

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας

«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστήρων μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε ελληνικό αυτοκινητόδρομο»



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Διαχείριση Αποβλήτων (ΔΙΑ)

Διπλωματική Εργασία

«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιομεμβρανών σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών αυτοκινητόδρομου στην Ελλάδα»

«Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας»

Επιβλέπων καθηγητής: «Ιωάννης Μαναριώτης»

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας

**«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστών
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»**

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή «Ζέρβα Κωνσταντίνου» που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας 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 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 διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας

«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστών
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»



«Επεξεργασία λυμάτων με την μέθοδο των βιοαντιδραστών
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»

«Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας»

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

«Ιωάννης Μαναριώτης»

«ΣΕΠ ΕΑΠ, Καθηγητής Πανεπιστημίου
Πατρών»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

«Παναγιώτης Κανατάς»

«Επίκουρος Καθηγητής, Πανεπιστημίου
Πατρών»

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας

«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστών μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε ελληνικό αυτοκινητόδρομο»

«Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Εταιρεία Ευροκατασκευαστική Ε.Σ.Ε και ιδιαίτερα τους κ.κ. Παναγιώτη Κώτση και Βασίλειο Κώτση για τις γνώσεις και τις επαγγελματικές ευκαιρίες που μου έχουν προσφέρει.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Καλαμπαλίκη για την συνεργασία μας».

«Αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία στην σύζυγο μου που με στήριξε με υπομονή σε αυτό το ταξίδι γνώσεων»

«Στην μνήμη του πολύ αγαπημένου μου ξάδερφου Κώστα»

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εφαρμογή της τεχνολογίας βιοαντιδραστήρων με μεμβράνες (MBR), για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων που παράγονται σε Σταθμό Εξυπηρέτησης Αυτοκινητιστών (ΣΕΑ) επί ελληνικού αυτοκινητοδρόμου. Η ανάγκη ανάπτυξης αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων σε εγκαταστάσεις που βρίσκονται εκτός αστικών κέντρων και δεν διαθέτουν πρόσβαση σε κεντρικά αποχετευτικά δίκτυα καθιστά επιτακτική την αξιοποίηση αποδοτικών και περιβαλλοντικά βιώσιμων τεχνολογιών.

Στο πλαίσιο της εργασίας παρουσιάζεται το ισχύον νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο που διέπει την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, ενώ αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MBR. Εξετάζεται η λειτουργία αποκεντρωμένης μονάδας επεξεργασίας λυμάτων δυναμικότητας 50 m³/d, η οποία εξυπηρετεί εγκαταστάσεις υγιεινής, χώρους εστίασης και πρατήριο καυσίμων σε ΣΕΑ αυτοκινητοδρόμου.

Η μελέτη εστιάζει στην αξιολόγηση των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των εισερχόμενων λυμάτων, στην παρακολούθηση των κρίσιμων λειτουργικών παραμέτρων της εγκατάστασης και στην εκτίμηση της αποδοτικότητας του συστήματος ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και λοιπών ρυπαντικών παραμέτρων. Παράλληλα, διερευνώνται οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας, καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία της διεργασίας.

Τα αποτελέσματα της εργασίας καταδεικνύουν ότι η τεχνολογία των βιομεμβρανών αποτελεί μια ιδιαίτερα αποτελεσματική λύση για την επεξεργασία λυμάτων σε αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις, διασφαλίζοντας την παραγωγή εκροής υψηλής ποιότητας επεξεργασμένων λυμάτων, κατάλληλης για επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση των χώρων πρασίνου των ΣΕΑ. Η εφαρμογή της τεχνολογίας βιοαντιδραστήρων με μεμβράνες (MBR) συμβάλλει ουσιαστικά στην προστασία των υδατικών πόρων, στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των υποδομών μεταφορών και στην προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

Λέξεις – Κλειδιά

- Βιοαντιδραστήρας μεμβρανών (MBR).
- Επεξεργασία λυμάτων.
- Σταθμοί Εξυπηρέτησης Αυτοκινητιστών (ΣΕΑ) .
- Επαναχρησιμοποίηση νερού.
- Αποκεντρωμένα συστήματα.
- Κυκλική οικονομία.

«Wastewater Treatment Using Membrane Bioreactor Technology at a Motorway Service Area in Greece»

«Konstantinos D. Zervas»

Abstract

This Master's Thesis investigates the application of Membrane Bioreactor (MBR) technology for the treatment of wastewater generated at Motorway Service Areas (MSAs) located along Greek motorways. The development of decentralized wastewater treatment systems in facilities situated outside urban areas and lacking access to centralized sewerage networks highlights the necessity for efficient and environmentally sustainable treatment technologies.

The study presents the existing legislative and regulatory framework governing wastewater treatment and water reuse, while examining the operating principles, technical characteristics, and advantages of MBR technology. Furthermore, the operation of a decentralized wastewater treatment plant with a treatment capacity of 50 m³/day is evaluated. The facility serves sanitary installations, food preparation areas, and a fuel station located within a motorway service area.

Particular emphasis is placed on the assessment of the quantitative and qualitative characteristics of the influent wastewater, the monitoring of critical operational parameters, and the evaluation of the system's efficiency in removing organic matter, suspended solids, and other pollutants. In addition, the operational and maintenance requirements of the treatment unit, as well as the factors affecting process stability and reliability, are investigated.

The findings demonstrate that membrane bioreactor technology constitutes a highly effective solution for wastewater treatment in decentralized facilities, ensuring the production of high-quality effluent suitable for reuse in the irrigation of landscaped areas within motorway service stations. Its implementation contributes significantly to the protection of water resources, the reduction of the environmental footprint

associated with transport infrastructure, and the promotion of circular economy principles through the sustainable management and reuse of treated wastewater.

Keywords:

Membrane Bioreactor (MBR).

Wastewater treatment.

Motorway Service Areas (MSAs).

Water reuse.

Decentralized systems.

Circular economy.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ	III
ABSTRACT	IV
KEYWORDS:	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	XII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	XIII
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2 Δομή της Εργασίας.....	4
1.3 Σκοπός και Στόχοι της ΜΔΕ	5
2. ΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	6
2.1 Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του συμβουλίου «Για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων».....	6
2.2. Οδηγία ΕΕ 2000/60 «Για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων».....	8
2.3. ΚΥΑ 5673/400/97 - Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων, όπως τροποποιείται από την ΚΥΑ 19661/1982/99.	11
2.4. Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 «Καθορισμός μέτρων, όρων & διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις».	17
2.5 ΚΥΑ οικ. 145116/2011 (ΦΕΚ 354-Β-2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων & διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις».	18
2.6 ΚΥΑ 191002/2013 όπως τροποποιεί μερικώς την ΚΥΑ 145116.	22
3. ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΜΕ ΜΕΜΒΡΑΝΗ.....	23
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	23
3.2 Αρχές βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.	24
3.3 Τύποι βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.....	26
3.4 Πλεονεκτήματα του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης	27
3.5 Απόδοση της τεχνολογίας MBR στην επεξεργασία λυμάτων.....	29
3.6 Ρύπανση μεμβράνης και μείωση ροής.....	30

3.7 MLVSS και MLSS.....	32
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ	34
4.1 Ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά εισερχομένων λυμάτων	34
4.2 Ζητούμενα αποτελέσματα στην έξοδο.....	34
4.3 Διάγραμμα ροής.....	36
4.4 Στάδια επεξεργασίας.....	37
4.4.1 Αντλιοστάσιο ανύψωσης ακαθάρτων λυμάτων	37
4.4.2 Λεπτή αυτοκαθαριζόμενη εσχάρωση 2mm	38
4.4.3 Δεξαμενή προκαθίζησης και αποθήκευσης ιλύος	39
4.4.4 Δεξαμενή εξισορρόπησης-Απονιτροποίησης.....	39
4.4.5 Αντλιοστάσιο Σταθερής Παροχής.....	42
4.4.6 Αναδευτήρας Απονιτροποίησης	43
4.4.7 Δεξαμενή βιολογικής επεξεργασίας	43
4.4.8 Διαχωρισμός στερεού – υγρού κλάσματος.....	47
4.4.9 Δεξαμενή χλωρίωσης επεξεργασμένων λυμάτων	49
4.5 Εξοπλισμός ελέγχου και λειτουργίας βιομεμβρανών.....	50
4.5.1 Φυσητήρας καθαρισμού μεμβρανών.....	50
4.5.2 Αντλίες αναρρόφησης επεξεργασμένων υγρών.....	50
4.5.3 Μετρητής ροής εξόδου	51
4.5.4 Μετρητής στάθμης	52
4.5.5 Μετρητής πίεσης.....	52
4.5.6 Σύστημα χημικού καθαρισμού των μεμβρανών	53
4.6 Κατανάλωση ενέργειας και λειτουργικά έξοδα	54
5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	57
5.1 Αναλύσεις ποιοτικών χαρακτηριστικών λυμάτων	57
5.2 Λειτουργικά δεδομένα στοιχείων ελέγχου.....	59
5.2.1 Οθόνη παρακολούθησης και λειτουργίας εγκατάστασης.....	61
5.2.2 Μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου στο μικτό υγρό.....	62
5.2.4 Μέτρηση ποσότητας της λάσπης.....	64
6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ	79
6.1 Δεξαμενή άρδευσης	79

6.2 Αντλιοστάσιο άρδευσης	79
6.3 Προγραμματιστής ελέγχου άρδευσης.....	80
6.4 Δίκτυο άρδευσης	80
7. ΓΕΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	81
7.1 Καθημερινές εργασίες.....	81
7.2 Εβδομαδιαίες εργασίες	81
7.3 Μηνιαίες εργασίες.....	81
7.4 Ετήσιες εργασίες	82
7.5 Μέτρα Υγιεινής και Ασφάλειας.....	82
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	86
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ.....	86
ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ	90
ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ	91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3-1 Στοιχείο Μεμβράνης.....	24
Εικόνα 3-2 Τυπική διάταξη βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.....	25
Εικόνα 3-3 Μηχανισμοί ρύπανσης μεμβράνης σε βιοαντιδραστήρες μεμβράνης.....	31
Εικόνα 3-4 Ρυπασμένο στοιχείο βιομεμβρανών.....	31
Εικόνα 4-1 Αντλιοστάσιο ανύψωσης εισερχομένων λυμάτων.....	37
Εικόνα 4-2 Αυτοκαθαριζομενη εσχάρωση.....	38
Εικόνα 4-3 Ανακυκλοφορία από την δεξαμενή αερισμού προς την εξισορρόπηση.....	40
Εικόνα 4-4 Υποβρύχια αντλία βαρέων λυμάτων.....	42
Εικόνα 4-5 Υποβρύχιος αναδευτήρας.....	43
Εικόνα 4-6 Δίκτυο διαχυτών.....	46
Εικόνα 4-7 Φυσητήρας.....	46
Εικόνα 4-8 Μεμβράνες πριν την εγκατάστασή τους.....	48
Εικόνα 4-9 Ανοιχτή στεγανή δεξαμενή επεξεργασμένων λυμάτων.....	49
Εικόνα 4-10 Αντλία τύπο κοχλία.....	51
Εικόνα 4-11 Ψηφιακό όργανο μέτρησης παροχής.....	51
Εικόνα 4-12 Ψηφιακός μετρητής πίεσης.....	52
Εικόνα 4-13 Διάταξη συστήματος καθαρισμού βιομεμβρανών.....	53
Εικόνα 5-1 Οθόνη παρακολούθησης και λειτουργίας αερισμού μεμβρανών.....	61
Εικόνα 5-2 Οθόνη παρακολούθησης και λειτουργίας εισόδου λυμάτων.....	61
Εικόνα 5-3 Σπάσιμο αμπούλας στο ανάμεικτο υγρό.....	62
Εικόνα 5-4 Χρωματομετρικός έλεγχος δείγματος.....	63
Εικόνα 5-5 Test kit μέτρησης υπολειμματικού χλωρίου και pH.....	63
Εικόνα 5-6 Κώνος inhoff με ανάμεικτο υγρό.....	64

Εικόνα 6-1 Αντλιοστάσιο άρδευσης.....	79
Εικόνα 6-2 Προγραμματιστής δικτύου άρδευσης.....	80
Εικόνα 6-3 Άποψη χώρου ποτίσματος.....	80

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3-1 Σχηματικό διάγραμμα του βυθισμένου βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.....	26
Σχήμα 3-2 Σχηματικό διάγραμμα του βιοαντιδραστήρα εξωτερικής μεμβράνης.....	27

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Απαιτήσεις για απορρίψεις αστικών λυμάτων.....	8
Πίνακας 2-2: Βασικοί ορισμοί.....	12
Πίνακας 2-3: Προθεσμίες ⁽¹⁾ και τύποι επεξεργασίας.....	13
Πίνακας 2-4: Απαιτήσεις για απορρίψεις αστικών λυμάτων από σταθμούς επεξεργασίας κατά τύπο επεξεργασίας.....	16
Πίνακας 4-1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά εισερχόμενων λυμάτων.....	34
Πίνακας 4-2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά επεξεργασμένων λυμάτων.....	34
Πίνακας 4-3 Ζητούμενη Απόδοση Συστήματος.....	35
Πίνακας 4-4 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά δεξαμενής απονιτροποίησης.....	41
Πίνακας 4-5 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά δεξαμενής αερισμού.....	44
Πίνακας 4-6 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά παραγωγής περίσσειας ιλύος.....	45
Πίνακας 4-7 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά απομάκρυνσης φωσφόρου.....	47
Πίνακας 4-8 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά συστοιχίας μεμβρανών.....	48
Πίνακας 4-9 Κύριος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός.....	55
Πίνακας 4-10 Απαιτούμενες ποσότητες χημικών για το έτος 2025.....	56
Πίνακας 5-1 Ανάλυση επεξεργασμένων λυμάτων και ανάμεικτου υγρού δεξ. Αερισμού 2025.....	58
Πίνακας 5-2 Φύλλο ελέγχου καταγραφής λειτουργικών δεδομένων.....	60
Πίνακας 5-3 Στατιστικά στοιχεία 2022.....	65
Πίνακας 5-4 Λειτουργικά στοιχεία 2022.....	66
Πίνακας 5-5 Στατιστικά στοιχεία 2023.....	68
Πίνακας 5-6 Λειτουργικά στοιχεία 2023.....	69
Πίνακας 5-7 Στατιστικά στοιχεία 2024.....	71
Πίνακας 5-8 Λειτουργικά στοιχεία 2024.....	72
Πίνακας 5-9 Λειτουργικά στοιχεία 2025.....	75
Πίνακας 5-10 Στατιστικά στοιχεία 2025.....	76

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα: 5-1 Ετήσια παροχή (m^3) 2022.....	67
Γράφημα: 5-2 Υποπίεση μεμβρανών (mbar) 2022.....	68
Γράφημα: 5-3 Ετήσια παροχή (m^3) 2023.....	70
Γράφημα: 5-4 Υποπίεση μεμβρανών (mbar) 2023.....	71
Γράφημα: 5-5 Ετήσια παροχή (m^3) 2024.....	73
Γράφημα: 5-6 Υποπίεση μεμβρανών (mbar) 2024.....	74
Γράφημα: 5-7 Ετήσια παροχή (m^3) 2025.....	76
Γράφημα: 5-8 Υποπίεση μεμβρανών (mbar) 2025.....	77

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5-1 Διάγραμμα ροής μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων.....	36
---	----

1.Εισαγωγή

Οι οδικές μεταφορές αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους κλάδους του τομέα των μεταφορών και συνιστούν τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο μετακίνησης αγαθών και επιβατών, τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Η ανάπτυξη της εθνικής οικονομίας συνδέεται άμεσα με τον βαθμό ανάπτυξης του συστήματος μεταφορών και ειδικότερα του οδικού δικτύου, το οποίο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην οικονομική και κοινωνική πρόοδο μιας χώρας (Move, 2019). Ειδικότερα, το οδικό δίκτυο συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του φυσικού κεφαλαίου και των διαθέσιμων φυσικών πόρων, ενώ παράλληλα ενισχύει τη συνολική κοινωνική ανάπτυξη (EC, 2020).

Μία από τις βασικές λειτουργίες του συστήματος μεταφορών είναι η κάλυψη των αναγκών μετακίνησης ανθρώπων και αγαθών, γεγονός που υποστηρίζει την παραγωγική διαδικασία και τη διεύρυνση των οικονομικών αγορών. Η ανάπτυξη των μεταφορικών υποδομών και η διευκόλυνση της κινητικότητας συμβάλλουν στην κοινωνική συνοχή, δημιουργώντας δυνατότητες αλλαγής τόπου κατοικίας και εργασίας, ενώ επηρεάζουν θετικά και άλλους παραγωγικούς τομείς, όπως ο τουρισμός (Magazzino & Mele, 2021).

Η ανάπτυξη του δικτύου μεταφορών αποτελεί βασικό παράγοντα οικονομικής ανάπτυξης, καθώς συνδέεται άμεσα με τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων μιας περιοχής. Οι κατάλληλες μεταφορικές υποδομές μειώνουν το κόστος μεταφοράς εμπορευμάτων και παράλληλα αυξάνουν την ελκυστικότητα μιας περιοχής για επενδύσεις και επιχειρηματική δραστηριότητα (Darmawan et al., 2021).

Παράλληλα, η αυξανόμενη κατασκευή παρακαμπτήριων οδών γύρω από τα αστικά κέντρα συμβάλλει στη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής των κατοίκων και αυξάνοντας τη λειτουργικότητα του οδικού δικτύου (Ayuningtyas et al., 2019). Επιπλέον, η δυνατότητα ταχύτερης μετακίνησης μεταξύ πόλεων μειώνει σημαντικά τον χρόνο ταξιδιού και επηρεάζει θετικά τις αξίες γης και ακινήτων, καθιστώντας τις περιοχές περισσότερο προσβάσιμες σε επενδυτές και δυνητικούς αγοραστές (Kandambi & Bandara, 2017).

Παράλληλα με την ανάπτυξη του οδικού δικτύου, παρατηρείται και η εντατική ανάπτυξη των συνοδευτικών οδικών υποδομών, όπως οι Σταθμοί Εξυπηρέτησης Αυτοκινητιστών, κυρίως κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων και των οδών ταχείας κυκλοφορίας. Η χωροθέτηση των ΣΕΑ εξαρτάται άμεσα από τη χάραξη των αυτοκινητοδρόμων, οι οποίοι συχνά βρίσκονται εκτός κατοικημένων περιοχών. Ως αποτέλεσμα, η πρόσβαση σε βασικά δίκτυα κοινής ωφέλειας, όπως το ηλεκτρικό δίκτυο, η ύδρευση και η αποχέτευση, αποτελεί σημαντική πρόκληση κατά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των εγκαταστάσεων αυτών (Pérez-Acebo et al., 2022).

Στο πλαίσιο αυτό, σημαντική πρόκληση για τα σύγχρονα συστήματα μεταφορών αποτελεί η δημιουργία υποδομών χαμηλών εκπομπών ρύπων, οι οποίες θα είναι περιβαλλοντικά ασφαλείς και βιώσιμες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη λειτουργία τους με τρόπο που να διασφαλίζει την ορθολογική κατανάλωση νερού και την ασφαλή επεξεργασία και διάθεση των παραγόμενων λυμάτων. Τα ΣΕΑ διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο οδικό δίκτυο, καθώς παρέχουν στους ταξιδιώτες ασφαλείς χώρους ανάπαυσης, υγιεινής και εξυπηρέτησης κατά τη διάρκεια των μετακινήσεων (Al-Kaisy et al., 2012).

Η ορθή χωροθέτηση τους είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση ασφαλών συνθηκών στάθμευσης και ανάπαυσης των οδηγών (Meijer et al., 2018). Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη συμβολή αυτού του τύπου εγκαταστάσεων στην μείωση της κόπωσης των οδηγών, η οποία αποτελεί σημαντικό παράγοντα πρόκλησης τροχαίων ατυχημάτων, ιδιαίτερα σε διαδρομές μεγάλων αποστάσεων και υψηλών ταχυτήτων. Η δυνατότητα στάσης για φαγητό, ξεκούραση και αναψυχή συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση της κόπωσης και, κατ' επέκταση, στον περιορισμό του κινδύνου ατυχημάτων (Darmawan et al., 2021).

Επιπλέον, οι χώροι εξυπηρέτησης εξελίσσονται πλέον σε σύγχρονες εγκαταστάσεις πολλαπλών λειτουργιών, οι οποίες συχνά λειτουργούν και ως αυτόνομοι προορισμοί. Παράλληλα, παρέχουν τη δυνατότητα εφαρμογής αρχών κυκλικής οικονομίας, μειώνοντας το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και περιορίζοντας τις οικονομικές δαπάνες λειτουργίας τους.

Βασικός στόχος των ΣΕΑ είναι η δημιουργία ασφαλών και λειτουργικών χώρων εξυπηρέτησης των ταξιδιωτών, παρέχοντας βασικές υποδομές, όπως

εγκαταστάσεις υγιεινής, εστιατόρια, καφετέριες, μικρές αγορές, πρατήρια υγρών καυσίμων και σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η εύρυθμη λειτουργία των εγκαταστάσεων υγιεινής προϋποθέτει την επαρκή παροχή νερού, καθώς και την αποτελεσματική συλλογή, επεξεργασία και διάθεση των παραγόμενων λυμάτων (Ghaitidak & Yadav, 2013).

Λόγω της απομακρυσμένης θέσης των περισσότερων ΣΕΑ και της περιορισμένης πρόσβασης σε κεντρικά αποχετευτικά δίκτυα, συχνά απαιτείται η εφαρμογή τοπικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Στις περιπτώσεις αυτές, τα επεξεργασμένα λύματα απορρίπτονται είτε στο έδαφος είτε σε επιφανειακά ύδατα. Ωστόσο, η διάθεση λυμάτων στο έδαφος μέσω συστημάτων διήθησης ενδέχεται να εγκυμονεί κινδύνους για τα υπόγεια ύδατα, καθώς καθίσταται δύσκολος ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας. Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων αποτελεί ιδιαίτερα σοβαρό πρόβλημα, ειδικά υπό συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας υδάτινων πόρων.

Παράλληλα, τα επιφανειακά ύδατα που δέχονται επεξεργασμένα λύματα είναι συχνά μικροί υδάτινοι αποδέκτες, στους οποίους παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις ροής, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Σε ακραίες περιπτώσεις, τα επεξεργασμένα λύματα ενδέχεται να αποτελούν το σύνολο της ροής ενός υδατορέματος, προκαλώντας σοβαρές διαταραχές στην οικολογική ισορροπία του οικοσυστήματος (Pawęska et al., 2019).

