber-Optic Sensing: A Historical Perspective. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, VOL. 26.
- Chong, S. S. (2019, 07). Fibre Optic Sensors for Selected Wastewater Characteristics. *Sensors*, σσ. 8640-8668. doi:8640-8668. 10.3390/s130708640.
- Danheng Gao, X. Y. (2020, 9). ptofluidic in-fiber on-line ethanol sensing based on graphene oxide integrated hollow optical fiber with suspended core. *Optical Fiber Technology*, Volume 58.
- David Krohn, T. M. (2014). *Fiber Optic Sensors*. Bellingham, Washington USA: SPIE Press.
- F. Baldini, A. C. (2006). *Optical Chemical Sensors*. Springer Dordrecht.
- George Tchobanoglous, H. D. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5/e. Metcalf & Eddy, Inc.
- Hartog, A. H. (2017). An introduction to distributed optical fibre sensors. *CRC Press*.
- Hartog, A. H. (2017). *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. Boca Raton: CRC Press.
- Hollweck Trista, R. K. (2016). Case Study Research Design and Methods. *The Canadian Journal of Program Evaluation*.
- Hongxuan Xu, J. Z. (2025, 3 10). mproved Variational Mode Decomposition in Pipeline Leakage Detection at the Oil Gas Chemical Terminals Based on Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing System. *Marine Science and Engineering*.
- Inaudi Daniele, G. B. (2010, 02). Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing. *Journal of Pressure Vessel Technology*, *Transactions of the ASME*.
- Inaudi, D. &. (2010). Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 132(1).

- Inc. Metcalf & Eddy, G. T. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw Hill.
- J. M. Lopez-Higuera, L. R. (2011, Feb 15). Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 29(4), σσ. pp. 587-608.
- Kalavrouziotis, I. K. (2017). *Wastewater and Biosolids Management*. IWA Publishing.
- Khairullah, E. F. (2025). LoRaWAN based smart water management IoT applications: A review. *Journal of Information and Telecommunication. Advance online publication*.
- KYA 5673/400/1997. (1997, 3 14). *ΦΕΚ Β' 192*.
- Ladegourdie, M. &. ((2022)). Performance analysis of OPC UA for industrial interoperability towards Industry 4.0. *IoT*, 4(3), σσ. 507-525.
- Liu, Z. &. (2019, 06). Structural Health Monitoring of Underground Structures in Reclamation Area Using Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors*, 19.
- Manuel Bertulesi, D. F. (2023, 7 6). Experimental Investigations of Distributed Fiber Optic Sensors for Water Pipeline Monitoring. *Sensors*.
- Mohammad Hany Yassin, M. H. (2024, 12 24). Fiber Bragg grating (FBG)-based sensors: a review of technology and recent applications in structural health monitoring (SHM) of civil engineering structures. *Discover Civil Engineering*, 1(151). doi:<https://doi.org/10.1007/s44290-024-00141-4>
- Muanenda Yonas, O. C. (2019). Application of Raman and Brillouin Scattering Phenomena in Distributed Optical Fiber Sensing. *Frontiers in Physics*, 7. doi:DOI=10.3389/fphy.2019.00155
- Muanenda, Y. O. (2019). Application of Raman and Brillouin. *Frontiers in Physics*, 7.
- Nelson Carriço, B. F. (2023, 3 15). Computational Tools for Supporting the Operation and Management of Water Distribution Systems towards Digital Transformation. *Water*.
- Page, M. J. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10.
- Rodríguez-Alonso, C. P.-R. (2024). Digital twin platform for. *Sensors*.
- Roostaei, J. W. (2023). IoT-based edge computing (IoT-EC) for improved environmental monitoring. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 38.
- Sanaye, S. &. (2022). Energy, exergy, economic and environmental analysis of a running integrated anaerobic digester–combined heat and power system in a municipal wastewater treatment plant. *Energy Reports*, 8, σσ. 9724-9741.
- Silva, R. (2022). Energy and reliability analysis of wastewater treatment plants in small communities In Odario. *Water Science & Technology*, 6(85).
- Snyder, H. (2019, 11). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, Volume 104, σσ. 333-339.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, σσ. 333-339.
- Song, K. (13, 02). Optimizing multi-parameter distributed fiber sensors: a hybrid Rayleigh-Brillouin-Raman System approach. *Light: Science & Applications*(13). doi:10.1038/s41377-024-01392-7
- Soto, M. &. (2007, 02). Distributed temperature sensor system based on Raman scattering using correlation-codes. *Electronics Letters*, 43, σσ. 862-864.

- Vicent Hernández-Chover, Á. B.-D.-S. (2018, 1 20). Efficiency of wastewater treatment facilities: The influence of scale economies. *Journal of Environmental Management*, σσ. 77-84.
- Yi Bao, Y. H. (2019, 4 19). Review of Fiber Optic Sensors for Structural Fire Engineering. *Sensors*.
- Yin, R. K. (2014). *Case study research: Design and methods* (5 εκδ.). SAGE Publications.
- Αθανάσιος Κούγκολος, Π. Σ. (2018). *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ Επεξεργασία & Επαναχρησιμοποίηση*. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Αθανάσιος, Κ. (2021). *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ: Ρύπανση και Προστασία Περιβάλλοντος*, 3η Έκδοση. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Βασίλειος, Α. (2010). *ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ*. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Ενέργειας, π. Π. (2020). Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο Υποδομών Λυμάτων για τους οικισμούς της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ (Αναθεώρηση 2020). Αθήνα: Γενική Γραμματεία Φυσικού Περιβάλλοντος και Υδάτων.
- ΕΥΔΑΠ. (2021). Ετήσια Έκθεση Λειτουργίας Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων. *Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας*. Αθήνα.
- ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, Σ. Τ. (1991, 5 12). Οδηγία 91/271/ΕΟΚ. *επεξεργασία των αστικών λυμάτων*.
- Κουϊμτζής Θεμιστοκλής, Σ. -Κ. (1994). Έλεγχος ρύπανσης περιβάλλοντος. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Κρήτης, Π. (2020). *πρατηγικό σχέδιο διαχείρισης υδάτων και καινοτόμες τεχνολογίες*. Ηράκλειο: Διεύθυνση Περιβάλλοντος.
- Μαρτάκης, Ι. (2018). *Ποιοτικός έλεγχος της λίμνης Παμβώτιδας και συγκριτική ανάλυση με τη*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
- Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019. (2024, 11 27). Ευρωπαϊκο Κοινοβούλιο.
- Οδηγία 91/271/ΕΟΚ. (1991, 3 21). ΕΟΚ.
- Ορφανός Δημήτριος. (2023). *Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων στο πλαίσιο ενός Έξυπνου Θερμοκηπίου*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.