Συνεπώς, η εντατική ανάπτυξη του οδικού δικτύου και των συνοδευτικών εγκαταστάσεων εξυπηρέτησης δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για την ορθολογική διαχείριση των παραγόμενων λυμάτων και την εφαρμογή βιώσιμων τεχνολογιών επεξεργασίας. Η χρήση των εγκαταστάσεων υγιεινής στους χώρους στάθμευσης και εξυπηρέτησης συνδέεται με την παραγωγή μεγάλων και συχνά ανομοιόμορφων ποσοτήτων λυμάτων, γεγονός που καθιστά αναγκαία την αποτελεσματική επεξεργασία τους, με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

1.2 Δομή της Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται το θεωρητικό και πρακτικό πλαίσιο στο οποίο αυτή εντάσσεται, καθώς και οι βασικοί στόχοι και η σκοπιμότητα εκπόνησής της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ισχύον νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο που διέπει την κατασκευή και λειτουργία της εγκατάστασης βιολογικού καθαρισμού λυμάτων του Σταθμού Εξυπηρέτησης Αυτοκινητιστών (ΣΕΑ), με αναφορά στις σχετικές περιβαλλοντικές και τεχνικές απαιτήσεις.

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάλυση της τεχνολογίας των βιοαντιδραστήρων μεμβρανών (Membrane Bioreactors – MBR), παρουσιάζοντας τις βασικές αρχές λειτουργίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τις εφαρμογές της συγκεκριμένης μεθόδου επεξεργασίας λυμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι σχεδιαστικές παράμετροι της εγκατάστασης, με έμφαση στα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων, καθώς και στις απαιτήσεις ποιότητας του τελικώς επεξεργασμένου νερού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία παρακολούθησης και ελέγχου της λειτουργίας, οι αναλύσεις ποιότητας των λυμάτων και η αξιολόγηση των λειτουργικών δεδομένων για την περίοδο 2022–2025.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφεται το σύστημα άρδευσης που χρησιμοποιεί την επεξεργασμένη εκροή για την άρδευση του περιβάλλοντος χώρου πρασίνου.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόγραμμα εργασιών λειτουργίας, συντήρησης, υγιεινής και ασφάλειας της εγκατάστασης

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης, οι κύριοι περιορισμοί των διαθέσιμων δεδομένων και οι προτάσεις για τη βελτίωση της παρακολούθησης και λειτουργίας της μονάδας.

1.3 Σκοπός και Στόχοι της ΜΔΕ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η λειτουργία και η διαχείριση αποκεντρωμένης εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων σε Σταθμό Εξυπηρέτησης Αυτοκινητιστών, δυναμικότητας 50 m³/d, η οποία εξυπηρετεί εγκαταστάσεις υγιεινής, χώρους παρασκευής γευμάτων και ροφημάτων και πρατήριο υγρών καυσίμων. Το συγκρότημα των ΣΕΑ αποτελείται από δύο ξεχωριστά συγκροτήματα, τα οποία βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές του αυτοκινητοδρόμου και εξυπηρετούν διαφορετικές κατευθύνσεις κυκλοφορίας.

Κύριος στόχος της εργασίας είναι η αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς της μονάδας MBR υπό μεταβαλλόμενες υδραυλικές συνθήκες, με έμφαση στην απόδοση επεξεργασίας, στη λειτουργία των μεμβρανών, στις απαιτήσεις παρακολούθησης και συντήρησης και στη δυνατότητα αξιοποίησης της επεξεργασμένης εκροής για άρδευση.

Ειδικότεροι στόχοι είναι:

- (α) η αξιολόγηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των εισερχόμενων και εξερχόμενων λυμάτων,
- (β) η ανάλυση της εποχικής μεταβολής της υδραυλικής φόρτισης,
- (γ) η διερεύνηση της μεταβολής της υποπίεσης/διαμεμβρανικής πίεσης των μεμβρανών,
- (δ) η αξιολόγηση βασικών λειτουργικών παραμέτρων και
- (ε) η διατύπωση προτάσεων για τη βελτίωση της λειτουργίας, συντήρησης και παρακολούθησης της εγκατάστασης.

2. Νομικό πλαίσιο

2.1 Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του συμβουλίου «Για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων».

Η οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 τροποποιεί την οδηγία 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων.

Η παρούσα οδηγία καθορίζει κανόνες για τη συλλογή, την επεξεργασία και την απόρριψη αστικών λυμάτων, με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας, σύμφωνα με την προσέγγιση Μία Υγεία, με σταδιακή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) σε βιώσιμα επίπεδα, βελτίωση του ενεργειακού ισοζυγίου των δραστηριοτήτων συλλογής και επεξεργασίας των αστικών λυμάτων και συμβολή στη μετάβαση προς μια κυκλική οικονομία.

Καθορίζει επίσης κανόνες σχετικά με την πρόσβαση σε υποδομές υγιεινής για όλους, τη διαφάνεια του τομέα της διαχείρισης αστικών λυμάτων, την τακτική επιτήρηση παραμέτρων σημαντικών για τη δημόσια υγεία στα αστικά λύματα και την εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Η Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 διευρύνει το πεδίο εφαρμογής των ευρωπαϊκών απαιτήσεων για τα αστικά λύματα, μειώνοντας το σχετικό κατώφλι για τις υποχρεώσεις συλλογής και επεξεργασίας σε 1.000 ι.π. και ενισχύοντας τις απαιτήσεις για την επεξεργασία, την επαναχρησιμοποίηση, την παρακολούθηση και την ενεργειακή απόδοση. Η Οδηγία πρέπει να μεταφερθεί στο εθνικό δίκαιο έως τις 31 Ιουλίου 2027 και οι σχετικές διατάξεις εφαρμόζονται από 1 Αυγούστου 2027, με τις ειδικές μεταβατικές διατάξεις που προβλέπονται στο ίδιο το κείμενο. Θεσπίζονται νέες υποχρεώσεις για σταδιακή αναβάθμιση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων

- Έως το 2035 προβλέπεται εφαρμογή δευτεροβάθμιας επεξεργασίας για τους οικισμούς άνω των 1.000 ι.π., με τις προβλεπόμενες παρεκκλίσεις και μεταβατικές διατάξεις.
- Για την τριτοβάθμια επεξεργασία, η Οδηγία προβλέπει σταδιακή εφαρμογή με αυστηρότερες απαιτήσεις για άζωτο και φώσφορο: έως το 2033, το 30% των εγκαταστάσεων που εξυπηρετούν οικισμούς ≥ 150.000 ι.π. θα πρέπει να

καλύπτεται, έως το 2036 το 70% και έως το 2039 όλες οι σχετικές εγκαταστάσεις. Από το 2045 οι απαιτήσεις επεκτείνονται στις εγκαταστάσεις οικισμών ≥ 10.000 ι.π., σύμφωνα με τις μεταβατικές διατάξεις.

- Για την τεταρτοβάθμια επεξεργασία μικρορρύπων προβλέπεται σταδιακή εφαρμογή στις εγκαταστάσεις οικισμών ≥ 150.000 ι.π., με κάλυψη 20% έως το 2033, 60% έως το 2039 και 100% έως το 2045.

Η Οδηγία ενισχύει επίσης την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», την παρακολούθηση παραμέτρων δημόσιας υγείας και την ενεργειακή ουδετερότητα. Η τελευταία αφορά, σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις, κυρίως εγκαταστάσεις επεξεργασίας και δίκτυα που εξυπηρετούν φορτία ≥ 10.000 ι.π. Επομένως, οι απαιτήσεις της νέας Οδηγίας πρέπει να παρουσιάζονται ως ευρωπαϊκό πλαίσιο που θα εφαρμοστεί μέσω εθνικής μεταφοράς και όχι ως ήδη πλήρως ενσωματωμένο ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο κατά τον χρόνο εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ενισχύεται η επιδημιολογική παρακολούθηση μέσω της ανάλυσης αστικών λυμάτων για την ανίχνευση παθογόνων μικροοργανισμών, ιών και δεικτών δημόσιας υγείας, αξιοποιώντας την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά την πανδημία COVID-19. Τα κράτη μέλη υποχρεούνται να αξιολογούν τους κινδύνους που συνδέονται με ακραία καιρικά φαινόμενα, πλημμύρες και ξηρασία, ώστε τα δίκτυα αποχέτευσης και οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας να καταστούν περισσότερο ανθεκτικά στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η οδηγία προωθεί την ανάκτηση πόρων από τα λύματα, όπως νερό, θρεπτικά συστατικά και ενέργεια, ενισχύοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Πίνακας 2-1: Απαιτήσεις για απορρίψεις αστικών λυμάτων.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ⁽⁴⁾	ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ
Βιοχημικές ανάγκες σε οξυγόνο (ΒΑΟ ₅ στους 20 °C) χωρίς νιτροποίηση ⁽¹⁾	25 mg/l O ₂	70-90 40 δυνάμει άρθρου 6 παράγραφος 4	Ομογενοποιημένο, αδιάθικτο, ακατακάθιστο δείγμα. Προσδιορισμός του διαλυμένου οξυγόνου πριν και μετά πενήνήμερη επώαση στους 20 °C ± 1 °C, σε απόλυτο σκότος. Προσθήκη αναστολέα νιτροποίησης
Χημικές ανάγκες σε οξυγόνο (ΧΑΟ) ⁽²⁾	125 mg/l O ₂	75	Ομογενοποιημένο, αδιάθικτο, ακατακάθιστο δείγμα. Διχρωμικό κάλιο
Ολικός οργανικός άνθρακας ⁽²⁾	37 mg/l	75	EN 1484
Ολικά αιωρούμενα στερεά	35 mg/l ⁽³⁾	90 ⁽³⁾	Διήθηση αντιπροσωπευτικού δείγματος μέσω φίλτρου μεμβράνης των 0,45 μm. Ξήρανση σε θερμοκρασία 105 °C και ζύγιση Φυγοκέντρωση αντιπροσωπευτικού δείγματος (επί 5 τουλάχιστον λεπτά, με μέση επιτάχυνση 2800-3200g). Ξήρανση σε θερμοκρασία 105 °C και Ζύγιση

- (1) Η παράμετρος αυτή μπορεί να αντικατασταθεί από άλλη: ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) ή ολικές ανάγκες σε οξυγόνο (TOD) εάν μπορεί να ευρεθεί σχέση μεταξύ του BOD₅ και της υποκατάστατης παραμέτρου.
- (2) Τα κράτη μέλη μετρούν είτε τις χημικές ανάγκες σε οξυγόνο (COD) είτε τον ολικό οργανικό άνθρακα.
- (3) Η απαίτηση αυτή είναι προαιρετική.
- (4) Μείωση ανάλογα με το φορτίο των εισερχόμενων λυμάτων.

2.2. Οδηγία ΕΕ 2000/60 «Για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων».

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν από την υποβάθμιση της ποιότητας των νερών και την «πίεση» που ασκείται στα υδατικά αποθέματα λόγω της συνεχούς αύξησης της ζήτησης για νερό καλής ποιότητας, σε όλα τα Κράτη-Μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εκδόθηκε η Οδηγία 2000/60/ΕΕ «για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων».

Η Οδηγία αυτή υιοθετεί μια καινοτόμο και ολοκληρωμένη προσέγγιση στο θέμα της διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων (επιφανειακών και

υπόγειων) και των υδροτοπικών οικοσυστημάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στοχεύοντας στην επίτευξη «καλής οικολογικής ποιότητας» εντός 15 ετών για όλα τα ύδατα της (πλην κάποιων εξαιρέσεων όπως είναι τα ισχυρά τροποποιημένα υδάτινα σώματα, για τα οποία επιδιώκεται η επίτευξη καλού οικολογικού δυναμικού σε χρόνο που μπορεί να επιμηκυνθεί), στην αιεφορία του πόρου και στην εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού για τις διάφορες παραγωγικές χρήσεις.

Τα Κράτη-Μέλη έχουν αναγνωρίσει την ανάγκη συντονισμένων ενεργειών με στόχο τη συγκεκριμενοποίηση και αποσαφήνιση των, σε σημαντικό βαθμό, γενικών διατυπώσεων των επιμέρους άρθρων και επιταγών της Οδηγίας. Για το λόγο αυτό συμφωνήθηκε, σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, ένα Στρατηγικό Κείμενο για την εφαρμογή της Οδηγίας, στο οποίο επισημαίνεται η ανάγκη συντονισμένης δράσης των Κρατών-Μελών σε διάφορες επιμέρους θεματικές ενότητες :

- Προδιαγραφές εκπόνησης μελετών περιγραφής και καταγραφής περιβαλλοντικών πιέσεων και επιπτώσεων ανά υδατικό Διαμέρισμα.
- Προσδιορισμός ισχυρά τροποποιημένων υδάτινων σωμάτων.
- Καθορισμός ποιοτικών στόχων και συνθηκών αναφοράς.
- Ανάπτυξη τυπολογίας και συστημάτων ταξινόμησης για μεταβατικά και παράκτια νερά.
- Δημιουργία Πρωτοκόλλου διαβαθμονόμησης (Intercalibration).
- Επεξεργασία μεθοδολογίας Κοστολόγησης-Τιμολόγησης του νερού.
- Ανάπτυξη προγραμμάτων παρακολούθησης των νερών (monitoring).
- Προσδιορισμός της αυξητικής τάσης ρύπανσης στα υπόγεια νερά.
- Επεξεργασία των προδιαγραφών Εκπόνησης Διαχειριστικών Μελετών στις
- Λεκάνες Απορροής Ποταμών.
- Ανάπτυξη Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS).
- Ανταλλαγή πληροφοριών, ενημέρωση και ευαισθητοποίηση του κοινού.

Το πεδίο εφαρμογής της Οδηγίας 2000/60 καλύπτει όλους τους τύπους των υδάτων: εσωτερικά ύδατα (επιφανειακά και υπόγεια), μεταβατικά ύδατα και παράκτια. Για την επίτευξη των στόχων της Οδηγίας, τα ύδατα οργανώνονται σε γεωγραφικές ή διοικητικές ενότητες, συγκεκριμένα σε λεκάνες απορροής ποταμού, σε περιοχές λεκανών απορροής ποταμού και σε υδατικά σώματα.

Σύμφωνα με την οδηγία 2000/60, κάθε κράτος μέλος υποχρεούται να καταρτίσει σχέδια διαχείρισης για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού (υδατικά διαμερίσματα), τα οποία θα αναθεωρούνται και θα ενημερώνονται ανά εξαετία και θα ενημερώνονται με λεπτομερέστερα σχέδια ανά υπολεκάνη ή τύπο ύδατος, ενθαρρύνοντας την ενεργό συμμετοχή των ενδιαφερόμενων φορέων και λαμβάνοντας υπόψη την αρχή της ανάκτησης του κόστους των υπηρεσιών ύδατος, συμπεριλαμβανομένου και αυτού για το περιβάλλον, σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Η Οδηγία 2000/60/EK θέτει ως βασικό στόχο την αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης των υδάτων και την επίτευξη καλής κατάστασης των υδάτων, με τις προβλεπόμενες εξαιρέσεις και παρατάσεις. Η αναφορά στην προθεσμία του 2015 θα πρέπει να παρουσιάζεται ως αρχικός στόχος της Οδηγίας και όχι ως τρέχουσα προθεσμία συμμόρφωσης.

Ωστόσο για συγκεκριμένα υδατικά συστήματα, εφόσον πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, η Οδηγία προβλέπει παράταση της προθεσμίας αυτής ή και επιδίωξη περιβαλλοντικών στόχων λιγότερο αυστηρών από αυτούς που απαιτούνται κανονικά. Όσον αφορά τα επιφανειακά νερά, καλή κατάσταση θεωρείται η καλή οικολογική και η καλή χημική κατάσταση ενώ, όσον αφορά τα υπόγεια νερά, καλή κατάσταση θεωρείται η καλή ποσοτική και η καλή χημική κατάσταση.

Με βάση τις κατευθύνσεις – διαπιστώσεις του Σχεδίου Προγράμματος Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και τις πρόσθετες απαιτήσεις της οδηγίας 2000/60 γίνεται σαφές ότι η υδατική πολιτική, σε επίπεδο χώρας, θα προκύψει από τη συνισταμένη των επιμέρους διαχειριστικών πολιτικών και θα ενταχθεί στην κοινή ευρωπαϊκή υδατική στρατηγική.

Η ανάπτυξη των επιμέρους διαχειριστικών πολιτικών (ανά υδατικό διαμέρισμα και στη συνέχεια ανά περιφέρεια) θα υποστηριχθεί με τη δημιουργία κατάλληλων πληροφοριακών συστημάτων και εργαλείων, τα οποία θα καταγράψουν τα πραγματικά πλεονάσματα και ελλείμματα, διαμορφώνοντας μία εθνική υδατική πολιτική στα πλαίσια της αντίστοιχης ευρωπαϊκής.

2.3. ΚΥΑ 5673/400/97 - Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων, όπως τροποποιείται από την ΚΥΑ 19661/1982/99.

Το ισχύον εθνικό θεσμικό πλαίσιο για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων βασίζεται στην ΚΥΑ 5673/400/1997 (ΦΕΚ Β' 192/14-3-1997), με την οποία ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, όπως αυτή τροποποιήθηκε και συμπληρώθηκε, μεταξύ άλλων, με την ΚΥΑ 19661/1982/1999. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ αναδιατυπώθηκε και πρόκειται να αντικατασταθεί από την Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, η οποία πρέπει να μεταφερθεί στο εθνικό δίκαιο έως τις 31 Ιουλίου 2027 και θα εφαρμόζεται από την 1η Αυγούστου 2027, με ειδικές μεταβατικές διατάξεις.

Η απόφαση αυτή, όπως τροποποιείται με την ΚΥΑ 19661/1982/99, αποτελεί θεμελιώδες κείμενο της ελληνικής νομοθεσίας για την ορθολογική διαχείριση των αστικών λυμάτων. Στόχος είναι η προστασία του περιβάλλοντος, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στις περιοχές που χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητες λόγω ευτροφισμού, από την υποβάθμιση στην οποία οδηγεί η απόρριψη των αστικών λυμάτων των οικισμών και των βιοαποικοδομήσιμων βιομηχανικών λυμάτων των κλάδων της παραγωγής τροφίμων και γεωργικών προϊόντων, επιβάλλοντας τη συλλογή και επεξεργασία αυτών. Παράλληλα, ενισχύεται η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων και της ιλύος που παράγεται από την επεξεργασία λυμάτων.

Σε αυτό το πλαίσιο, ορίζεται η αναγκαία ελάχιστη τεχνική υποδομή - συλλογή και επεξεργασία λυμάτων - που πρέπει να κατασκευασθεί στους οικισμούς της Ελλάδας ανάλογα με τον πληθυσμό τους και την κατάσταση από πλευράς ανάπτυξης του ευτροφισμού (ευαισθησία) των υδάτινων αποδεκτών στους οποίους καταλήγουν τα αστικά λύματα. Για κάθε μια από τις υποχρεώσεις επιβάλλεται ορισμένη χρονική προθεσμία εφαρμογής της. Επίσης, θεσπίζεται καθεστώς αδειοδότησης για τα βιομηχανικά λύματα που διοχετεύονται στα αποχετευτικά δίκτυα και στους σταθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Τέλος, εξασφαλίζεται η ενημέρωση του κοινού με τη δημοσίευση ανά διετία έκθεσης για την κατάσταση της διάθεσης των αστικών λυμάτων και της ιλύος στις διάφορες περιοχές της χώρας.

Πίνακας 2-2: Βασικοί ορισμοί

Αστικά λύματα	Συνίστανται σε οικιακά λύματα ή μίγμα οικιακών λυμάτων με βιομηχανικά απόβλητα ή/και όμβριες απορροές
Οικισμοί	Οι περιοχές στις οποίες ο πληθυσμός ή/και οι οικονομικές δραστηριότητες είναι επαρκώς συγκεντρωμένες ώστε τα αστικά λύματα να μπορούν να συλλέγονται και να αποχετεύονται σε σταθμό επεξεργασίας αστικών λυμάτων ή σε τελικό σημείο απόρριψης
Βιομηχανικοί τομείς	Επεξεργασία του γάλακτος Παραγωγή οπωροκηπευτικών προϊόντων Παραγωγή και εμφιάλωση μη αλκοολούχων ποτών Μεταποίηση γεωμύλων Βιομηχανία κρέατος Ζυθοποιία Παραγωγή αλκοόλης και αλκοολούχων ποτών Παραγωγή ζωοτροφών από φυτικά προϊόντα Παραγωγή ζελατίνας και κόλλας από δέρματα και οστά ζώων Μονάδες παραγωγής βύνης Μεταποιητική βιομηχανία ιχθύων
Μ.Ι.Π. (μονάδα ισοδύναμου πληθυσμού)	Είναι το αποικοδομήσιμο οργανικό φορτίο που παρουσιάζει βιοχημικές ανάγκες σε οξυγόνο πέντε ημερών (BOD5) ίσες προς 60 g/ημέρα
Πρωτοβάθμια επεξεργασία	Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων με φυσική ή/και χημική μέθοδο που περιλαμβάνει την καθίζηση των αιωρούμενων στερεών, ή με άλλες μεθόδους με τις οποίες το BOD5 των εισερχόμενων λυμάτων μειώνεται τουλάχιστον κατά 20% πριν από την απόρριψη και το συνολικό φορτίο των αιωρούμενων στερεών στα εισερχόμενα λύματα μειώνεται κατά 50% τουλάχιστον
Δευτεροβάθμια επεξεργασία	Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων με μέθοδο που, κατά κανόνα, περιλαμβάνει βιολογική επεξεργασία με δευτεροβάθμια καθίζηση, ή με άλλες μεθόδους
Κατάλληλη επεξεργασία	Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων με μέθοδο ή/και σύστημα διάθεσης που επιτρέπει στα ύδατα υποδοχής να ανταποκρίνονται σε σχετικούς ποιοτικούς στόχους και στις συναφείς διατάξεις της παρούσας απόφασης καθώς και άλλων διατάξεων της κείμενης νομοθεσίας

Όλοι οι οικισμοί άνω των 2.000 ι.π. πρέπει να διαθέτουν συστήματα συλλογής και επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Βασικός κανόνας για το επίπεδο επεξεργασίας είναι η δευτεροβάθμια επεξεργασία. Για τις απορρίψεις στις περιοχές που χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητες, καθώς και στις λεκάνες απορροής αυτών, απαιτείται υψηλότερο επίπεδο επεξεργασίας όπως η δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία.

Επιτρέπεται χαμηλότερο επίπεδο επεξεργασίας όπως η πρωτοβάθμια επεξεργασία, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, στην περίπτωση απορρίψεως σε ύδατα ακτών ή σε εκβολές ποταμών που χαρακτηρίζονται ως λιγότερο ευαίσθητα. Οι προθεσμίες και οι τύποι επεξεργασίας κατά μέγεθος του οικισμού και τύπο περιοχής δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας
«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστήρων
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»

Πίνακας 2-3: Προθεσμίες ⁽¹⁾ και τύποι επεξεργασίας

Τύπος Περιοχής	Μέγεθος οικισμού				
	< 2000 ι.π..	Μεταξύ 2000 και 10.000 ι.π.	Μεταξύ 10.000 και 15.000 ι.π.	Μεταξύ 15.000 και 150.000 ι.π.	> 150.000 ι.π.
Ευαίσθητη περιοχή	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 2005 κατάλληλη επεξεργασία	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 2005 και δευτεροβάθμια επεξεργασία ⁽³⁾	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 1998 και υψηλότερο επίπεδο επεξεργασίας	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 1998 και υψηλότερο επίπεδο επεξεργασίας	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 1998 και υψηλότερο επίπεδο επεξεργασίας
Κανονική περιοχή ⁽²⁾	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 2005 κατάλληλη επεξεργασία	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 2005 και δευτεροβάθμια επεξεργασία ⁽³⁾	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 2005 και δευτεροβάθμια επεξεργασία	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 2000 και δευτεροβάθμια επεξεργασία	Εάν δίκτυο αποχέτευσης, το 2000 και δευτεροβάθμια επεξεργασία

(1) Η προθεσμία νοείται ως η τελευταία μέρα του αναγραφόμενου έτους

(2) Υδάτινη μάζα που δεν έχει χαρακτηριστεί ως ευαίσθητη ή λιγότερο ευαίσθητη περιοχή

(3) Κατάλληλη επεξεργασία σε περίπτωση απόρριψης σε ύδατα ακτών

Για όλες τις απορρίψεις στο φυσικό περιβάλλον λυμάτων από σταθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων, θα πρέπει να έχει καθορισθεί από τον οικείο Νομάρχη οι χρήσεις του υδάτινου αποδέκτη σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις της ΚΥΑ Ε1β/221/1965 και να διαθέτει ο υπεύθυνος φορέας του σταθμού επεξεργασίας την προβλεπόμενη για την ίδρυση και λειτουργία του έγκριση περιβαλλοντικών όρων κατ' εφαρμογή του άρθρου του άρθρου 1 του Ν. 3010/2002. Η έγκριση αυτή χορηγείται ως δραστηριότητα Α' κατηγορίας σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις της Η.Π.: 15393/2332. Στη συνέχεια πρέπει να έχει χορηγηθεί άδεια διάθεσης ή επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων από τον οικείο Νομάρχη μετά από κοινή εισήγηση των αρμόδιων υπηρεσιών περιβάλλοντος και υγιεινής του νομού.

Τα λύματα των βιομηχανικών κλάδων που υπάγονται στην κείμενη απόφαση, εφόσον δεν διοχετεύονται στα αποχετευτικά δίκτυα αστικών λυμάτων, πρέπει να πληρούν πριν απορριφθούν σε υδάτινους αποδέκτες τους καθορισμένους όρους και απαιτήσεις που προβλέπονται στην άδεια του οικείου Νομάρχη μετά από κοινή εισήγηση των αρμόδιων υπηρεσιών περιβάλλοντος και υγιεινής και γνώμη του οικείου ΟΤΑ στην περιοχή του οποίων βρίσκεται ο υδάτινος αποδέκτης και της ΤΥΔΚ του

νομού. Προηγουμένως, θα πρέπει να έχουν καθορισθεί από τον οικείο Νομάρχη οι χρήσεις του υδάτινου αποδέκτη, σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις της ΚΥΑ Ε1β/221/1965 και να έχει λάβει ο ενδιαφερόμενος την προβλεπόμενη στο άρθρο 4 του Ν. 1650/86 έγκριση περιβαλλοντικών όρων. Η υποχρέωση ισχύει για όλες τις εγκαταστάσεις 4.000 ι.π. και άνω.

Στην περίπτωση που τα βιομηχανικά λύματα, πρόκειται να διοχετευτούν σε αποχετευτικά δίκτυα και σε σταθμούς επεξεργασίας, θα πρέπει να υποβληθούν σε κατάλληλη προκαταρκτική επεξεργασία. Η σχετική μελέτη προκαταρκτικής επεξεργασίας αποτελεί προϋπόθεση για την άδεια ή πιστοποιητικό σύνδεσης από τον οικείο φορέα του δικτύου ύδρευσης-αποχέτευσης.

Για τη διάθεση ή την επαναχρησιμοποίηση της ιλύος των σταθμών επεξεργασίας αστικών λυμάτων, απαιτείται ο σταθμός επεξεργασίας να διαθέτει την προβλεπόμενη έγκριση περιβαλλοντικών όρων κατ' εφαρμογή του άρθρου 1 του Ν. 3010/2002, καθώς και σχετική άδεια του οικείου Νομάρχη. Οι όροι και απαιτήσεις αποσκοπούν στην οριστική παύση της διάθεσης στα επιφανειακά νερά στις 31 Δεκεμβρίου 1998.

Η απόρριψη αστικών λυμάτων και των επιδράσεών της πρέπει να παρακολουθείται μέσω τακτικών και έκτακτων ελέγχων, οι οποίοι θα διενεργούνται από τις αρμόδιες νομαρχιακές υπηρεσίες περιβάλλοντος και υγιεινής και τις αρμόδιες περιφερειακές υπηρεσίες των υπουργείων ΠΕΧΩΔΕ και Υγείας - Πρόνοιας. Στους ελέγχους τήρησης των περιβαλλοντικών όρων είναι δυνατό να συμμετέχει και εκπρόσωπος του οικείου ΟΤΑ στην περιοχή του οποίου βρίσκονται τα νερά της υποδοχής.

Τα αποχετευτικά δίκτυα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις της επεξεργασίας των λυμάτων. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η συντήρηση των αποχετευτικών δικτύων πρέπει να διενεργούνται σύμφωνα με τις τεχνικές γνώσεις που δεν συνεπάγονται υπερβολικό κόστος, ιδίως όσον αφορά:

- τον όγκο και τα χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων
- την πρόληψη διαρροών
- τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτινων αποδεκτών λόγω υπερχειλίσεων από νεροποντές

Στις περιπτώσεις που δεν δικαιολογείται η εγκατάσταση αποχετευτικών δικτύων, είτε διότι δεν είναι επωφελής για το περιβάλλον είτε λόγω υπερβολικού κόστους, πρέπει να χρησιμοποιούνται μεμονωμένα σύστημα ή άλλα συστήματα που επιτυγχάνουν το ίδιο επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος.

Ο σχεδιασμός ή η μετασκευή των σταθμών επεξεργασίας αστικών λυμάτων γίνεται έτσι ώστε να μπορούν να λαμβάνονται αντιπροσωπευτικά δείγματα των εισερχόμενων και των επεξεργασμένων λυμάτων προτού απορριφθούν στον υδάτινο αποδέκτη. Στον πίνακα 2.3 δίνονται οι οριακές τιμές συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης του φορτίου των αστικών λυμάτων πριν τη διάθεσή τους στον υδάτινο αποδέκτη. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της κείμενης απόφασης ως προς τον ισοδύναμο πληθυσμό και του χαρακτηρισμού του υδάτινου αποδέκτη, η επεξεργασία μπορεί να είναι πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια έως και τριτοβάθμια. Όπου πρέπει να διασφαλίζεται ότι οι υδάτινοι αποδέκτες ανταποκρίνονται σε τυχόν άλλες σχετικές οδηγίες, ισχύουν αυστηρότερες απαιτήσεις.

Στην περίπτωση που τα αστικά λύματα απορρίπτονται σε ύδατα ορεινών περιοχών (υψομέτρου άνω των 1500 μέτρων), όπου, λόγω χαμηλών θερμοκρασιών, η βιολογική επεξεργασία είναι δυσεφάρμοστη, μπορούν να υποβάλλονται σε λιγότερο αυστηρή επεξεργασία από τις απαιτήσεις για δευτερογενή, εφόσον λεπτομερείς μελέτες αποδεικνύουν ότι οι εν λόγω απορρίψεις δεν επηρεάζουν δυσμενώς το περιβάλλον.

Πίνακας 2-4: Απαιτήσεις για απορρίψεις αστικών λυμάτων από σταθμούς επεξεργασίας κατά τύπο επεξεργασία

Παράμετρος	Συγκέντρωση	Ελάχιστη εκατοστιαία μείωση (1)
ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ		
BAO ₅	-	20
Ολικά αιωρούμενα στερεά	-	50
ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ		
BAO ₅ στους 20 °C χωρίς νιτροποίηση (2)	25 mg/L O ₂	70-90 40 για ύδατα ορεινών περιοχών
ΧΑΟ	125 mg/L O ₂	75
Ολικά αιωρούμενα στερεά	35 mg/L(3) 35 για ύδατα ορεινών περιοχών (>10.000 ι.π.) 60 για ύδατα ορεινών περιοχών (2000-10.000 ι.π.)	90 (3) 90 για ύδατα ορεινών περιοχών (>10.000 ι.π.) 70 για ύδατα ορεινών περιοχών (2000-10.000 ι.π.)
ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (4)		
Ολικό P	2 mg/L P (10.000-100.000 ι.π.) 1 mg/LP (> 100.000 ι.π.)	80
Ολικό N (5)	15 mg/L N (10.000-100.000 ι.π.) (6) 10 mg/L N (> 100.000 ι.π.) (6)	70-80

(1) Μείωση ανάλογα με το φορτίο των εισρεόντων λυμάτων

(2) Η παράμετρος αυτή μπορεί να αντικατασταθεί με άλλη: ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) ή ολικές ανάγκες σε οξυγόνο (TOD) αν μπορεί να ευρεθεί σχέση μεταξύ του BAO₅ και της υποκατάστατης παραμέτρου

(3) Η απαίτηση αυτή είναι προαιρετική

(4) Αναλόγως των τοπικών συνθηκών, μπορεί να εφαρμόζεται η μία ή και οι δύο παράμετροι

(5) Ολικό άζωτο σημαίνει το άθροισμα του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (οργανικό άζωτο και NH₃), του αζώτου των νιτρικών ιόντων (NO₃) και του αζώτου των νιτρωδών ιόντων (NO₂)

(6) Οι ως άνω τιμές συγκέντρωσης αποτελούν ετήσιο μέσο όρο. Ωστόσο, οι απαιτήσεις για το άζωτο μπορούν να επαληθευθούν χρησιμοποιώντας τον ημερήσιο μέσο όρο, όταν έχει αποδειχθεί ότι επιτυγχάνεται το ίδιο επίπεδο προστασίας. Στην περίπτωση αυτή, ο ημερήσιος μέσος όρος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 mg/L ολικού αζώτου για όλα τα δείγματα, όταν η θερμοκρασία των λυμάτων στον βιοαντιδραστήρα είναι ≥ 12 °C. Αντί για την προϋπόθεση της θερμοκρασίας, μπορεί να εφαρμοστεί ένας περιορισμένος χρόνος λειτουργίας ανάλογος με τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες.

2.4. Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 «Καθορισμός μέτρων, όρων & διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις».

Ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 θεσπίζει ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας, παρακολούθησης και διαχείρισης κινδύνου για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων για γεωργική άρδευση. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή της παρούσας εργασίας, δηλαδή την άρδευση χώρου πρασίνου σε ΣΕΑ, θα πρέπει να διευκρινιστεί ποιο εθνικό κανονιστικό και αδειοδοτικό πλαίσιο εφαρμόζεται, καθώς ο Κανονισμός 2020/741 έχει ειδικό πεδίο εφαρμογής τη γεωργική άρδευση.

Ο κανονισμός δίνει τη δυνατότητα στις χώρες της Ένωσης να αποφασίζουν για την ακαταλληλότητα της επαναχρησιμοποίησης των υδάτων για αρδευτικούς σκοπούς σε λεκάνες απορροής ή τμήματα αυτών όταν οι κλιματικές και γεωγραφικές συνθήκες, το συνολικό κόστος και οι συνθήκες στα υδάτινα στρώματα και πόροι που πιέζονται από την απόρριψη των επεξεργασμένων λυμάτων δεν το επιτρέπουν. Ασφαλώς οι αποφάσεις αυτές θα πρέπει να αιτιολογούνται απολύτως τεκμηριωμένα. Επίσης παρέχονται χρονικές εξαιρέσεις από τους κανόνες συμμετοχής σε προγράμματα.

Τονίζεται πως ο υπεύθυνος φορέας για τη λειτουργία της εγκατάστασης θα πρέπει να φροντίσει για την ποιότητα του νερού συμπεριλαμβάνοντας και τους μικροβιολογικούς παράγοντες ή κάποια άλλα ποιοτικά στοιχεία που θέτονται από την αρμόδια αρχή που εκδίδει την άδεια. Η αρμόδια αρχή επίσης είναι υπεύθυνη για την παροχή, παραγωγή, επαναχρησιμοποίηση του νερού και την κατάρτιση του σχεδίου διαχείρισης κινδύνου για την επαναχρησιμοποίηση. Το σχέδιο διαχείρισης κινδύνου προσδιορίζει τις αρμοδιότητες της διαχείρισης κινδύνου σε όλα τα μέρη από το έργο και εκπονείται από το φορέα λειτουργίας της εγκατάστασης ανάκτησης. Για την παραγωγή του νερού που ανακτάται απαιτείται άδεια που προσδιορίζει την κατηγορία του ανακτημένου νερού και το είδος της γεωργικής χρήσης που επιτρέπεται, την εγκατάσταση και τον ετήσιο όγκο του ανακτημένου νερού. Οι όροι των απαιτήσεων του φορέα λειτουργίας που προκύπτουν από το σχέδιο διαχείρισης κινδύνου και επίσης οι όροι σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ποιότητα του ανακτημένου ύδατος. Ακόμη τονίζεται στην άδεια κάθε άλλος όρος που θα πρέπει να τηρείται για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, της χλωρίδας, της πανίδας και του περιβάλλοντος.

Οι άδειες έχουν ισχύ για ορισμένη περίοδο και τέλος αναγράφουν το σημείο συμμόρφωσης.

Οι έλεγχοι συμμόρφωσης πραγματοποιούνται από την αρμόδια εθνική αρχή με επί τόπου ελέγχους, με δεδομένα παρακολούθησης και με άλλα μέσα εφόσον απαιτείται. Αναφέρονται ξεκάθαρα οι ποινές μη συμμόρφωσης στους κανονισμούς αλλά και τονίζεται η αναγκαιότητα του ελέγχου από τις εθνικές αρχές στα σχέδια διαχείρισης κινδύνου. Τονίζεται επίσης στον κανονισμό η σημαντικότητα της διαφάνειας και για το λόγο αυτό οι πληροφορίες σχετικά με την παρακολούθηση της εφαρμογής παρέχονται στο κοινό. Ο κανονισμός βρίσκεται σε ισχύ από τις 26 Ιουνίου 2023.

2.5 ΚΥΑ οικ. 145116/2011 (ΦΕΚ 354-B-2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων & διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις».

Ο σκοπός της παρούσας απόφασης είναι:

α) η προώθηση της αξιοποίησης των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και η μέσω αυτής εξοικονόμηση υδατικών πόρων, η οποία θα συμβάλλει σημαντικά στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων από:

i) την προϊούσα λειψυδρία και ξηρασία στην περιοχή της Μεσογείου, καθώς και την αναμενόμενη επιδείνωση του προβλήματος λόγω της κλιματικής αλλαγής,

ii) την έντονη ταπείνωση ή/και υφαλμύριση των υπόγειων υδροφορέων ορισμένων περιοχών της χώρας από την υπεράντληση, την προϊούσα λειψυδρία και την είσοδο του θαλάσσιου μετώπου σε παραλιακές περιοχές,

β) η βελτίωση του υδατικού ισοζυγίου μέσω της τροφοδότησης των υπογείων υδροφορέων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων είναι η διασφάλιση της Δημόσιας Υγείας

Η παρούσα απόφαση εφαρμόζεται:

α) Στην προγραμματισμένη επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, όπως ορίζονται στην παράγραφο 1(β) του άρθρου 2, αυτής. Η προγραμματισμένη επαναχρησιμοποίηση επιτρέπεται για γεωργική χρήση (άρδευση),

για την τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων, για αστική και περιαστική χρήση, για βιομηχανική χρήση και για τα υδατικά συστήματα του άρθρου 7 του Π.Δ. 51/2007, σύμφωνα με τους ειδικότερους όρους που προβλέπονται κατά περίπτωση στα άρθρα 4, 5, 6, 7 και 8 της παρούσας απόφασης.

β) Στην επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων βιομηχανικών υγρών αποβλήτων που προέρχονται από άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες, ασχέτως μεγέθους βιομηχανικής εγκατάστασης, εκτός αυτών που υπάγονται στο πεδίο εφαρμογής της υπ. αριθ. 5673/400/1997 ΚΥΑ, τα οποία είναι μη επικίνδυνα απόβλητα ή έχουν καταστεί μη επικίνδυνα μετά από επεξεργασία σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις της κείμενης νομοθεσίας για τη διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων. Και στις δύο ως άνω περιπτώσεις η επαναχρησιμοποίηση επιτρέπεται μόνον για βιομηχανική χρήση, για περιορισμένη άρδευση μέσω υπεδάφιου συστήματος άρδευσης και τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων που δεν εμπίπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2007 και μόνο μέσω διήθησης απαγορευόμενων των γεωτρήσεων, με τους όρους που τίθενται για τους συγκεκριμένους τύπους επαναχρησιμοποίησης με την παρούσα απόφαση.

2. Δεν υπάγονται στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας απόφασης: α) η ανακύκλωση βιομηχανικών αποβλήτων, β) η άμεση ή έμμεση επαναχρησιμοποίηση για πόση, με εξαίρεση τις περιπτώσεις που αναφέρονται στο άρθρο 8, γ) η επαναχρησιμοποίηση για χρήσεις κολύμβησης (πισίνες) και δ) άλλες οικιακές χρήσεις.

3. Η παρούσα απόφαση δεν εφαρμόζεται για διάθεση σε υδάτινους αποδέκτες.

4. Η παρούσα απόφαση εφαρμόζεται με την επιφύλαξη της υπ. αριθ.39626/2208/2009 ΚΥΑ (Β'2075), εφόσον δεν έρχεται σε αντίθεση με τις διατάξεις της.

Επαναχρησιμοποίηση για Άρδευση:

1. Για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για άρδευση, διακρίνουμε δύο τύπους άρδευσης με βάση το είδος των καλλιεργειών, το σύστημα άρδευσης και την προσβασιμότητα του κοινού στην αρδευόμενη περιοχή:

α. Την άρδευση με περιορισμούς (περιορισμένη), η οποία αφορά μόνο σε καλλιέργειες που τα προϊόντα τους καταναλώνονται μετά από θερμική ή άλλη επεξεργασία ή δεν προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση ή δεν έρχονται σε άμεση

επαφή με το έδαφος, όπως καλλιέργειες ζωοτροφών, βιομηχανικές καλλιέργειες, λιβάδια, δέντρα (μη συμπεριλαμβανομένων των οπωροφόρων), με την προϋπόθεση ότι κατά τη συλλογή οι καρποί δεν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, καλλιέργειες σπόρων. Ως προς το σύστημα της άρδευσης, δεν επιτρέπεται η μέθοδος του καταιονισμού. Η πρόσβαση του κοινού στην αρδευόμενη έκταση δεν επιτρέπεται. Σε περίπτωση που υπάρχει προσβασιμότητα σε ανθρώπους ή ζώα, εκτός των χρηστών, πρέπει να λαμβάνονται κατά περίπτωση πρόσθετα μέτρα, όπως περίφραξη, ορισμός απαγορευτικής ζώνης για ορισμένες χρήσεις από τα όρια της αρδευόμενης έκτασης, απαγόρευση βοσκής ζώων για ορισμένο χρόνο μετά την άρδευση.

β. Η άρδευση χωρίς περιορισμούς (απεριόριστη), η οποία μεταξύ άλλων, αφορά σε όλα τα άλλα είδη καλλιεργειών όπως λαχανικά, αμπέλια ή καλλιέργειες των οποίων τα προϊόντα καταναλώνονται ωμά, ανθοκομικά. Κατά την απεριόριστη άρδευση επιτρέπονται διάφορες μέθοδοι χρήσης του ανακτημένου νερού, συμπεριλαμβανομένου του καταιονισμού και δεν απαιτούνται περιορισμοί στην πρόσβαση.

2. Για την περιορισμένη ή απεριόριστη άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα απαιτείται η εκπόνηση μελέτης σχεδιασμού και εφαρμογής του συστήματος της άρδευσης ανάλογα με το συγκεκριμένο είδος της καλλιέργειας και τη συγκεκριμένη περιοχή. Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει:

α) το υδατικό ισοζύγιο, σε συνάρτηση και με τις αρδευόμενες καλλιέργειες και το ισοζύγιο οργανικού φορτίου και θρεπτικών καθώς και κρίσιμων ιχνοστοιχείων, προκειμένου να προσδιορισθεί η ανά μονάδα αρδευόμενης επιφάνειας επιτρεπόμενη φόρτιση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα,

β) τον υπολογισμό της συνολικά απαιτούμενης εδαφικής έκτασης,

γ) τα προγράμματα παρακολούθησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών των επαναχρησιμοποιούμενων υγρών αποβλήτων και κατά περίπτωση, τα απαιτούμενα προγράμματα παρακολούθησης των χαρακτηριστικών του εδάφους και των αρδευόμενων καλλιεργειών,

δ) τα τυχόν απαιτούμενα πρόσθετα μέτρα και όρια για την συγκεκριμένη εφαρμογή (ενδεχόμενη περίφραξη της αρδευόμενης έκτασης, τρόπος άρδευσης, κλπ), καθώς και

ε) τα απαιτούμενα μέτρα ενημέρωσης και προστασίας για τους χρήστες και τους καταναλωτές, που πρέπει να λαμβάνονται, με ευθύνη του φορέα υλοποίησης της άρδευσης, ο οποίος μπορεί να είναι ο φορέας διαχείρισης ή ο άμεσος χρήστης του ανακτημένου νερού. Μεταξύ των μέτρων αυτών μπορεί να υιοθετούνται αυτόματα ή ημιαυτόματα αρδευτικά συστήματα για ελαχιστοποίηση της επαφής των χειριστών με τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα,

στ) τον προσδιορισμό των τυχόν ελάχιστων απαιτούμενων αποστάσεων της συγκεκριμένης εφαρμογής από υφιστάμενες ή μελλοντικές υδροληψίες ή άλλες χρήσεις.

3. Μολονότι κατά την επιφανειακή ή υπεδάφια άρδευση μέρος των υγρών αποβλήτων μπορεί να καταλήγει στον υπόγειο υδροφόρα, η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων εξετάζεται στο πλαίσιο εφαρμογής του παρόντος άρθρου, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της άρδευσης και στο βαθμό που τεκμηριώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος των επαναχρησιμοποιούμενων υγρών αποβλήτων προσλαμβάνεται από τα φυτά ή εξατμίζεται.

4. Στις περιπτώσεις επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για άρδευση ή αστική ή περιαστική χρήση και εφόσον, σύμφωνα με τη σχετική μελέτη, οι ποσότητες των διατιθέμενων αποβλήτων πλεονάζουν των απαιτήσεων των φυτών και κατεισδύουν προς τον υπόγειο υδροφόρα, έστω και για ορισμένη εποχή του έτους (χειμώνας), η επαναχρησιμοποίηση εμπίπτει και στις προβλέψεις του άρθρου 5 και 8 για τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων.

5. Στους Πίνακες 1 και 2 του Παραρτήματος Ι, στον Πίνακα 4 του Παραρτήματος ΙΙ, στον Πίνακα 5 του Παραρτήματος ΙΙΙ και στον Πίνακα 6 του Παραρτήματος ΙV παρατίθενται τα επιτρεπόμενα όρια για τις μικροβιολογικές, τις συμβατικές και άλλες χημικές παραμέτρους και τα επιθυμητά αγρονομικά χαρακτηριστικά, καθώς και η εκάστοτε κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία, το είδος και η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων, στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για περιορισμένη και απεριόριστη άρδευση.

6. Για το περιεχόμενο της μελέτης σχεδιασμού και εφαρμογής του συστήματος της άρδευσης γνωμοδοτούν η Διεύθυνση Υδάτων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης και

τις Αρμόδιες Διευθύνσεις Υγείας και Αγροτικής Οικονομίας και Περιφέρειας, στο πλαίσιο της διαδικασίας έκδοσης της άδειας επαναχρησιμοποίησης που προβλέπεται στο άρθρο 9.

2.6 ΚΥΑ 191002/2013 όπως τροποποιεί μερικώς την ΚΥΑ 145116.

Η ΚΥΑ 191002/2013 τροποποιεί την ΚΥΑ 145116 σε ορισμένα σημεία. Τα κυριότερα από αυτά περιγράφονται παρακάτω. Ορίζεται πως τα επεξεργασμένα βιομηχανικά απόβλητα ασχέτως μεγέθους εγκατάστασης της βιομηχανίας θα επαναχρησιμοποιούνται μόνο για βιομηχανική χρήση, για τροφοδότηση των υπόγειων υδροφορέων και για περιορισμένη άρδευση μόνο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, και εφόσον δεν εμπίπτουν σε συγκεκριμένες διατάξεις. Η μελέτη και εφαρμογή του συστήματος άρδευσης αποστέλλεται για έλεγχο και έγκριση στη διεύθυνση Αγροτικής Οικονομίας, τις υπηρεσίες Περιβαλλοντικής Υγιεινής και τα αρμόδια τμήματα της εκάστοτε Περιφερειακής Ενότητας. Αν η χρήση είναι εμπλουτισμός μεταβάλλονται οι Υπηρεσίες που οφείλουν να γνωμοδοτήσουν που είναι τα τμήματα Περιβάλλοντος και Υδροκομίας ή κατά περίπτωση οι Υπηρεσίες Περιβαλλοντικής Υγιεινής ή/και Αγροτικής οικονομίας των Περιφερειών. Σε περίπτωση που γίνεται ανάκτηση υγρών αποβλήτων μέσα σε μια βιομηχανία απαγορεύεται η επαναχρησιμοποίηση μέσα στη βιομηχανία αν τα προϊόντα της προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση. Σε κάποια υπόγεια συστήματα που υπάγονται σε προστατευμένες περιοχές επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων, έπειτα όμως από υδρογεωλογική μελέτη.

Όταν ο πάροχος των ανακτημένων υγρών αποβλήτων είναι ο τελικός χρήστης τότε η άδεια επαναχρησιμοποίησης αντικαθίσταται από την Απόφαση έγκρισης Όρων (ΑΕΠΟ) ή τις Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις (ΠΠΔ) ανάλογα με την κατηγορία του έργου. Σε ορισμένες περιπτώσεις εγκαταστάσεων μέχρι 50 ΜΠΠ δεν απαιτείται άδεια επαναχρησιμοποίησης για περιορισμένη άρδευση μέσω υπεδάφιου συστήματος και εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων μόνο μέσω διήθησης. Πριν και κατά την αδειοδότηση της εγκατάστασης επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων οι αρμόδιες υπηρεσίες διενεργούν ελέγχους. Η άδεια επαναχρησιμοποίησης εκδίδεται σε 15 ημέρες. Η συγκεκριμένη υπουργική απόφαση τίθεται σε ισχύ από τις 31 Δεκεμβρίου του 2014.

3. Βιοαντιδραστήρες με μεμβράνη

3.1 Γενικά

Η προηγμένη επεξεργασία υγρών αποβλήτων καθίσταται εφικτή μέσω της τεχνολογίας των βιοαντιδραστήρων μεμβράνης (Membrane Bioreactors – MBR), η οποία συνδυάζει τις διεργασίες βιολογικής επεξεργασίας με τη διήθηση μέσω μεμβρανών (Dominic & Baidurah, 2022). Η τεχνολογία αυτή ενσωματώνει συστήματα μεμβρανικού διαχωρισμού με βιολογικές διεργασίες, όπως η ενεργός ιλύς ή οι διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας, προσφέροντας αυξημένη αποδοτικότητα στην επεξεργασία λυμάτων (Hameed et al., 2022).

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα MBR είναι συνήθως κατασκευασμένες από πολυμερή υλικά και διαθέτουν πορώδη δομή, η οποία επιτρέπει την αποτελεσματική συγκράτηση αιωρούμενων στερεών, βακτηρίων και μικροσωματιδίων, αποτρέποντας τη μεταφορά τους στην εκροή του συστήματος (Sajjad et al., 2018). Ως φυσικός φραγμός, οι μεμβράνες επιτρέπουν τη διέλευση μόνο του επεξεργασμένου νερού, ενώ ταυτόχρονα παγιδεύουν ανεπιθύμητους ρύπους, μικροοργανισμούς και σωματιδιακό υλικό. Η συνέργεια μεταξύ της βιολογικής αποδόμησης και της διεργασίας διήθησης συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας της εκροής και στη συνολική αποδοτικότητα της επεξεργασίας (Dominic & Baidurah, 2022).

Στην Εικόνα 3-1 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα στοιχείο μεμβράνης που χρησιμοποιείται σε συστήματα βιοαντιδραστήρων μεμβράνης. Αυτού του τύπου βιοαντιδραστήρες εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο ως εναλλακτική τεχνολογία έναντι των συμβατικών μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, καθώς προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση απομάκρυνσης ρύπων, περιορισμένες απαιτήσεις χώρου εγκατάστασης και παραγωγή εκροής υψηλής ποιότητας (Das et al., 2022).



Εικόνα 3-1 Στοιχείο Μembrάνης

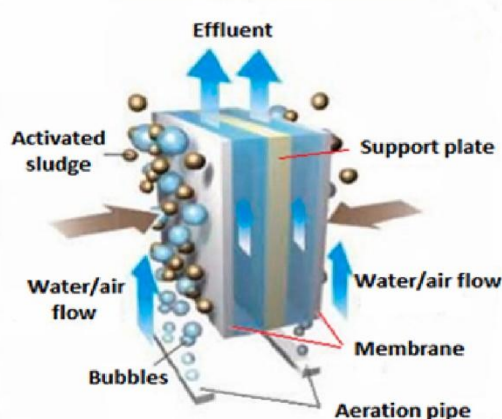
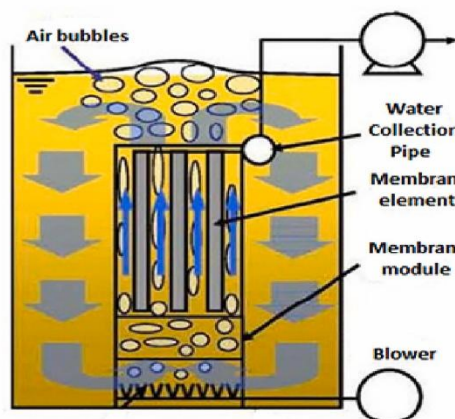
<https://www.m-chemical.co.jp/sterapore/en/sewage.html>

3.2 Αρχές βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.

Η τεχνολογία των βιοαντιδραστήρων μεμβράνης (Membrane Bioreactors – MBR) αποτελεί μία ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδο επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, συνδυάζοντας βιολογικές διεργασίες με διεργασίες διαχωρισμού μέσω μεμβρανών. Η εφαρμογή της συνιστά μια βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς επιτυγχάνει υψηλά επίπεδα απομάκρυνσης οργανικών και ανόργανων ρύπων.

Στα συστήματα MBR, η μεμβράνη λειτουργεί ως φράγμα διαχωρισμού μεταξύ της βιομάζας και της εκροής, επιτρέποντας τη συγκράτηση των μικροοργανισμών και των βιοαποδομήσιμων ουσιών εντός του αντιδραστήρα. Η ποιότητα της εκροής εξαρτάται τόσο από τη βιολογική διεργασία όσο και από τα χαρακτηριστικά της μεμβράνης και τις συνθήκες λειτουργίας της. Επομένως, η υψηλή ποιότητα εκροής δεν πρέπει να αποδίδεται αποκλειστικά στη διήθηση μέσω της μεμβράνης (Khan et al., 2024).

Σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος, τα συστήματα MBR μπορούν να πετύχουν χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στην εκροή και υψηλή συγκέντρωση μικροοργανισμών. Ωστόσο, η απομάκρυνση διαλυμένων ρύπων και θρεπτικών εξαρτάται κυρίως από τις βιολογικές διεργασίες και τη διαμόρφωση της μονάδας (Xue et al., 2020). Μία τυπική διάταξη βιοαντιδραστήρα μεμβράνης μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 3-2.



Εικόνα 3-2: Τυπική διάταξη βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.

<https://www.enrosun.com/products/membrane-bioreactor.html>

Η εφαρμογή των MBR επεκτείνεται και στην επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων, συμβάλλοντας στην προστασία των υδάτινων πόρων και στην προώθηση πρακτικών επαναχρησιμοποίησης νερού. Ερευνητικά δεδομένα έχουν δείξει ότι τα συστήματα αυτά μπορούν να επιτύχουν σημαντική απομάκρυνση αναδυόμενων ρύπων και φαρμακευτικών ενώσεων (Liu et al., 2021).

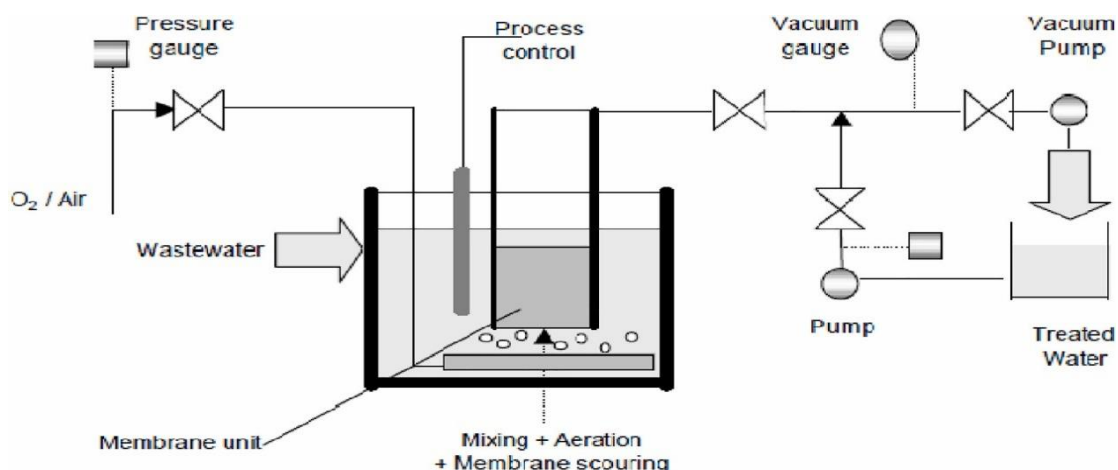
Η απόδοση ενός συστήματος MBR επηρεάζεται από κρίσιμες λειτουργικές παραμέτρους, όπως ο εγκλιματισμός της βιομάζας, η διατήρηση της μικροβιακής δραστηριότητας και η ανάπτυξη κατάλληλης ενεργού ιλύος (Chan et al., 2010). Παράλληλα, η τεχνολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και για εφαρμογές παραγωγής βιοϋδρογόνου, εξαιτίας των χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων και της συγκριτικά υψηλής οικονομικής αποδοτικότητας που προσφέρει έναντι άλλων τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου (El-Qelish et al., 2022). Ωστόσο, η αποδοτικότητα της διεργασίας επηρεάζεται από λειτουργικές μεταβλητές, όπως η παροχή αερίου, το pH και οι συνθήκες ανάδευσης (Rezk et al., 2023).

Συνολικά, οι βιοαντιδραστήρες μεμβράνης αποτελούν μία καινοτόμο και αποτελεσματική τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων, συνδυάζοντας υψηλή ποιότητα εκροής, αποτελεσματική απομάκρυνση ρύπων και δυνατότητα βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων.

3.3 Τύποι βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.

Οι βιοαντιδραστήρες μεμβράνης ταξινομούνται κυρίως σε βυθισμένα και εξωτερικά συστήματα, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης των μονάδων μεμβρανών σε σχέση με τον βιολογικό αντιδραστήρα, όπως μπορούμε να δούμε στα Σχήματα 3-1 και 3-2.

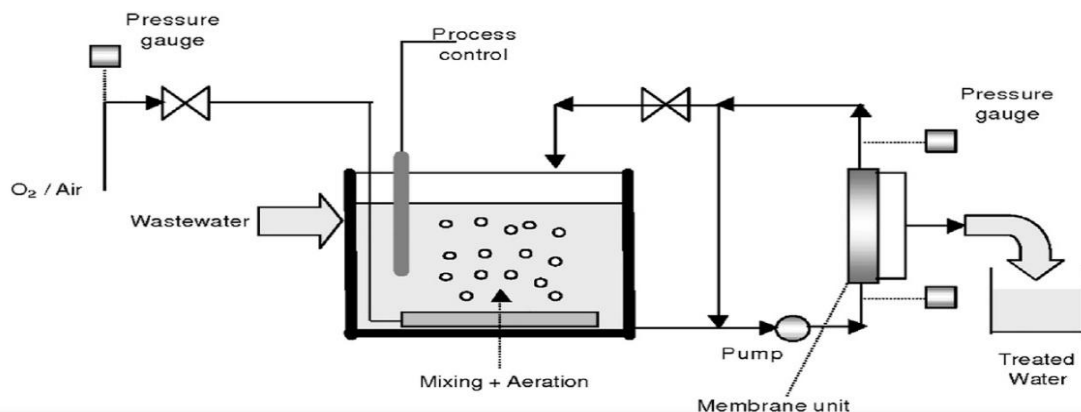
Οι βυθισμένοι βιοαντιδραστήρες μεμβράνης (Submerged Membrane Bioreactors – SMBR) διαθέτουν μονάδες μεμβρανών που βρίσκονται απευθείας μέσα στο ανάμεικτο υγρό του αντιδραστήρα. Στα συστήματα αυτά, ο διαχωρισμός στερεής και υγρής φάσης πραγματοποιείται μέσω κοίλων ινών ή επίπεδων φύλλων μεμβράνης, επιτυγχάνοντας αποτελεσματική συγκράτηση της βιομάζας (Chimuca et al., 2023). Η λειτουργία υπό συνθήκες αναρρόφησης συμβάλλει στη διατήρηση υψηλής διαπερατότητας και στον περιορισμό του φαινομένου της ρύπανσης των μεμβρανών. Τα συστήματα SMBR χαρακτηρίζονται από περιορισμένες απαιτήσεις χώρου, υψηλή απόδοση επεξεργασίας και δυνατότητα λειτουργίας σε αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών.



Σχήμα 3-1: Σχηματικό διάγραμμα του βυθισμένου βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.
(Mohamed & Abdelkader, 2007)

Αντίθετα, στους εξωτερικούς βιοαντιδραστήρες μεμβράνης (External Membrane Bioreactors – EMBR), η μονάδα μεμβρανών τοποθετείται εκτός του βιολογικού αντιδραστήρα. Η διάταξη αυτή επιτρέπει ευκολότερη πρόσβαση για συντήρηση και καθαρισμό των μεμβρανών, μειώνοντας παράλληλα την πιθανότητα

εμφάνισης εκτεταμένης ρύπανσης. Τα EMBR παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα στην επεξεργασία αποβλήτων με αυξημένο οργανικό φορτίο και μπορούν να εφαρμοστούν σε εγκαταστάσεις με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο (Yadav et al., 2023).



Σχήμα 3-2: Σχηματικό διάγραμμα του βιοαντιδραστήρα εξωτερικής μεμβράνης. (Mohamed & Abdelkader, 2007)

Μια επιπλέον διαμόρφωση αποτελεί ο βιοαντιδραστήρας πλευρικού βρόχου (Side Stream Membrane Bioreactor – SSMBR), όπου τμήμα του ανάμεικτου υγρού οδηγείται μέσω εξωτερικού κυκλώματος στη μονάδα μεμβρανών. Η συνεχής κυκλοφορία του υγρού αυξάνει τη διατμητική τάση στην επιφάνεια των μεμβρανών, περιορίζοντας τη συσσώρευση ρύπων και βελτιώνοντας τη λειτουργική απόδοση του συστήματος.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου MBR εξαρτάται από παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά των προς επεξεργασία λυμάτων, οι απαιτήσεις ποιότητας της εκροής, οι διαθέσιμοι χώροι εγκατάστασης και οι λειτουργικές απαιτήσεις της μονάδας (Yadav et al., 2023).

3.4 Πλεονεκτήματα του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης

Η τεχνολογία των βιοαντιδραστήρων μεμβράνης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, γεγονός που έχει οδηγήσει στη συνεχή διεύρυνση των εφαρμογών της.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αποτελεί η παραγωγή εκροής υψηλής ποιότητας, καθώς οι μεμβράνες λειτουργούν ως αποτελεσματικό φυσικό φράγμα συγκρατώντας αιωρούμενα στερεά, παθογόνους μικροοργανισμούς, βακτήρια

και ιούς. Ως αποτέλεσμα, τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης νερού.

Παράλληλα, τα συστήματα MBR χαρακτηρίζονται από μειωμένη παραγωγή περίσσειας ιλύος, υψηλή συγκέντρωση βιομάζας στον αντιδραστήρα και μικρές απαιτήσεις εγκατάστασης σε διαθέσιμη επιφάνεια. Επιπλέον, η δυνατότητα λειτουργίας σε αυξημένους χρόνους παραμονής στερεών συμβάλλει στη βελτίωση της απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η τεχνολογία παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς, κυρίως λόγω της τάσης εμφάνισης ρύπανσης των μεμβρανών, της ανάγκης προεπεξεργασίας των εισερχόμενων λυμάτων και των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων που συνδέονται με τον αερισμό και τον καθαρισμό των μεμβρανών (Deng et al., 2020).

Σε υγρά απόβλητα ζυθοποιίας, η τεχνολογία προσφέρει υψηλή ποιότητα εκροής, μειωμένες απαιτήσεις χώρου εγκατάστασης, χαμηλή παραγωγή υπολειμματικής ιλύος και δυνατότητα εύκολου αυτοματοποιημένου ελέγχου. Παράλληλα, η μεταβλητότητα των οργανικών ενώσεων αυξάνει την πιθανότητα ρύπανσης των μεμβρανών, ενώ η χρήση υπερηχητικών μορφοτροπέων για τον περιορισμό της ρύπανσης συνεπάγεται υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις (Du et al., 2020).

Στα βιομηχανικά υγρά απόβλητα, η τεχνολογία χαρακτηρίζεται από μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα, χαμηλή παραγωγή ιλύος και παραγωγή υποβαθμισμένης ιλύος υψηλότερης ποιότητας. Παρόλα αυτά, η απόδοση του συστήματος εξαρτάται σημαντικά από τα στάδια προεπεξεργασίας, ενώ απαιτείται και προ-φιλτράρισμα με άμμο για τη διατήρηση χαμηλών συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών (Alharthi et al., 2023)

Στην επεξεργασία αστικών ή βιομηχανικών λυμάτων, τα συστήματα MBR επιτυγχάνουν παραγωγή εκροής υψηλής ποιότητας με χαμηλή παραγωγή ιλύος και μικρό απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης. Ωστόσο, παρατηρείται αργή συσσώρευση διαμεμβρανικής πίεσης, περιορισμένη λειτουργική ευελιξία και ανάγκη συνεχούς βελτιστοποίησης για την αντιμετώπιση της συσσώρευσης ιλύος (Zuo et al., 2022).

Για τα φαρμακευτικά λύματα, η τεχνολογία των βιοαντιδραστήρων μεμβράνης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως υψηλότερη ποιότητα εκροής, μεγαλύτερη δυνατότητα οργανικής φόρτισης, μικρότερο αποτύπωμα εγκατάστασης και μειωμένη παραγωγή ιλύος συγκριτικά με τις συμβατικές διεργασίες. Ωστόσο, η απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών δεν είναι σταθερή υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, ενώ οι αντιβιορυκτολογικές νανοσύνθετες μεμβράνες εμφανίζουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα έναντι ευρέος φάσματος βακτηρίων (Gkotsis et al., 2020).

Σε εφαρμογές που αφορούν υγρά απόβλητα υφαντουργικά, αστικά και φαρμακευτικά λύματα, η χρήση μικρού χρόνου υδραυλικής παραμονής (HRT) συμβάλλει στη μείωση των απαιτήσεων χώρου, ενώ ο αυξημένος χρόνος παραμονής στερεών (SRT) μειώνει την παραγωγή ιλύος και βελτιώνει την ποιότητα της εκροής. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται συσσώρευση στερεών στην επιφάνεια των μεμβρανών και αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για τον αερισμό και τον καθαρισμό τους (Rahman et al., 2023)

Τέλος, στα οικιακά λύματα, τα συστήματα MBR επιτυγχάνουν υψηλής ποιότητας εκροή, αυξημένους ρυθμούς ογκομετρικής φόρτισης, μικρότερους χρόνους υδραυλικής παραμονής και μειωμένη παραγωγή ιλύος. Επιπλέον, με παρατεταμένο χρόνο παραμονής στερεών είναι δυνατή η ταυτόχρονη νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Ωστόσο, η λειτουργία των συστημάτων χαρακτηρίζεται από αυξημένη πολυπλοκότητα και σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις, ιδιαίτερα στις διεργασίες ηλεκτροπηξίας για την απομάκρυνση οργανικών ενώσεων (Zakoor & Gzar, 2022)

3.5 Απόδοση της τεχνολογίας MBR στην επεξεργασία λυμάτων

Η αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων MBR βασίζεται στην ικανότητά τους να απομακρύνουν αποτελεσματικά αιωρούμενα στερεά, οργανικές ενώσεις, θρεπτικά στοιχεία και παθογόνους μικροοργανισμούς από τα προς επεξεργασία λύματα.

Η μεμβράνη λειτουργεί ως φυσικός μηχανισμός διαχωρισμού, αποτρέποντας τη διέλευση στερεών σωματιδίων και μικροβιακών πληθυσμών στην τελική εκροή. Παράλληλα, το ελεγχόμενο περιβάλλον λειτουργίας του βιολογικού αντιδραστήρα διασφαλίζει σταθερή βιολογική δραστηριότητα και υψηλή αξιοπιστία της διεργασίας (Emmanuel Jijingi et al., 2024).

Η ποιότητα της παραγόμενης εκροής συμμορφώνεται συχνά με αυστηρές περιβαλλοντικές προδιαγραφές, καθιστώντας δυνατή την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του νερού σε διάφορες εφαρμογές. Επιπλέον, τα συστήματα MBR παρουσιάζουν σημαντική ευελιξία απέναντι σε μεταβολές της υδραυλικής φόρτισης και της συγκέντρωσης των ρύπων.

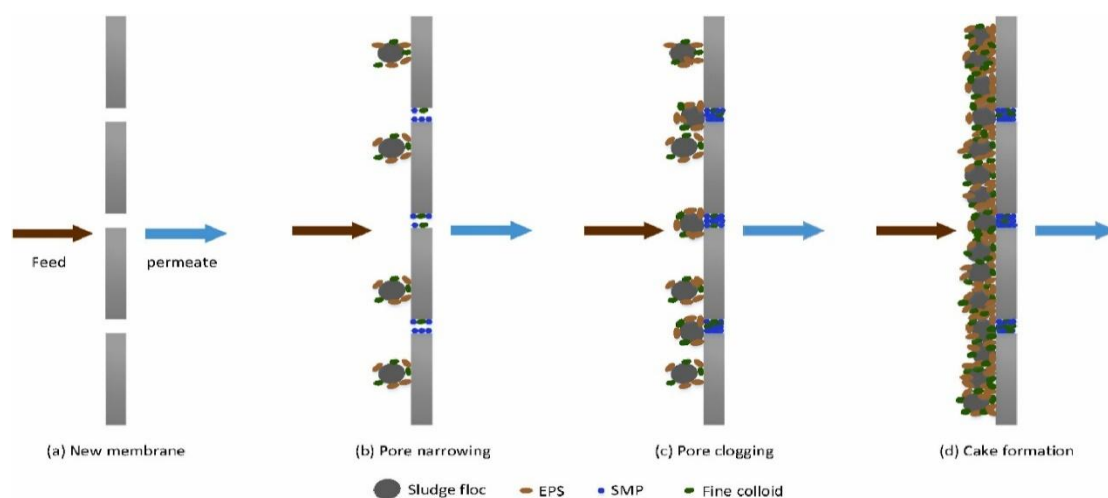
Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η ρύπανση των μεμβρανών εξακολουθεί να αποτελεί τον σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα της τεχνολογίας. Η ανάπτυξη νέων υλικών, η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των μονάδων και οι σύγχρονες στρατηγικές ελέγχου της ρύπανσης συμβάλλουν στη βελτίωση της διαπερατότητας, στην παράταση της διάρκειας ζωής των μεμβρανών και στη μείωση των απαιτήσεων συντήρησης (Du et al., 2020).

3.6 Ρύπανση μεμβράνης και μείωση ροής

Η ρύπανση των μεμβρανών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που επηρεάζουν τη λειτουργική απόδοση των βιοαντιδραστήρων μεμβράνης. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τη συσσώρευση στερεών σωματιδίων, οργανικών ενώσεων, μικροβιακών πληθυσμών και άλλων ρυπογόνων συστατικών στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό των πόρων της μεμβράνης, όπως μπορούμε να διακρίνουμε στην εικόνα 3-4.

Η σταδιακή ανάπτυξη στρωμάτων επικαθίσεων οδηγεί σε μείωση της διαπερατότητας και σε αύξηση της απαιτούμενης διαμεμβρανικής πίεσης για τη διατήρηση της επιθυμητής παροχής διηθήματος, βλέπε εικόνα 3-3. Οι κυριότεροι μηχανισμοί ρύπανσης περιλαμβάνουν τη σωματιδιακή ρύπανση, τη βιορύπανση και τον σχηματισμό στρώματος ιλύος στην επιφάνεια των μεμβρανών (Yang et al., 2020).

Η αξιολόγηση της κατάστασης των μεμβρανών πραγματοποιείται μέσω της παρακολούθησης λειτουργικών παραμέτρων, όπως η διαμεμβρανική πίεση και η παροχή διηθήματος, καθώς και με τη χρήση τεχνικών χαρακτηρισμού, όπως η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και η φασματοσκοπία υπερύθρου μετασχηματισμού Fourier.



Εικόνα 3-3: Μηχανισμοί ρύπανσης μεμβράνης σε βιοαντιδραστήρες μεμβράνης (Iorhemen et al., 2016)

Για τον περιορισμό της ρύπανσης εφαρμόζονται στρατηγικές φυσικού, χημικού και βιολογικού καθαρισμού, σε συνδυασμό με κατάλληλες διεργασίες προεπεξεργασίας και βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας.



Εικόνα 3-4 Ρυπασμένο στοιχείο βιομεμβρανών

Η συστηματική συντήρηση και η εφαρμογή διαδικασιών ανάκτησης της διαπερατότητας αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη διατήρηση της μακροχρόνιας αποδοτικότητας των συστημάτων MBR (Rocco et al., 2023).

3.7 MLVSS και MLSS

Η ανάπτυξη του βακτηριδιακού πληθυσμού εκφράζεται με τους όρους Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS), Ολικά Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού και Mixed Liquor Volatile Suspended Solids (MLVSS), Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού.

Το MLVSS αποτελεί μέρος του MLSS και αντιστοιχεί στα ζωντανά βακτηριδιακά κύτταρα που πραγματοποιούν την βιολογική επεξεργασία κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων. Το μικτό υγρό αποτελεί μείγμα ενεργού ιλύος, καθιζάνουσας ιλύος, ζωντανών μικροοργανισμών και νεκρών κυττάρων που βρίσκονται στη δεξαμενή αερισμού ενός συστήματος ενεργού ιλύος.

Ο όρος MLSS αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού για εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων που λειτουργούν με αιωρούμενη βιομάζα. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις σχεδιάζονται λαμβάνοντας το MLSS ως κρίσιμη λειτουργική παράμετρο.

Διαφορετικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων, χρησιμοποιούν το MLSS ως σημαντική παράμετρο σχεδιασμού.

Μερικές από τις τεχνολογίες είναι:

- ASP (Activated Sludge Process – Σύστημα Ενεργού Ιλύος)
- SBR (Sequential Batch Reactor – Διαλείπων Βιοαντιδραστήρας)
- FBBR (Fluidized Bed Bioreactor)
- MBBR (Moving Bed Bioreactor)
- MBR (Membrane Bioreactor)

Η συγκέντρωση του MLSS επηρεάζει άμεσα το ιξώδες των λυμάτων και κατ'επέκταση την ικανότητα διήθησης μέσω των μεμβρανών MBR. Παράλληλα, ο λόγος F/M (λόγος τροφής προς μικροοργανισμούς) αποτελεί βασική παράμετρο ελέγχου της

διεργασίας ενεργού ιλύος και συνδέει το βιοαποδομήσιμο οργανικό φορτίο με την ποσότητα της ενεργού βιομάζας. Η ζώνη αερισμού ελέγχεται με βάση το διαθέσιμο υπόστρωμα και τη συγκέντρωση της βιομάζας. Για τον υπολογισμό του F/M πρέπει να καθορίζονται με σαφήνεια τόσο το φορτίο υποστρώματος που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό όσο και η μάζα $MLVSS$ που θεωρείται ενεργή βιομάζα.

4. Σχεδιασμός και περιγραφή λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων

4.1 Ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά εισερχομένων λυμάτων

Η μέγιστη ημερήσια παροχή λυμάτων που δύναται να επεξεργαστεί η μονάδα είναι 50m³/d σύμφωνα με τα στοιχεία που δόθηκαν από τους μελετητές των εγκαταστάσεων. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων που θα καταλήγουν στην εγκατάσταση λυμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1:

Πίνακας 4-1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά εισερχόμενων λυμάτων

Ποιοτικά Χαρακτηριστικά	Τιμή
Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο ΒΑΟ ₅	500 mg/L
Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο ΧΑΟ	900 mg/L
Αιωρούμενα Στερεά TSS	300 mg/L
Ολικό Αζωτο	70 mg/L
Ολικός Φώσφορος	10 mg/L
pH	7.5

4.2 Ζητούμενα αποτελέσματα στην έξοδο

Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζονται οι απαιτούμενες συγκεντρώσεις των ρύπων στην εκροή της εγκατάστασης, όπως προκύπτουν από τις απαιτήσεις σχεδιασμού και τους εγκεκριμένους περιβαλλοντικούς όρους.

Πίνακας 4-2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά επεξεργασμένων λυμάτων

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμή
Συγκέντρωση Οργανικού φορτίου Επεξεργασμένων Λυμάτων	mg BOD ₅ /L	≤10 για το 80% των δειγμάτων
Συγκέντρωση Οργανικού φορτίου Επεξεργασμένων Λυμάτων	mg COD/L	≤60
Συγκέντρωση Αιωρούμενων Στερεών Επεξεργασμένων Λυμάτων	mg TSS /L	≤2 για το 80% των δειγμάτων
Συγκέντρωση Συνολικού Αζώτου Επεξεργασμένων Λυμάτων	mg T-N/L	≤15
Συγκέντρωση Αμμωνιακού Αζώτου Επεξεργασμένων Λυμάτων	mg N-NH ₄ /L	≤2
Συγκέντρωση Νιτρικών Επεξεργασμένων Λυμάτων	mg N-NO ₃ /L	≤10
Συγκέντρωση Συνολικού Φωσφόρου Επεξεργασμένων Λυμάτων	mg T-P /L	2
Θολότητα (NTU)	NTU	≤2 διάμεση τιμή
Ολικά Κολοβακτηρίδια	TC/100ml	≤2 για το 80% των δειγμάτων
Ολικά Κολοβακτηρίδια	TC/100ml	≤20 για το 95% των δειγμάτων

Ο απαιτούμενος βαθμός απόδοσης της μονάδας επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων για κάθε ρύπο σύμφωνα με τους Εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4-3 Ζητούμενη Απόδοση Συστήματος

Παράμετρος	Απόδοση Απομάκρυνσης %
Οργανικό Φορτίο BOD ₅	98,00
Αιωρούμενα Στερεά SS	99,00
Συνολικό Άζωτο – TN	79

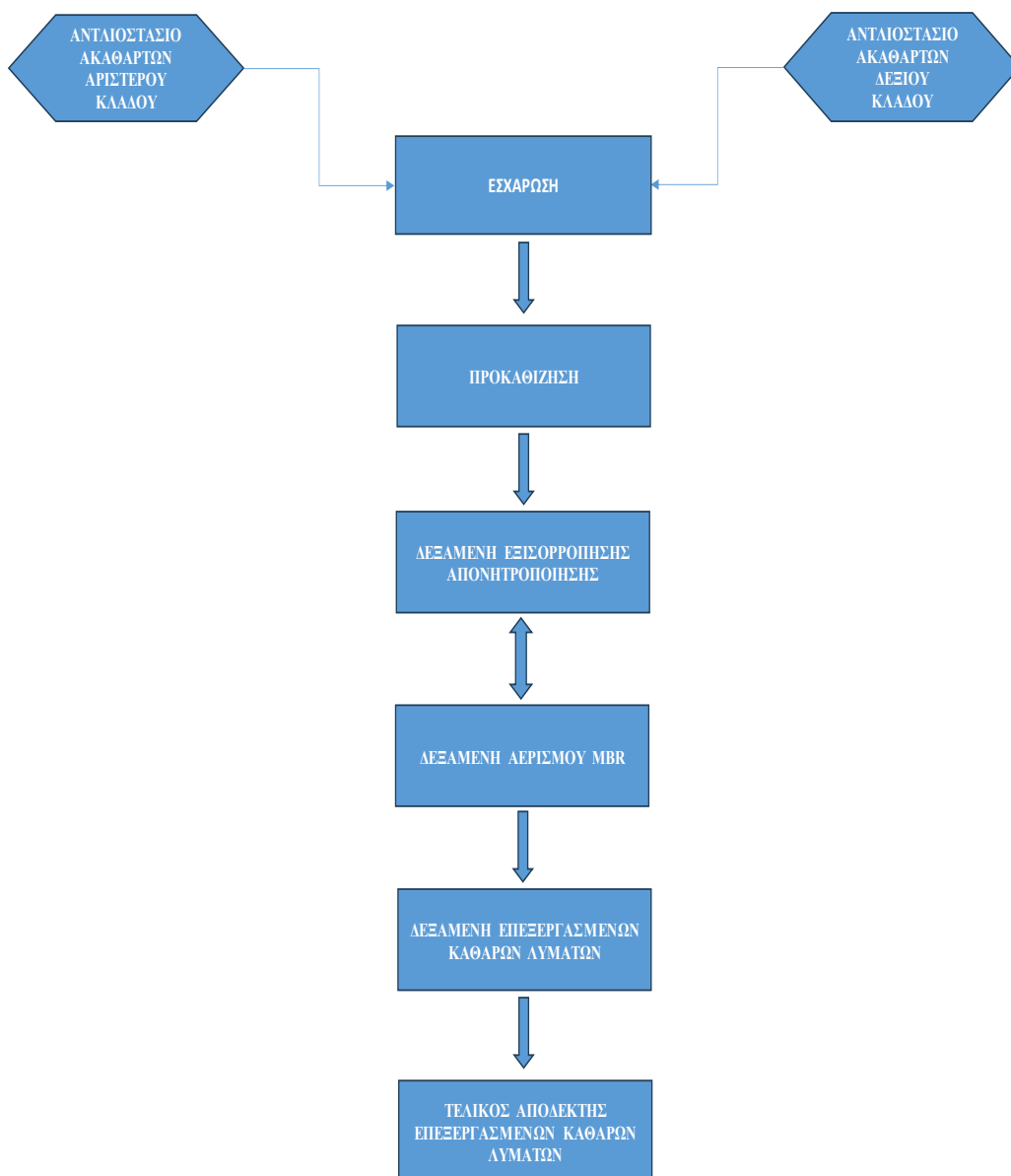
Στη συνέχεια αναλύεται βήμα - προς βήμα η λειτουργία της εγκατάστασης, ώστε να εξεταστεί κατά πόσο τα επιμέρους στάδια επεξεργασίας συμβάλουν στην επίτευξη των απαιτούμενων ποιοτικών χαρακτηριστικών της εκροής.

Τα στάδια της επεξεργασίας που ακολουθούν τα υγρά λύματα εντός του συστήματος μας είναι:

- Αντλιοστάσιο ανύψωσης ακαθάρτων λυμάτων
- Λεπτή αυτοκαθαριζόμενη εσχάρωση 2mm
- Δεξαμενή προκαθίζησης και αποθήκευσης ιλύος
- Δεξαμενή εξισορρόπησης-απονιτροποίησης
- Δεξαμενή βιολογικής επεξεργασίας
- Διαχωρισμός στερεού – υγρού κλάσματος μέσω βιοαντιδραστήρων με μεμβράνη
- Δεξαμενή χλωρίωσης επεξεργασμένων λυμάτων
- Ανοιχτή στεγανή δεξαμενή αποθήκευσης επεξεργασμένων λυμάτων

4.3 Διάγραμμα ροής

Στο διάγραμμα ροής 4-1 που ακολουθεί φαίνεται η διαδρομή των υγρών λυμάτων που εισέρχονται στο σύστημά μας προς επεξεργασία



Διάγραμμα 4-1 Διάγραμμα ροής μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων

4.4 Στάδια επεξεργασίας

4.4.1 Αντλιοστάσιο ανύψωσης ακαθάρτων λυμάτων

Τα παραγόμενα υγρά απόβλητα συλλέγονται μέσω του αποχετευτικού δικτύου και οδηγούνται σε δύο αντλιοστάσια συλλογής και ανύψωσης. Η ανύψωση των λυμάτων προς τη μονάδα βιολογικής επεξεργασίας πραγματοποιείται με τη χρήση τριών αντλιών βαρέων λυμάτων εξοπλισμένων με κοπήρες, οι οποίες εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη μεταφορά του ρευστού ακόμη και παρουσία στερεών υλικών.

Η διάταξη αυτή συμβάλλει στη σταθερή και αξιόπιστη τροφοδοσία της εγκατάστασης, περιορίζοντας παράλληλα τον κίνδυνο εμφράξεων και λειτουργικών προβλημάτων στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζεται η διάταξη του αντλιοστασίου ανύψωσης ακαθάρτων λυμάτων.



Εικόνα 4-1: Αντλιοστάσιο ανύψωσης εισερχομένων λυμάτων

4.4.2 Λεπτή αυτοκαθαριζόμενη εσχάρωση 2mm

Μετά το στάδιο της ανύψωσης, τα λύματα διέρχονται από σύστημα αυτοκαθαριζόμενης εσχάρωσης με άνοιγμα οπών 2 mm. Η εγκατεστημένη εσχάρα είναι τύπου περιστροφικής βούρτσας και επιτρέπει την αποτελεσματική συγκράτηση στερεών σωματιδίων διαστάσεων μεγαλύτερων των 2 mm, τα οποία συλλέγονται και απομακρύνονται σε ειδικό κάδο εσχарισμάτων, βλέπε εικόνα 4-2.

Η μονάδα εσχάρωσης είναι εγκατεστημένη σε κατάλληλη υψομετρική θέση, ώστε τα προεπεξεργασμένα λύματα να οδηγούνται με βαρύτητα στη δεξαμενή απονιτροποίησης, χωρίς να απαιτείται πρόσθετη αντλητική ενέργεια. Η λειτουργία της μονάδας ελέγχεται μέσω προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC), βάσει προκαθορισμένου χρονοπρογράμματος και σε συνάρτηση με τη λειτουργία των αντλιών ανύψωσης.

Η απομάκρυνση των αδρών στερεών στο αρχικό στάδιο επεξεργασίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την προστασία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της εγκατάστασης.



Εικόνα 4-2 Αυτοκαθαριζόμενη εσχάρωση

4.4.3 Δεξαμενή προκαθίζησης και αποθήκευσης ιλύος

Μετά τη λεπτοεσχάρωση, τα λύματα οδηγούνται με φυσική ροή στη δεξαμενή προκαθίζησης και αποθήκευσης ιλύος, ωφέλιμου όγκου 28 m³. Ο σχεδιασμός της παρέχει χρόνο παραμονής περίπου 2,8 h στη μέγιστη παροχή και συμβάλλει στην απομάκρυνση καθιζήσιμων στερεών και λιπών πριν από τα επόμενα στάδια. Να διευκρινιστεί στην τελική έκδοση αν στη δεξαμενή αποθηκεύεται αποκλειστικά περίσσεια βιολογικής ιλύος ή και πρωτοβάθμια ιλύς, καθώς πρόκειται για διαφορετικά ρεύματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Στη συγκεκριμένη δεξαμενή αποθηκεύεται επίσης η περίσσεια βιολογικής ιλύος που απομακρύνεται από τη διεργασία. Η απομάκρυνση της συσσωρευμένης ιλύος πραγματοποιείται περιοδικά, συνήθως σε μηνιαία βάση, μέσω βυτιοφόρου οχήματος, ενώ η τελική διάθεσή της γίνεται σε αδειοδοτημένη εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων που διαθέτει κατάλληλη υποδομή υποδοχής βοθρολυμάτων.

Μετά την ολοκλήρωση της προκαθίζησης, τα λύματα υπερχειλίζουν μέσω κατάλληλης διάταξης συγκράτησης λιπαρών και οδηγούνται στη δεξαμενή εξισορρόπησης–απονιτροποίησης.

4.4.4 Δεξαμενή εξισορρόπησης-Απονιτροποίησης

Τα προεπεξεργασμένα λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή εξισορρόπησης–απονιτροποίησης, η οποία είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα και διαθέτει ωφέλιμο όγκο 57 m³.

Ο απαραίτητος όγκος της δεξαμενής απονιτροποίησης υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V = \frac{N_{DN}}{\mu_{DN} \cdot X}$$

όπου: μ_{DN} , είναι η ταχύτητα απονιτροποίησης

$$N_{DN} = N_{OX} - Q \cdot N,$$

N_{OX} = η μάζα του αζώτου που οξειδώνεται στην μονάδα του χρόνου

N = η συγκέντρωση νιτρικών στην εκροή

Q = η παροχή των αποβλήτων

X = η συγκέντρωση της μάζας των μικροοργανισμών

Η δεξαμενή επιτελεί διττό ρόλο, καθώς λειτουργεί αφενός ως μονάδα εξισορρόπησης των υδραυλικών και ρυπαντικών φορτίων και αφετέρου ως ανοξική δεξαμενή απονιτροποίησης. Η παρουσία επαρκούς όγκου αποθήκευσης επιτρέπει την απορρόφηση διακυμάνσεων της παροχής, συμβάλλοντας στη διατήρηση σταθερών συνθηκών λειτουργίας στο σύστημα βιολογικής επεξεργασίας.

Για την εξασφάλιση ομοιογενούς ανάμιξης και τη δημιουργία κατάλληλων ανοξικών συνθηκών έχει εγκατασταθεί υποβρύχιος αναδευτήρας ισχύος 1,10 kW. Παράλληλα, η δεξαμενή είναι εξοπλισμένη με δίδυμο αντλιοστάσιο σταθερής παροχής, αποτελούμενο από δύο υποβρύχιες αντλίες τύπου VORTEX, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία του βιολογικού αντιδραστήρα.

Η λειτουργία των αντλιών ελέγχεται μέσω συστήματος αυτοματισμού και φλοτεροδιακοπών διαφορετικών σταθμών λειτουργίας, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφη κατανομή του χρόνου λειτουργίας και αυξημένη επιχειρησιακή αξιοπιστία.

Εντός της δεξαμενής αναπτύσσονται ανοξικές συνθήκες, οι οποίες ευνοούν τη διεργασία της απονιτροποίησης. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα νιτρικά και νιτρώδη ιόντα μετατρέπονται σε αέριο άζωτο μέσω της δράσης εξειδικευμένων ετερότροφων μικροοργανισμών, συμβάλλοντας στη μείωση του αζωτούχου φορτίου των λυμάτων.



Εικόνα 4-3 Ανακυκλοφορία από την δεξαμενή αερισμού προς την εξισορρόπηση.

Για την αποτελεσματική διεξαγωγή της διεργασίας πραγματοποιείται ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος από τη δεξαμενή βιολογικής επεξεργασίας προς τη δεξαμενή απονιτροποίησης με φυσική κυκλοφορία, όπως μπορούμε να διακρίνουμε στην εικόνα 4-3. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η παρουσία ενεργής βιομάζας και η επίτευξη υψηλών αποδόσεων απομάκρυνσης αζώτου.

Πίνακας 4-4 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά δεξαμενής απονιτροποίησης

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμές
Μέγιστη Ημερήσια Παροχή	m ³ /day	50
Συγκέντρωση Εισερχόμενου Φορτίου Συνολικού Αζώτου	mg T-N/L	70,00
Συγκέντρωση Σχεδιασμού Συνολικού Αζώτου Επεξεργασμένων Λυμάτων	mg T-N/L	15,00
Ποσότητα Νιτροποιημένου Αζώτου	kg/day	3,50
Ποσότητα Νιτρικών στην Έξοδο (N-NO ³)	kg/day	0,35
Αζώτο το οποίο απαιτείται για την αύξηση των μικροοργανισμών (15%)	kg/day	0,53
Ποσότητα νιτρικών προς Απονιτροποίηση	kg/day	2,63
Ρυθμός Αύξησης Απονιτροποιητικών Βακτηρίων (qDN = A*1010 e-B/RT)	kg N-NO ³ / kg VSS	0,076
Βιομάζα για Απονιτροποίηση	kg VSS	34,698
Λόγος MLVSS / MLSS		0,700
Στερεά στον Ανοξικό Αντιδραστήρα	kg SS	49,568
Ελάχιστος όγκος Δεξαμενής Απονιτροποίησης	m ³	7,44
Λόγος Εσωτερικής Ανακυκλοφορίας Ανάμικτου Υγρού		4,9
Παροχή Ανακυκλοφορίας Ανάμικτου Υγρού	m ³ /h	10,1
Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής	H	0,61

4.4.5 Αντλιοστάσιο Σταθερής Παροχής

Στη δεξαμενή εξισορρόπησης–απονιτροποίησης έχει εγκατασταθεί σύστημα σταθερής τροφοδοσίας, το οποίο αποτελείται από δύο υποβρύχιες αντλίες κατάλληλες για τη μεταφορά λυμάτων, βλέπε εικόνα 4-4. Οι αντλίες αυτές εξασφαλίζουν την ομοιόμορφη παροχή προς τη δεξαμενή βιολογικής επεξεργασίας και κατ' επέκταση προς το σύνολο της εγκατάστασης.

Η συνεχής και ελεγχόμενη τροφοδοσία του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου συμβάλλει στη διατήρηση σταθερών λειτουργικών συνθηκών, περιορίζοντας τις διακυμάνσεις του υδραυλικού φορτίου. Παράλληλα, επιτυγχάνεται η απαιτούμενη ανακυκλοφορία της ενεργού ιλύος, η οποία αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία των βιολογικών διεργασιών.

Η λειτουργία των αντλιών πραγματοποιείται εναλλάξ, μέσω κατάλληλου προγράμματος αυτοματισμού που είναι ενσωματωμένο στο σύστημα ελέγχου PLC, με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή του χρόνου λειτουργίας και την επιμήκυνση του χρόνου ζωής του εξοπλισμού.



Εικόνα 4-4 Υποβρύχια αντλία βαρέων λυμάτων

<https://www.pomperotomec.it/portfolio-articoli/tr/?lang=en>

4.4.6 Αναδευτήρας Απονιτροποίησης

Για την αποφυγή καθίζησης στερεών και τη διατήρηση της βιομάζας σε αιώρηση εντός της δεξαμενής απονιτροποίησης, έχει εγκατασταθεί υποβρύχιος αναδευτήρας τύπου προπέλας, βλέπε εικόνα 4-5. Η συνεχής λειτουργία του εξασφαλίζει την πλήρη ανάμιξη του περιεχομένου της δεξαμενής, αποτρέποντας την ανάπτυξη νεκρών ζωνών και τη συσσώρευση ιλύος στον πυθμένα.

Επιπλέον, η επαρκής ανάδευση συμβάλλει στη διατήρηση των απαραίτητων ανοξικών συνθηκών που απαιτούνται για την αποτελεσματική διεξαγωγή της διαδικασίας απονιτροποίησης και τη βελτιστοποίηση της απομάκρυνσης αζωτούχων ενώσεων.



Εικόνα 4-5 Υποβρύχιος αναδευτήρας

<https://www.pomperotomec.it/miscelatori/?lang=en>

4.4.7 Δεξαμενή βιολογικής επεξεργασίας

Μετά την ολοκλήρωση της διεργασίας απονιτροποίησης, τα λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή βιολογικής επεξεργασίας, όπου πραγματοποιείται η περαιτέρω απομάκρυνση του οργανικού φορτίου μέσω της μεθόδου της ενεργού ιλύος παρατεταμένου αερισμού.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια συνεχόμενη βιολογική διεργασία κατά την οποία οι οργανικές ενώσεις που περιέχονται στα λύματα αποδομούνται από αερόβιους μικροοργανισμούς. Η παροχή οξυγόνου πραγματοποιείται μέσω συστήματος αερισμού, το οποίο διασφαλίζει τις κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη και μεταβολική δραστηριότητα της βιομάζας.

Πίνακας 4-5 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά δεξαμενής αερισμού

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμές
Μέγιστη Ημερήσια Παροχή	m ³ /day	50
Συγκέντρωση Εισόδου βιοδιασπάσιμου οργανικού φορτίου (Fo)	mg BOD ₅ /L	500
Συγκέντρωση Εισόδου Αιωρούμενων Στερεών (Fo)	mg SS /L	300
Συγκέντρωση Εισόδου Αμμωνιακού Αζώτου	mg N-NH ⁴ /L	70
Συγκέντρωση Οργανικών Στερεών (S _{vo})	mg/L	210,0
Συγκέντρωση Ανόργανων Στερεών (S _{fo})	mg/L	90,0
Συγκέντρωση Αιωρούμενων Στερεών στο Ανάμεικτο Υγρό (MLSS)	mg/L	10.000
Συντελεστής Σχεδιασμού του Χρόνου Παραμονής των Στερεών για αυτοοξείδωση ιλύος		6
Χρόνος Παραμονής των Στερεών για το Σχεδιασμό	Days	21,6
Ποσοστό μη βιοδιασπάσιμων Στερεών που περιέχονται στα Λύματα (a)		0,1
Ποσοτό Αδρανούς Υλικού που προέρχεται από την φθορά των μικροοργανισμών (b)		0,2
Ετεροτροφικός Συντελεστής Μετατροπής Βιομάζας (Y _H)		0,65
Αυτοτροφικός Συντελεστής Μετατροπής Βιομάζας (Y _N)		0,15
Ταχύτητα Φθοράς ετεροτροφικών βακτηρίων (b _H)	days ⁻¹	0,06
Ταχύτητα Φθοράς νιτροποιητικών βακτηρίων (b _N)	days ⁻¹	0,05
Απόδοση Απομάκρυνσης Οργανικού Φορτίου (E _H)		0,98
Απόδοση Νιτροποίησης (E _N)		0,97
Ίζημα από χημική απομάκρυνση Φωσφόρου (FePO ₄)	mg/L	2,7
Ελάχιστος όγκος Δεξαμενής Αερισμού	m ³	31,7

Οι μικροοργανισμοί προσλαμβάνουν τις οργανικές ουσίες ως πηγή ενέργειας και θρεπτικών συστατικών, με αποτέλεσμα να της μετατρέπουν μέσω σύνθετων βιοχημικών διεργασιών σε σταθερά ανόργανα προϊόντα, βιομάζα και διοξείδιο του άνθρακα. Η διεργασία αυτή συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του οργανικού φορτίου και στη βελτίωση της ποιότητας της εκροής.

Πίνακας 4-6 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά παραγωγής περίσσειας ιλύος

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμές
Ελάχιστος Όγκος Δεξαμενής Αερισμού	m ³	31,7
Αριθμός Δεξαμενών	No	1,0
Πλάτος Δεξαμενής Αερισμού	M	4,3
Μήκος Δεξαμενής Αερισμού	M	3,4
Λειτουργικό Βάθος Υγρών	M	3,4
Επιφάνεια Δεξαμενής	m ²	14,5
Συνολική επιφάνεια δεξαμενών	m ²	14,5
Όγκος κάθε δεξαμενής	m ³	49,1
Συνολικός Όγκος των Δεξαμενών	m ³	49,1
Υδραυλικός χρόνος παραμονής	Days	0,634
Συντελεστής $\lambda = \Theta/\Theta_c$	-	0,029
Συγκέντρωση Αιωρούμενων Στερεών στο Ανάμεικτο Υγρό (MLSS)	mg/L	10.000,0
Συγκέντρωση Αιωρούμενων Στερεών στην Λάσπη, Su	mg/L	12.000,0
Βαθμός συμπύκνωσης της ιλύος, (m=Su/MLSS)		1,2
Ρυθμός Ανακυκλοφορίας [$r = (1-\lambda)/(m-1)$]		4,9
Ημερήσια παραγωγή ιλύος ($w=\lambda/mQ$)	m ³ /day	1,22

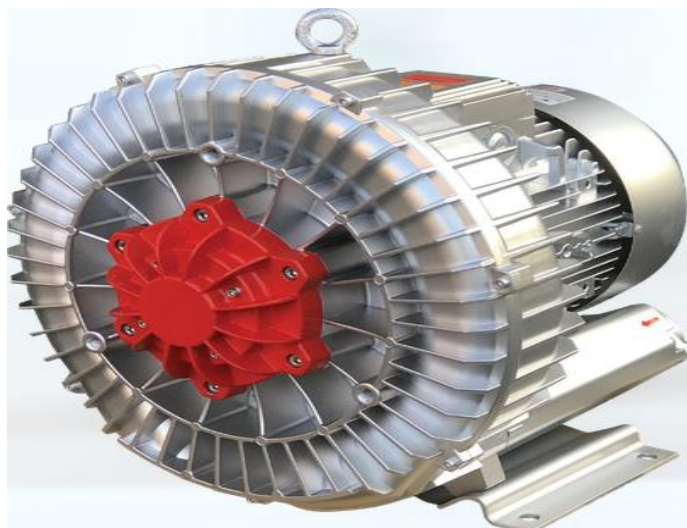
Η απαιτούμενη παροχή αέρα εξασφαλίζεται μέσω φυσητήρα πλευρικού καναλιού δυναμικότητας 85 m³/h, ο οποίος λειτουργεί υπό μανομετρική πίεση 400 mbar, βλέπε εικόνα 4-7. Ο έλεγχος της λειτουργίας του πραγματοποιείται μέσω συστήματος αυτοματισμού PLC–SCADA, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση των συνθηκών αερισμού και τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Η διασπορά του αέρα πραγματοποιείται μέσω υποβρύχιου δικτύου διαχυτήρων μεμβράνης εγκατεστημένων στον πυθμένα της δεξαμενής, όπως μπορούμε να δούμε και από την εικόνα 4-6. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει ομοιόμορφη κατανομή του οξυγόνου, αποτελεσματική ανάδευση του ανάμικτου υγρού και βέλτιστη απόδοση των μικροβιακών πληθυσμών.



Εικόνα 4-6 Δίκτυο διαχυτών.

Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου αποτελεί κρίσιμη λειτουργική παράμετρο, καθώς επηρεάζει άμεσα τη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών, την αποδοτικότητα της επεξεργασίας και την αποφυγή φαινομένων δυσοσμίας.



Εικόνα 4-7 Φυσητήρας

<https://www.ivaco.it/menu/soffianti-a-canale-laterale-serie-sc/>

Πίνακας 4-7 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά απομάκρυνσης φωσφόρου

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμές
Μέγιστη Ημερήσια Παροχή	m ³ /day	50
Φορτίο Εισερχόμενου Φωσφόρου	kg/day	0,5
Φορτίο Φωσφόρου στην Εκροή	kg/day	0,1
Ποσότητα Φωσφόρου που αφαιρείται βιολογικά (5%)	kg/day	0,0
Ποσότητα Φωσφόρου προς χημική απομάκρυνση	kg/day	0,4
Δοσολογία διαλύματος PAC (σύσταση 30%)	kg/day	8,4

4.4.8 Διαχωρισμός στερεού – υγρού κλάσματος

Στο τελικό τμήμα της δεξαμενής βιολογικής επεξεργασίας είναι εγκατεστημένες οι μονάδες μεμβρανών, οι οποίες αναλαμβάνουν τον διαχωρισμό της στερεής και της υγρής φάσης του ανάμικτου υγρού.

Η εγκατάσταση διαθέτει μεμβράνες τύπου Porous Hollow Fiber από PVDF. Στον Πίνακα 4-8 αναφέρεται συνολική επιφάνεια μεμβρανών 94,7 m², ενώ στο κείμενο αναφέρεται ενεργός επιφάνεια 100 m².

Οι συστοιχίες μεμβρανών τοποθετούνται σε ειδικές υποστηρικτικές διατάξεις που επιτρέπουν την εύκολη ανύψωση και συντήρησή τους χωρίς την ανάγκη εκκένωσης της δεξαμενής βιολογικής επεξεργασίας.

Για τον περιορισμό της ρύπανσης των μεμβρανών εφαρμόζεται συνεχής αερισμός μέσω ανεξάρτητου φυσητήρα, ο οποίος τροφοδοτεί το υποβρύχιο δίκτυο αερισμού κάθε συστοιχίας. Η δημιουργία φυσαλίδων αέρα στην επιφάνεια των μεμβρανών απομακρύνει επικαθίσεις και περιορίζει τη συσσώρευση στερεών, διατηρώντας υψηλά επίπεδα διαπερατότητας.



Εικόνα 4-8 Μεμβράνες πριν την εγκατάστασή τους.

<https://ecc.com.gr/el/>

Επιπλέον, πραγματοποιείται περιοδικός χημικός καθαρισμός των μεμβρανών σε εβδομαδιαία βάση, ενώ ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων εφαρμόζονται και επιτόπιες διαδικασίες καθαρισμού με χρήση υποχλωριώδους νατρίου ή κιτρικού οξέος, χωρίς την απομάκρυνση των μεμβρανών από τη δεξαμενή.

Πίνακας 4-8 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά συστοιχίας μεμβρανών

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμές
Μέγιστη Ημερήσια Παροχή	m ³ /day	50
Ωριαία Σταθερή Παροχή	lt/h	2083,3
Μέση Υδραυλική Φόρτιση Μεμβρανών	lt/m ² M_h	22,0
Συνολική Επιφάνεια Μεμβρανών	m ²	94,7
Τύπος / Μοντέλο Μεμβρανών	BC	100,0
Αριθμός Συστοιχιών Μεμβρανών	No	1
Πλάτος Συστοιχίας Μεμβράνης	M	0,714
Μήκος Συστοιχίας Μεμβράνης	M	1,385
Ύψος Συστοιχίας Μεμβράνης	M	1,585
Όγκος Συστοιχιών Μεμβρανών	m ³	1,6
Παροχή Αέρα για τις Μεμβράνες	m ³ /h	84

4.4.9 Δεξαμενή χλωρίωσης επεξεργασμένων λυμάτων

Το διήθημα που παράγεται από τις μεμβράνες συλλέγεται σε δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης και απολύμανσης, όπου πραγματοποιείται το τελικό στάδιο χλωρίωσης των επεξεργασμένων λυμάτων.

Η δεξαμενή διαθέτει ωφέλιμο όγκο 24 m³ και εξασφαλίζει επαρκή χρόνο επαφής μεταξύ του απολυμαντικού μέσου και του επεξεργασμένου νερού, ώστε να επιτευχθεί αποτελεσματική εξουδετέρωση των παθογόνων μικροοργανισμών.

Για τη διαδικασία απολύμανσης χρησιμοποιείται διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου (NaOCl), το οποίο προστίθεται μέσω διαφραγματικής δοσομετρικής αντλίας δυναμικότητας 2 L/h. Η δοσολογία του απολυμαντικού ρυθμίζεται αυτόματα βάσει της συγκέντρωσης υπολειμματικού χλωρίου, διασφαλίζοντας σταθερή ποιότητα εκροής και συμμόρφωση με τις ισχύουσες περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

Μετά την ολοκλήρωση της απολύμανσης, τα επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται σε ανοιχτή στεγανή δεξαμενή αποθήκευσης και στη συνέχεια διατίθενται στον τελικό αποδέκτη ή μπορούν να αξιοποιηθούν για σκοπούς επαναχρησιμοποίησης, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, βλέπε εικόνα 4-9.



Εικόνα 4-9 Ανοιχτή στεγανή δεξαμενή επεξεργασμένων λυμάτων.

4.5 Εξοπλισμός ελέγχου και λειτουργίας βιομεμβρανών

Η αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος βιοαντιδραστήρων μεμβράνης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον κατάλληλο εξοπλισμό ελέγχου και αυτοματισμού, ο οποίος επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση των κρίσιμων λειτουργικών παραμέτρων και τη βελτιστοποίηση της διεργασίας επεξεργασίας.

4.5.1 Φυσητήρας καθαρισμού μεμβρανών

Ο καθαρισμός των μεμβρανών πραγματοποιείται με τη συνεχή παροχή αέρα μέσω φυσητήρα πλευρικού καναλιού, ο οποίος λειτουργεί καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας διήθησης. Ο αέρας διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο αερισμού των μεμβρανών, δημιουργώντας συνθήκες έντονης τυρβώδους ροής στην επιφάνειά τους και περιορίζοντας τη συσσώρευση επικαθίσεων.

Η παροχή αέρα ρυθμίζεται μέσω κατάλληλου μετρητή ροής, ενώ η λειτουργία του φυσητήρα ελέγχεται από το σύστημα αυτοματισμού της εγκατάστασης μέσω προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC). Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στη διατήρηση της διαπερατότητας των μεμβρανών και στη μείωση της συχνότητας χημικών καθαρισμών.

4.5.2 Αντλίες αναρρόφησης επεξεργασμένων υγρών

Η απομάκρυνση του επεξεργασμένου νερού από τις μονάδες μεμβρανών πραγματοποιείται μέσω δύο αντλιών τύπου κοχλία (screw pumps), οι οποίες λειτουργούν με μεταβλητή ταχύτητα μέσω συστημάτων inverter, βλέπε εικόνα 4-10.

Η χρήση μετατροπών συχνότητας επιτρέπει τη συνεχή προσαρμογή της παροχής στις πραγματικές απαιτήσεις λειτουργίας της εγκατάστασης, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και στη διατήρηση σταθερών συνθηκών διήθησης.

Οι αντλίες αναρρόφησης αποτελούν κρίσιμο τμήμα της εγκατάστασης, καθώς εξασφαλίζουν την ομαλή απομάκρυνση του διηθήματος και τη διατήρηση σταθερής διαμεμβρανικής πίεσης.



Εικόνα 4-10 Αντλία τύπου κοιλία

<https://www.novarotors.com/en/products/progressing-cavity-pumps-diamond/81/pumps-n-series>

4.5.3 Μετρητής ροής εξόδου

Η παρακολούθηση της παροχής των επεξεργασμένων λυμάτων πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρομαγνητικού μετρητή ροής εγκατεστημένου στον αγωγό εξόδου της εγκατάστασης, βλέπε εικόνα 4-11.

Ο εξοπλισμός αυτός παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ωριαία και ημερήσια παροχή του συστήματος, ενώ τα δεδομένα μεταφέρονται στο PLC και χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της λειτουργίας των αντλιών αναρρόφησης.

Η συνεχής καταγραφή της παροχής αποτελεί βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης της εγκατάστασης και τη διατήρηση σταθερών λειτουργικών συνθηκών.



Εικόνα 4-11 Ψηφιακό όργανο μέτρησης παροχής

<https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/>

4.5.4 Μετρητής στάθμης

Στη δεξαμενή βιολογικής επεξεργασίας έχει εγκατασταθεί υδροστατικός αισθητήρας στάθμης, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη συνεχή μέτρηση του ύψους του υγρού. Η λειτουργία του βασίζεται στη μέτρηση της υδροστατικής πίεσης που ασκείται στον αισθητήρα από τη στήλη του υγρού. Για την εξασφάλιση αξιόπιστων μετρήσεων, ο αισθητήρας τοποθετείται στον πυθμένα της δεξαμενής.

Οι πληροφορίες που συλλέγονται αξιοποιούνται από το σύστημα αυτοματισμού για τον έλεγχο της λειτουργίας των αντλιών τροφοδοσίας και αναρρόφησης, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα της διεργασίας και την αποφυγή υδραυλικών διακυμάνσεων.

4.5.5 Μετρητής πίεσης

Ο μετρητής διαφορικής πίεσης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα όργανα παρακολούθησης της εγκατάστασης, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της κατάστασης των μεμβρανών και του βαθμού ρύπανσής τους, βλέπε εικόνα 4-12.

Η αύξηση της διαμεμβρανικής πίεσης συνδέεται άμεσα με τη συσσώρευση στερεών και βιολογικών επικαθίσεων στην επιφάνεια των μεμβρανών. Η συνεχής παρακολούθηση της παραμέτρου αυτής επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων λειτουργίας και την εφαρμογή κατάλληλων διορθωτικών μέτρων, όπως η πραγματοποίηση φυσικού ή χημικού καθαρισμού. Ο αισθητήρας είναι εγκατεστημένος στον αγωγό αναρρόφησης των αντλιών καθαρού νερού και είναι συνδεδεμένος με το σύστημα ελέγχου της εγκατάστασης.



Εικόνα 4-12 Ψηφιακός μετρητής πίεσης

<https://www.endress.com>

4.5.6 Σύστημα χημικού καθαρισμού των μεμβρανών

Για την προστασία των μεμβρανών από την ανάπτυξη επικαθίσεων και τη δημιουργία ανόργανων αποθέσεων, κυρίως αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου, εφαρμόζεται σύστημα αυτόματης χημικής έκπλυσης. Η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω διοχέτευσης διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου συγκέντρωσης 0,5% στα διαβρεχόμενα τμήματα των μεμβρανών, χωρίς να απαιτείται η απομάκρυνσή τους από τη δεξαμενή βιολογικής επεξεργασίας.

Το σύστημα περιλαμβάνει δεξαμενή αποθήκευσης χημικού αντιδραστήριου κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο, καθώς και δοσομετρικές αντλίες κατάλληλης παροχής, βλέπε εικόνα 4-13. Η εγκατάσταση του εξοπλισμού πραγματοποιείται σε ειδικά διαμορφωμένο και απομονωμένο χώρο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις ασφάλειας και υγιεινής.



Εικόνα 4-13 Διάταξη συστήματος καθαρισμού βιομεμβρανών

Η λειτουργία όλων των επιμέρους συστημάτων ελέγχεται κεντρικά από το PLC της μονάδας, επιτρέποντας τον πλήρη αυτοματισμό της εγκατάστασης και τη βελτιστοποίηση της λειτουργικής της απόδοσης.

4.6 Κατανάλωση ενέργειας και λειτουργικά έξοδα

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν το συνολικό λειτουργικό κόστος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων με τεχνολογία βιοαντιδραστήρων μεμβράνης.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της απαιτούμενης ενέργειας καταναλώνεται στις διεργασίες αερισμού των βιοαντιδραστήρων και των μονάδων μεμβρανών, καθώς και στη λειτουργία των αντλιών ανύψωσης, ανακυκλοφορίας και διήθησης. Ως εκ τούτου, η κατάλληλη διαστασιολόγηση του εξοπλισμού και η επιλογή ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της εγκατάστασης.

Στον πίνακα 4-9 παρουσιάζεται ο κύριος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός της εγκατάστασης, ο οποίος συμβάλλει κατά κύριο λόγο στην ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται από παραμέτρους όπως ο σχεδιασμός της μονάδας, ο τύπος και τα χαρακτηριστικά των μεμβρανών, οι υδραυλικές συνθήκες λειτουργίας, η συγκέντρωση της μικτής αιωρούμενης στερεής βιομάζας (MLSS) και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προς επεξεργασία λυμάτων.

Τα λειτουργικά έξοδα της εγκατάστασης περιλαμβάνουν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, τα έξοδα συντήρησης και βλαβών, την προμήθεια χημικών αντιδραστηρίων και το κόστος απασχόλησης προσωπικού. Το συνολικό λειτουργικό κόστος επηρεάζεται σημαντικά από την επιλογή της μονάδας μεμβρανών, τη στρατηγική συντήρησης, τη συχνότητα καθαρισμού των μεμβρανών, καθώς και από τις απαιτούμενες ποσότητες χημικών ουσιών. Επιπλέον, παράγοντες όπως η αναμενόμενη διάρκεια ζωής και η αξιοπιστία του εξοπλισμού επηρεάζουν τα μακροπρόθεσμα έξοδα της εγκατάστασης.

Κατά το έτος 2025, η εγκατάσταση επεξεργάστηκε συνολικό υδραυλικό φορτίο ίσο με 8.044 m³ όπως προκύπτει από τη διαφορά των αθροιστικών ενδείξεων του Πίνακα 5-6. Η τιμή αυτή είναι σημαντικά χαμηλότερη από τη μέγιστη σχεδιαστική δυναμικότητα των 50 m³/d και αντιστοιχεί σε μέση ημερήσια παροχή περίπου 22 m³/d

για το έτος, ενώ τις ημέρες αιχμής όπως είναι οι γιορτές των Χριστουγέννων, του Πάσχα και το Δεκαπενταύγουστο η μέση ημερήσια παροχή δεν ξεπερνάει τα 40 m³/d.

Η συνολική ετήσια διάρκεια λειτουργίας του βασικού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ανήλθε σε 33.500 ώρες, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς εκτιμήθηκε σε 15 kW, όπως βλέπουμε στον επόμενο πίνακα 4-9.

Πίνακας 4-9 Κύριος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ hour/year	ΙΣΧΥΣ (KW)	KWh/year
Αντλίες ανύψωσης λυμάτων	300	2,3	690
Εσχάρωση	350	0,25	87,5
Αντλίες σταθερής παροχής δεξαμενής εξισορρόπησης	8500	0,75	6375
Υποβρύχιος Αναδευτήρας	8100	1,1	8910
Μονάδα παροχής αέρα δεξαμενής αερισμού	8100	5,5	44500
Μονάδα παροχής αέρα μεμβρανών	4050	4	16200
Αντλίες φίλτρανσης	4100	1,1	4510
Σύνολο	33500		81272,5

Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 4-9, η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους γινομένων ισχύος επί ώρες λειτουργίας:

$$E = \sum(P_i \cdot t_i) = 81.272,5 \text{ kWh/έτος.}$$

όπου: E = ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)

P = συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW)

t = συνολικός χρόνος λειτουργίας (h)

Για το έτος 2025, το συνολικό υδραυλικό φορτίο της εγκατάστασης ανήλθε σε 8.044 m³, ενώ η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμήθηκε, με βάση τις ώρες λειτουργίας και τις ονομαστικές ισχύς του κύριου ηλεκτρομηχανολογικού

εξοπλισμού, σε 81.272,5 kWh. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, η αντίστοιχη ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται σε περίπου 10,1 kWh/m³, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Ειδική κατανάλωση} = 81.272,5 \text{ kWh} / 8.044 \text{ m}^3 \approx 10,1 \text{ kWh/m}^3.$$

Θεωρώντας μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας ίση με 0,18 €/kWh, το ετήσιο ενεργειακό κόστος εκτιμάται σε περίπου 14.630 €.

Ο παραπάνω υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί εκτίμηση της ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης της εγκατάστασης, η οποία προκύπτει από τον υπολογισμό της κατανάλωσης βάσει των ονομαστικών ισχύων και των εκτιμώμενων ωρών λειτουργίας του επιμέρους εξοπλισμού.

Εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια, το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει δαπάνες που σχετίζονται με την προμήθεια χημικών αντιδραστηρίων, τη συντήρηση του εξοπλισμού, τις επισκευές και το ανθρώπινο δυναμικό.

Πίνακας 4-10 Απαιτούμενες ποσότητες χημικών για το έτος 2025

ΠΡΟΪΟΝ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ (Kg)	Μέση τιμή (€)
Υποχλωριώδες Νάτριο	2000	1.00
Πολυχλωριούχο αργίλιο	2000	1.30

Για τις ανάγκες λειτουργίας της εγκατάστασης χρησιμοποιούνται κυρίως υποχλωριώδες νάτριο και πολυχλωριούχο αργίλιο, των οποίων το συνολικό ετήσιο κόστος εκτιμάται σε 4.600 €. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση υποχλωριώδους νατρίου ανέρχεται σε 2.000 kg ετησίως, με αντίστοιχο κόστος 2.000 €, ενώ η κατανάλωση πολυχλωριούχου αργιλίου ανέρχεται επίσης σε 2.000 kg, με συνολικό κόστος 2.600 €.

Τα παραπάνω οικονομικά στοιχεία αποτυπώνουν το βασικό λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται δαπάνες αντικατάστασης εξοπλισμού, έκτακτων επισκευών, απομάκρυνσης ιλύος και αμοιβών προσωπικού.

Η συστηματική παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης και η εφαρμογή στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της οικονομικής βιωσιμότητας των συστημάτων MBR.

5. Μεθοδολογία ελέγχου λειτουργίας

5.1 Αναλύσεις ποιοτικών χαρακτηριστικών λυμάτων

Η ισχύουσα νομοθεσία για μικρές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων με ισοδύναμο πληθυσμό ≤ 2000 κατοίκων είναι η ΚΥΑ 145116/2011 (και οι σχετικές τροποποιήσεις/διευκρινιστικές διατάξεις αυτής, όπως η Εγκύκλιος 145447, η Εγκύκλιος 1589, η ΚΥΑ 191002/2013 και η ΚΥΑ 5673/400/5.3.97) η οποία δεν ορίζει μια καθολική, ελάχιστη συχνότητα υποχρεωτικών δειγματοληψιών.

Η συχνότητα λειτουργικού ελέγχου και παρακολούθησης της συγκεκριμένης εγκατάστασης καθορίζεται ρητά από τους εγκεκριμένους περιβαλλοντικούς όρους της μονάδας. Σύμφωνα με αυτούς, προβλέπεται υποχρεωτική δειγματοληψία ανά δυο μήνες στο επεξεργασμένο απόβλητο.

Για την πλήρη αξιολόγηση της ποιότητας της εκροής, τη διασφάλιση της σταθερής συμμόρφωσης της εγκατάστασης και την τεκμηρίωση της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων, οι μετρήσεις διαχωρίζονται σαφώς ανά σημείο λήψης ως εξής:

Το σημείο δειγματοληψίας του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου είναι η έξοδος-εκροή. Ανά δυο μήνες πραγματοποιούνται αναλύσεις για τις παραμέτρους: CODs, Αιωρούμενα Στερεά (SS), pH, Κολοβακτηρίδια, Ολικό Άζωτο (TN), Ολικός Φώσφορος (TP).

Με σκοπό την πληρέστερη παρακολούθηση της σταθερότητας της εκροής και για να μην περιοριζόμαστε στην αναφορά ενός μεμονωμένου δείγματος, καθιερώθηκε μηνιαία χημική ανάλυση για τις παραπάνω παραμέτρους

Πραγματοποιείται μηνιαία μέτρηση των συγκεντρώσεων των Αιωρούμενων Στερεών Ανάμεικτου Υγρού (MLSS) και των Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών Ανάμεικτου Υγρού (MLVSS). Το σημείο δειγματοληψίας του ανάμεικτου υγρού είναι ο αερόβιος αντιδραστήρας. Η μέτρηση αυτή είναι απαραίτητη για τη ρύθμιση της ηλικίας της ιλύος και τον υπολογισμό της απαιτούμενης αφαίρεσης της πλεονάζουσας ιλύος (περίσσεια ιλύς), ώστε ο αντιδραστήρας να διατηρείται εντός του βέλτιστου λειτουργικού εύρους των 8.000 – 9.000 mg/L.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καταγράφονται σε σελιδομετρημένο τετράδιο. Στο ίδιο τετράδιο καταχωρούνται τυχόν συμβάντα κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων και οι ενέργειες που έγιναν για την επαναφορά του συστήματος σε κανονική λειτουργία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται ενδεικτικά οι αναλύσεις για το έτος 2025.

Πίνακας 5-1 Ανάλυση επεξεργασμένων λυμάτων και ανάμεικτου υγρού δεξ. Αερισμού 2025

Ανάλυση επεξεργασμένων λυμάτων και ανάμεικτου υγρού δεξαμενής αερισμού								
ΕΚΤΕΛΕΣΘΕΙΣΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	BAO ₅ (mg/L)	ΟΛΙΚΟ ΑΖΩΤΟ – N (mg/L)	ΟΛΙΚΟΣ ΦΩΣΦΟΡΟΣ – P (mg/L)	ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ – TSS (mg/L)	Ιόντα Υδρογόνου - Ph 25 °C	Escherichia coli (cfu /100ml)	MLSS (mg/L)	MLVSS (mg/L)
ΜΕΘΟΔΟΣ	XN-11 IN HOUSE METHOD 5280D APHA STANDARD METHODS 21th ED, 2005	XN40 APHA 4500	XN 40 Εσωτερική μέθοδος, υπολογισμική μετά από ξεχωριστό προσδιορισμό APHA 4500-Norg APHA -NO3 APHA 4500-NO2	XN 27 In house method based in APHA: 2005, 2540D, 2-58	XN 01 APHA 4500-H+ 23η ΕΚΔΟΣΗ, 2017	M-01 ISO 9308-1:2014	XN 27 In house method based in APHA: 2005, 2540D, 2-58	In house method based in APHA: 2005, 2540E, 2-71
30/01/2025	5	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	7,8	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	6538	5123
28/02/2025	3	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	8,1	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	6721	5265
31/03/2025	3	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	8	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	6865	5453
28/04/2025	5	3,5	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	8	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	6923	5629
30/05/2025	6	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	8	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	7125	5741
30/06/2025	8	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	7,9	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	7329	5925
31/07/2025	11	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	8	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	4892	3925
29/08/2025	11	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	7,8	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	5026	4069
30/09/2025	9	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	8	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	5227	4148
30/10/2025	6	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	7,9	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	5298	4239
28/11/2025	5	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	7,9	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	5406	4330
29/12/2025	5	3	<2	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	8	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΕ	5568	4587

5.2 Λειτουργικά δεδομένα στοιχείων ελέγχου

Στο παρακάτω φύλλο ελέγχου αναγράφονται τα λειτουργικά δεδομένα της εγκατάστασης. Τα σημαντικότερα λειτουργικά δεδομένα της εγκατάστασης τα συλλέγουμε από την οθόνη συνεχούς παρακολούθησης και λειτουργίας της εγκατάστασης (βλέπε Εικόνα 5-1 και Εικόνα 5-2).

Τα λειτουργικά δεδομένα τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν και ως κρίσιμα λειτουργικά δεδομένα είναι, η υδραυλική παροχή των εισερχομένων λυμάτων σε κυβικά μέτρα (m^3), η υποπίεση στις μεμβράνες σε (mbar), το ύψος των λυμάτων εντός των δεξαμενών του συστήματος σε μέτρα (m), το pH, ενώ το διαλυμένο οξυγόνο των λυμάτων της δεξαμενή αερισμού σε (ppm), το υπολειμματικό χλώριο των επεξεργασμένων λυμάτων με σετ μέτρησις (test KIT) και την συσσώρευση της λάσπης στα λύματα με την βοήθεια κώνου imhoff.

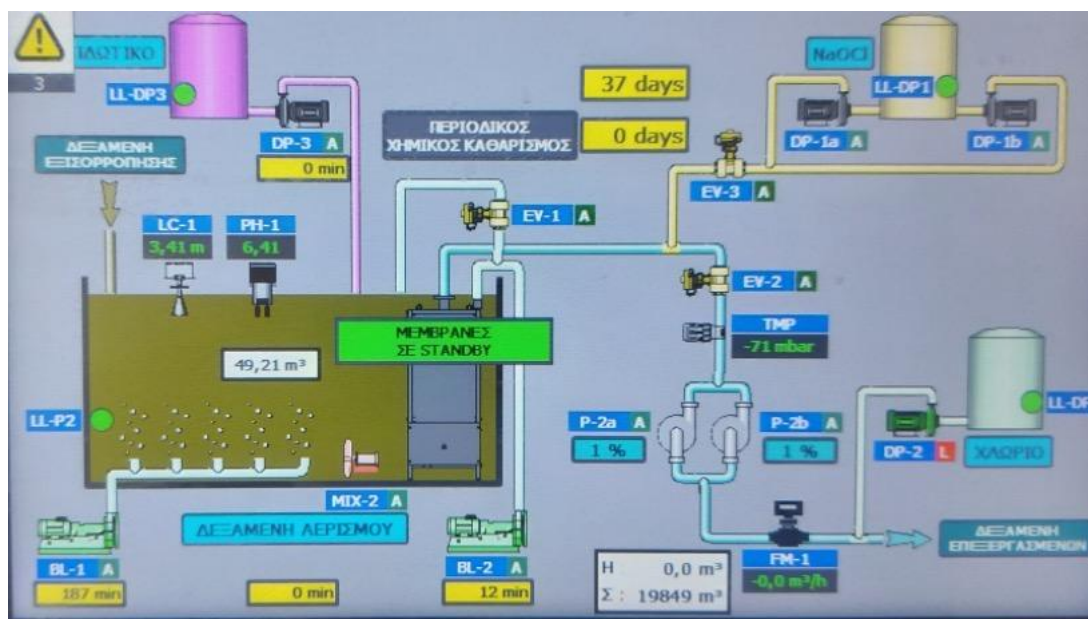
Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας
«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστήρων
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»

Πίνακας 5-2 Φύλλο ελέγχου καταγραφής λειτουργικών δεδομένων

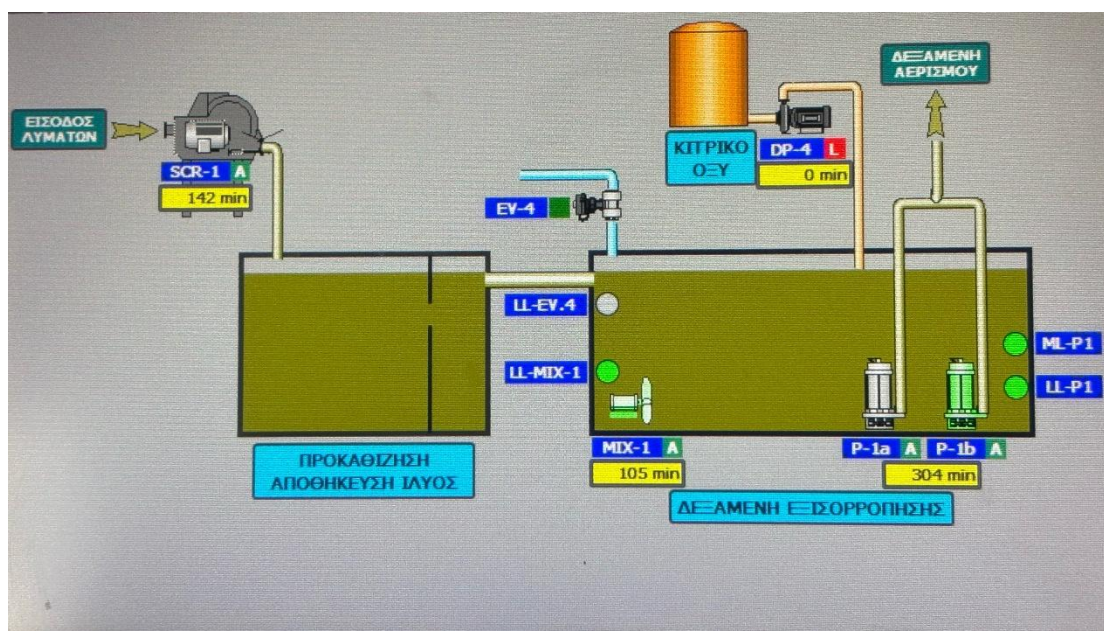
ΛΙΣΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΒΔΟΜΑΔΙΑΙΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ Σ.Ε.Α.					
α/α	ΕΙΔΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ	ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ		ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	
		ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ	ΒΛΑΒΗ		
	1.1 Αυτοκαθαριζόμενη Εσχάρωση				
1	Εσχάρα	ΝΑΙ			
2	Καθαρισμός του εσχαρόκαδου και απομάκρυνση των στερεών.	ΝΑΙ			
	1.2 Δεξαμενή Εξισορρόπησης - Απονιτροποίησης				
3	Υποβρύχιος αναδευτήρας	ΝΑΙ			
4	Αντλία σταθερής παροχής Α	ΝΑΙ			
5	Αντλία σταθερής παροχής Β	ΝΑΙ			
	1.3 Δεξαμενή Βιολογικής επεξεργασίας - Μεμβρανών MBR				
6	Μονάδα παρόχης αέρα βιολογικής επεξεργασίας	ΝΑΙ			
7	Δίκτυο αερισμού	ΝΑΙ			
8	Μετρητής Στάθμης	ΝΑΙ			
9	Μονάδα παρόχης αέρα μεμβρανών	ΝΑΙ			
10	Μετρητής-μεταδότης διαφορικής πίεσης (mbar)	ΝΑΙ		ΤΙΜΗ	
				-371	
11	Μετρητής ροής επεξεργασμένων (m ³)	ΝΑΙ		ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΑΡΟΧΗ	ΩΡΙΑΙΑ ΠΑΡΟΧΗ (m ³)
				34	1,5
12	Αντλία MBR Α	ΝΑΙ			
13	Αντλία MBR Β	ΝΑΙ			
14	Δοσομετρική Αντλία χημικού καθαρισμού Α	ΝΑΙ			
15	Δοσομετρική Αντλία χημικού καθαρισμού Β	ΝΑΙ			
16	Δοχείο αποθήκευσης χημικών καθαρισμού	ΝΑΙ			
					4.5 kg Χλώριο
	1.4 Χημική κατακρήμνιση φωσφόρου				
17	Δοσομετρική αντλία κροκιδωτικού	ΝΑΙ			
18	Δοχείο αποθήκευσης κροκιδωτικού	ΝΑΙ		ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΧΗΜΙΚΟΥ	20 kg
19	Όργανο μέτρησης PH	ΝΑΙ		ΤΙΜΗ	8 pH
	1.5 Δεξαμενή Χλωρίωσης επεξεργασμένων				
20	Δοσομετρική αντλία χλωρίου	ΝΑΙ			
21	Δοχείο αποθήκευσης χλωρίου	ΝΑΙ		ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΧΗΜΙΚΟΥ	30 kg
	1.6 Ηλεκτρικός πίνακας		ΣΦΑΛΜΑ ALARM		
22	Οθόνη HMI		ΒΛΑΒΗ ΟΘΟΝΗΣ		
23	Έλεγχος του υπολειμματικού χλωρίου με το test kit (0,5 – 1ppm) ανιχνεύσεως και επέμβαση στην ρύθμιση της δοσομετρικής εφόσον απαιτηθεί.		ΤΙΜΗ		
			0.3 ppm		
24	Εντοπισμός ενοχλητικών οσμών.		ΟΧΙ		
25	Οπτικός έλεγχος των αντλιών ανακυκλοφορίας και των επεξεργασμένων προς αποφυγή ολικών ή μερικών εμφράξεων.	ΝΑΙ			
26	Καθαρισμός του εσχαρόκαδου και απομάκρυνση των στερεών.	ΝΑΙ			
27	Οπτικός έλεγχος καθαρότητας των επεξεργασμένων λυμάτων και λήψη φωτογραφίας	ΝΑΙ			ΔΙΑΥΓΕΣ
28	Έλεγχος του διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού και ρυθμίσεις του χρόνου λειτουργίας του φυσητήρα αέρα.		ΤΙΜΗ		
			2 ppm		
29	Χημικός καθαρισμός των μεμβρανών και προετοιμασία του χημικού για την επόμενη φορά.	ΝΑΙ			
30	Οπτικός Έλεγχος του λιτοσυλλέκτη.	ΝΑΙ			

5.2.1 Οθόνη παρακολούθησης και λειτουργίας εγκατάστασης

Από την κεντρική οθόνη χειρισμού προγράμματος SCADA, ο χειριστής της μονάδας μπορεί να παρακολουθεί ανά πάσα ώρα και στιγμή την κατάσταση της μονάδας και να πραγματοποιεί τους απαραίτητους χειρισμούς για τη λειτουργία της.



Εικόνα 5-1 Οθόνη παρακολούθησης και λειτουργίας αερισμού μεμβρανών



Εικόνα 5-2 Οθόνη παρακολούθησης και λειτουργίας εισόδου λυμάτων

5.2.2 Μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου στο μικτό υγρό

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου προσδιορίστηκε με το χρωματομετρικό kit CHEMetrics K-7512 CHEMets, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο Indigo Carmine και διαθέτει περιοχή μέτρησης 1–12 mg/L O₂. Η ανάγνωση πραγματοποιείται με οπτική σύγκριση της αναπτυσσόμενης χρωματικής έντασης με πρότυπο χρωματικό συγκριτή. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η ακρίβεια των CHEMets αντιστοιχεί σε ± 1 διαβάθμιση του χρωματικού συγκριτή υπό ιδανικές εργαστηριακές συνθήκες. Ως εκ τούτου, οι συγκεκριμένες μετρήσεις θεωρούνται κατάλληλες κυρίως για την παρακολούθηση της τάσης και του επιπέδου του διαλυμένου οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού και όχι ως μετρήσεις υψηλής αναλυτικής ακρίβειας.

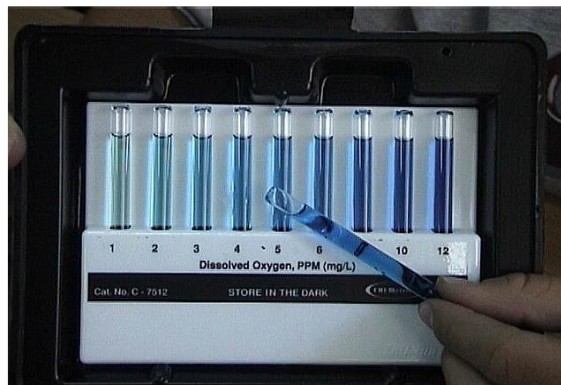
Η διαδικασία μέτρησης έχει ως εξής :

- Παίρνουμε δείγμα ανάμεικτων υγρών αποβλήτων από την δεξαμενή αερισμού.
- Γεμίζουμε το διαβαθμισμένο ποτηράκι που θα βρούμε μέσα στην θήκη του test kit, μέχρι την ένδειξη 25ml.
- Σπάμε μέσα στο δείγμα την ειδική αμπούλα μέτρησης του διαλυμένου οξυγόνου και την κρατάμε μέσα στο δείγμα, μέχρι να διαμορφωθεί ο χρωματισμός του αντιδραστήριου μέσα στην αμπούλα.



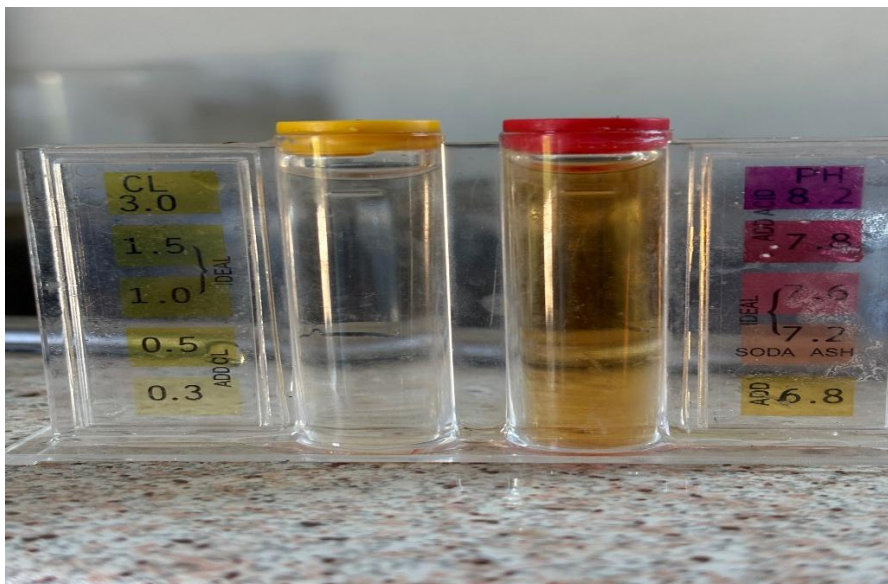
Εικόνα 5-3 Σπάσιμο αμπούλας στο ανάμεικτο υγρό

- Βγάζουμε την αμπούλα από το δείγμα και συγκρίνουμε το χρώμα της με το χρωματομετρικό δείγμα που υπάρχει μέσα στο test kit.



Εικόνα 5-4 Χρωματομετρικός έλεγχος δείγματος

5.2.3 Μέτρηση υπολειμματικού χλωρίου επεξεργασμένων λυμάτων.



Εικόνα 5-5 Test kit μέτρησης υπολειμματικού χλωρίου και pH.

Με την χρήση ενός απλού χρωματομετρικού συγκριτή, μετράμε ταυτόχρονα το υπολειμματικό χλωρίου και το pH. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να ρυθμίσουμε την δοσομετρική αντλία χλωρίωσης των επεξεργασμένων καθαρών λυμάτων καθώς και τον έλεγχο του pH.

5.2.4 Μέτρηση ποσότητας της λάσπης

Με την βοήθεια κώνου Imhoff λαμβάνεται δείγμα μικτού υγρού από την δεξαμενή αερισμού και το αφήνουμε να καθιζήσει για μια 1 h . Είναι πολύ σημαντικό κατά την δειγματοληψία να λειτουργεί ο φυσητήρας αερισμού. Το αποτέλεσμα της δειγματοληψίας χρησιμοποιείται ως λειτουργικός δείκτης της καθιζησιμότητας και της συμπεριφοράς της ιλύος.

Σε καμία περίπτωση όμως τα αποτελέσματα της παραπάνω δειγματοληψίας δεν μπορεί να αντικαταστήσει την μηνιαία μέτρηση των συγκεντρώσεων των Αιωρούμενων Στερεών Ανάμεικτου Υγρού (MLSS) και των Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών Ανάμεικτου Υγρού (MLVSS) η οποία γίνεται σε πιστοποιημένο εργαστήριο.



Εικόνα 5-6 Κώνος Imhoff με μικτό υγρό.

5.2.5 Ανάλυση λειτουργικών δεδομένων

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα λειτουργικά δεδομένα της εγκατάστασης για τα έτη 2022 έως 2025.

Η διερεύνηση των αποτελεσμάτων εστιάζει στις επιπτώσεις που προκαλούν οι διακυμάνσεις της κυκλοφορίας και της επισκεψιμότητας στις εγκαταστάσεις των Σταθμών Εξυπηρέτησης Αυτοκινητιστών (ΣΕΑ), οι οποίες σχετίζονται με εποχικές μεταβολές, εορταστικές περιόδους και αυξημένη τουριστική δραστηριότητα. Εξετάζονται χαρακτηριστικές χρονικές περίοδοι, όπως οι θερινοί μήνες, οι εορτές των Χριστουγέννων και του Πάσχα, καθώς και περίοδοι έντονης μετακίνησης του πληθυσμού.

Παράλληλα, αξιολογείται ο βαθμός καταπόνησης των μεμβρανών λόγω της αυξημένης εισροής λυμάτων και διερευνώνται οι συνέπειες που αυτή επιφέρει στη συνολική λειτουργία της εγκατάστασης. Η συσχέτιση των λειτουργικών παραμέτρων με τις μεταβολές του υδραυλικού φορτίου επιτρέπει την αναγνώριση των συνθηκών που επηρεάζουν την αποδοτικότητα των μεμβρανών, την ανάπτυξη φαινομένων έμφραξης (fouling) και τη γενικότερη επιχειρησιακή συμπεριφορά της μονάδας.

Στον Πίνακα 5-3 υπολογίζονται βασικά στατιστικά στοιχεία για το 2022 όπως προκύπτουν από την συλλογή των λειτουργικών στοιχείων του Πίνακα 5-4.

Πίνακας 5-3 Στατιστικά στοιχεία 2022

Παράμετρος	Υποπίεση μεμβρανών (mbar)	Υδραυλική φόρτιση (m ³ /ημέρα)
Μέση τιμή	-297,77	16,65
Διάμεσος	-290,50	16,86
Τυπική απόκλιση	24,01	10,96
Ελάχιστη τιμή	-247	1,90
Μέγιστη τιμή	-345	58,0

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας
«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστήρων
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»

Πίνακας 5-4 Λειτουργικά στοιχεία 2022

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΥΠΟΠΙΞΗ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ 2022	ΥΨΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	ΠΑΡΟΧΗ ΕΞΟΔΟΥ	ΩΡΙΑΙΑ ΠΑΡΟΧΗ	pH
3/1/2022	-279	3,4	73366	2	8
10/1/2022	-281	3,41	73406	2	8
17/1/2022	-288	3,4	73440	2	8
27/1/2022	-294	3,39	73459	2	8
2/2/2022	-293	3,4	73481	2	8
11/2/2022	-292	3,4	73497	2	8
18/2/2022	-290	3,42	73511	2	8
26/2/2022	-287	3,4	73535	2	8
2/3/2022	-286	3,43	73564	2	8
11/3/2022	-283	3,4	73590	2	8
19/3/2022	-288	3,34	73607	2	8
25/3/2022	-290	3,38	73628	2	8
2/4/2022	-294	3,4	73659	2	8
8/4/2022	-291	3,41	73677	2	8
15/4/2022	-287	3,39	73702	2	8
26/4/2022	-286	3,43	73912	2	8
2/5/2022	-287	3,38	74092	2	8
9/5/2022	-293	3,4	74220	2	8
16/5/2022	-286	3,41	74325	2	8
23/5/2022	-288	3,42	74414	2	8
30/5/2022	-291	3,38	74611	2	8
6/6/2022	-282	3,41	74723	2	8
13/6/2022	-284	3,47	74849	2	8
20/6/2022	-287	3,42	74981	2	8
27/6/2022	-281	3,45	75111	2	8
4/7/2022	-278	3,38	75246	2	8
11/7/2022	-275	3,41	75394	2	8
18/7/2022	-271	3,48	75532	2	8
25/7/2022	-269	3,52	75672	2	8
1/8/2022	-247	3,64	75827	2	8
8/8/2022	-247	3,64	76017	2	8
18/8/2022	-279	3,6	76340	2	8
26/8/2022	-293	3,64	76556	2	8
30/8/2022	-293	3,6	76674	2	8
4/9/2022	-308	3,53	76835	2	8
9/9/2022	-308	3,53	76961	2	8
23/9/2022	-326	3,37	77230	2	8
30/9/2022	-320	3,37	77348	2	8
7/10/2022	-317	3,37	77426	2	8
14/10/2022	-309	3,37	77518	2	8
22/10/2022	-326	3,36	77620	2	8
24/10/2022	-333	3,38	77736	2	8
4/11/2022	-328	3,37	77854	2	8
12/11/2022	-330	3,36	77959	2	8
18/11/2022	-330	3,33	78037	2	8
25/11/2022	-333	3,42	78133	2	8
11/12/2022	-343	3,38	78382	2	8
18/12/2022	-340	3,38	78527	2	8
22/12/2022	-340	3,37	78612	2	8
28/12/2022	-345	3,4	78794	2	8

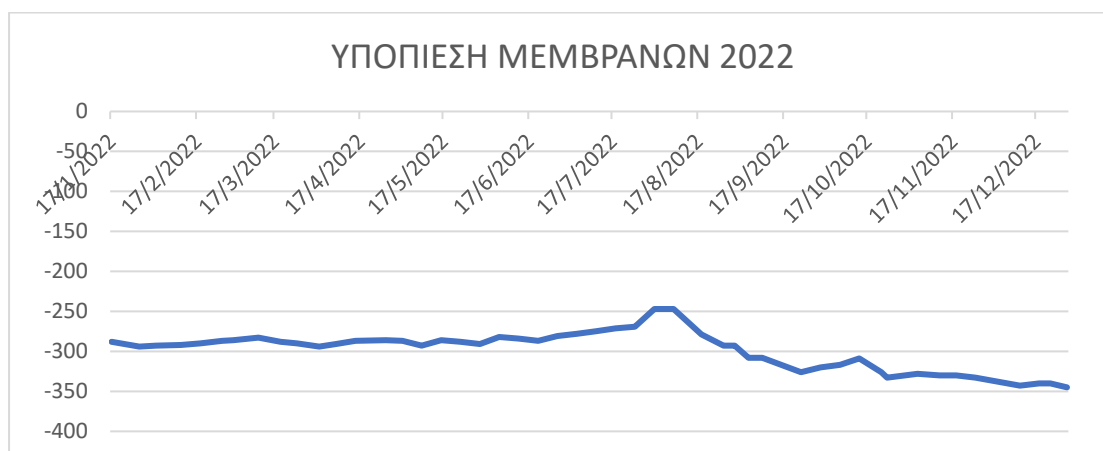


Γράφημα: 5-1 Ετήσια παροχή (m³) 2022.

Κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται αυξημένη υδραυλική φόρτιση, η οποία συνοδεύεται από αύξηση της στάθμης στη δεξαμενή αερισμού. Ειδικότερα, η στάθμη από τιμές περίπου 3,4–3,5 m κατά το πρώτο εξάμηνο του έτους αυξάνεται σε περίπου 3,6–3,64 m κατά τον Αύγουστο. Παράλληλα, οι υποπίεσεις κατά τον Ιούλιο και το πρώτο δεκαήμερο του Αυγούστου κυμαίνονται από -269 έως -247 mbar και, επομένως, δεν υπερβαίνουν το όριο των -300 mbar ως προς το απόλυτο μέτρο της υποπίεσης.

Αντίθετα, από τον Σεπτέμβριο παρατηρείται σαφέστερη επιδείνωση της απαιτούμενης υποπίεσης. Οι τιμές διαμορφώνονται αρχικά στα -308 mbar και στη συνέχεια φτάνουν έως -333 mbar τον Οκτώβριο–Νοέμβριο και έως -345 mbar τον Δεκέμβριο. Η χρονική αυτή εξέλιξη υποδηλώνει αυξημένη αντίσταση στη διήθηση κατά το δεύτερο εξάμηνο του έτους και είναι συμβατή με την πιθανή προοδευτική ανάπτυξη φαινομένων fouling στις μεμβράνες.

Η συμπεριφορά των μεμβρανών εκτός της υδραυλικής φόρτισης επηρεάζεται και από άλλους λειτουργικούς παράγοντες, όπως η συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων στερεών, η θερμοκρασία, η ηλικία της λάσπης, οι συνθήκες αερισμού και η συσσώρευση επικαθίσεων στην επιφάνεια των μεμβρανών.



Γράφημα: 5-2 Υποπίεση μεμβρανών (mbar) 2022

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι πλέον αρνητικές τιμές υποπίεσης καταγράφονται κατά το τελευταίο τρίμηνο του 2022 και ειδικότερα τον Δεκέμβριο, με μέγιστη απόλυτη τιμή τα -345 mbar στις 28/12/2022. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η αυξημένη απαίτηση υποπίεσης δεν αποτελεί αποκλειστικά φαινόμενο της θερινής περιόδου αλλά εμφανίζεται και σε μεταγενέστερα στάδια λειτουργίας, γεγονός που ενισχύει την υπόθεση προοδευτικής επιβάρυνσης των μεμβρανών και ανάπτυξης fouling.

Στον Πίνακα 5-5 υπολογίζονται βασικά στατιστικά στοιχεία για το 2023 όπως προκύπτουν από την συλλογή των λειτουργικών στοιχείων του Πίνακα 5-6.

Πίνακας 5-5 Στατιστικά στοιχεία 2023

Παράμετρος	Υποπίεση μεμβρανών (mbar)	Υδραυλική φόρτιση ($\text{m}^3/\text{ημέρα}$)
Μέση τιμή	-314,27	16,65
Διάμεσος	-313,00	15,15
Τυπική απόκλιση	17,71	9,82
Ελάχιστη τιμή	-276	7,00
Μέγιστη τιμή	-350	29,00

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας
«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστήρων
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»

Πίνακας 5-6 Λειτουργικά στοιχεία 2023

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΥΠΟΠΙΕΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ	ΥΨΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	ΠΑΡΟΧΗ ΕΞΟΔΟΥ	ΕΒΔΟΜΑΔΙΑ ΠΑΡΟΧΗ	ΩΡΙΑΙΑ ΠΑΡΟΧΗ	pH
3/1/2023	-340	3,36	78928	134	2	8,3
8/1/2023	-350	3,4	79080	152	2	8,3
15/1/2023	-338	3,39	79235	155	2	8,3
20/1/2023	-334	3,36	79336	101	2	8,3
5/2/2023	-344	3,38	79673	337	2	8,3
11/2/2023	-314	3,6	79744	71	2	8,3
17/2/2023	-343	3,38	79867	123	2	8,3
24/2/2023	-343	3,37	80020	153	2	8,3
5/3/2023	-345	3,37	80274	254	2	8,3
14/3/2023	-345	3,37	80525	251	2	8,3
26/3/2023	-345	3,37	80963	438	2	8
31/3/2023	-298	3,39	80993	30	2	8
7/4/2023	-315	3,4	81071	78	2	8,3
13/4/2023	-303	3,4	81138	67	2	8
21/4/2023	-324	3,37	81353	215	2	8,3
28/4/2023	-311	3,38	81461	108	2	8,3
14/5/2023	-305	3,39	81733	272	2	8
19/5/2023	-316	3,37	81801	68	2	8
25/5/2023	-316	3,37	81917	116	2	8,1
31/5/2023	-307	3,38	82073	156	2	8
4/6/2023	-311	3,38	82133	60	2	8
12/6/2023	-309	3,38	82204	71	2	8
23/6/2023	-313	3,39	82400	196	2	8
30/6/2023	-306	3,39	82558	158	2	8
5/7/2023	-300	3,38	82659	101	2	8
16/7/2023	-304	3,37	82921	262	2	8
21/7/2023	-294	3,39	83028	107	2	8
28/7/2023	-296	3,38	83205	177	2	8,1
4/8/2023	-315	3,6	83438	233	2,5	8,1
7/8/2023	-295	3,57	83702	264	2,5	8,3
20/8/2023	-313	3,37	83973	271	2,5	8,3
26/8/2023	-313	3,39	84119	146	2,5	8,3
8/9/2023	-313	3,38	84500	381	2	8,3
14/9/2023	-317	3,39	84680	180	2	8,3
19/9/2023	-320	3,4	84790	110	2	8,3
28/9/2023	-301	3,39	84890	100	2	8,1
3/10/2023	-303	3,4	84924	34	2	8,3
9/10/2023	-304	3,4	85014	90	2	8
14/10/2023	-296	3,4	85082	68	2	8
22/10/2023	-276	3,6	85175	93	2	8,1
3/11/2023	-276	3,43	85353	178	2	8,1
9/11/2023	-307	3,39	85454	101	2	8,1
15/11/2023	-304	3,38	85544	90	2	8,1
24/11/2023	-298	3,54	85619	75	2	8
6/12/2023	-308	3,39	85811	192	2	8
15/12/2023	-313	3,4	85933	122	2	8
24/12/2023	-323	3,38	86110	177	2	8
28/12/2023	-322	3,34	86191	81	2	8

Η χρονική εξέλιξη της υποπίεσης των μεμβρανών κατά το 2023 παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις, με τις καταγεγραμμένες τιμές να κυμαίνονται από -350 έως -276 mbar. Η μέση τιμή της υποπίεσης ανέρχεται σε $-314,3$ mbar, ενώ η διάμεσος διαμορφώνεται στα -313 mbar και η τυπική απόκλιση στα $17,7$ mbar.



Γράφημα: 5-3 Ετήσια παροχή (m³) 2023.

Οι υψηλότερες τιμές υποπίεσης σε απόλυτο μέγεθος καταγράφονται κυρίως κατά το πρώτο μέρος του έτους. Ενδεικτικά, στις 8/1/2023 καταγράφηκε τιμή -350 mbar, ενώ κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο παρατηρούνται επανειλημμένα τιμές μεταξύ -343 και -345 mbar. Αντίθετα, κατά το τελευταίο τρίμηνο του έτους παρατηρούνται σε αρκετές περιπτώσεις μικρότερες τιμές σε απόλυτο μέγεθος, με ελάχιστη υποπίεση -276 mbar στις 22/10/2023 και 3/11/2023.

Η αύξηση της υποπίεσης δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στην αύξηση της παροχής, καθώς επηρεάζεται και από άλλες λειτουργικές παραμέτρους, όπως η συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά της ενεργού ιλύος, η θερμοκρασία, η κατάσταση της επιφάνειας των μεμβρανών, ο αερισμός των μεμβρανών και η συχνότητα και αποτελεσματικότητα των καθαρισμών.

Συνεπώς, τα δεδομένα του 2023 καταδεικνύουν ότι η λειτουργία των μεμβρανών πραγματοποιήθηκε για σημαντικό μέρος του έτους σε επίπεδα υποπίεσης μεγαλύτερα από το ενδεικτικό όριο των -300 mbar. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη

αυξημένης αντίστασης στη διήθηση και υποδεικνύει την ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης της εξέλιξης της υποπίεσης σε συνδυασμό με την παροχή και τις λοιπές λειτουργικές παραμέτρους της εγκατάστασης.



Γράφημα: 5-4 Υποπίεση μεμβρανών (mbar) 2023.

Στον Πίνακα 5-7 υπολογίζονται βασικά στατιστικά στοιχεία για το 2024 όπως προκύπτουν από την συλλογή των λειτουργικών στοιχείων του Πίνακα 5-8.

Πίνακας 5-7 Στατιστικά στοιχεία 2024

Παράμετρος	Υποπίεση μεμβρανών (mbar)	Υδραυλική φόρτιση (m ³ /ημέρα)
Μέση τιμή	-319,09	20,07
Διάμεσος	-318,00	19,00
Τυπική απόκλιση	19,22	10,31
Ελάχιστη τιμή	-282	10,75
Μέγιστη τιμή	-390	45,00

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας
«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστήρων
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»

Πίνακας 5-8 Λειτουργικά στοιχεία 2024

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΥΠΟΠΙΕΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ	ΥΨΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	ΠΑΡΟΧΗ ΕΞΟΔΟΥ	ΩΡΙΑΙΑ ΠΑΡΟΧΗ	pH
7/1/2024	-322	3,39	86390	2	7,3
12/1/2024	-318	3,38	86443	2	7,3
21/1/2024	-320	3,38	86559	2	7,3
28/1/2024	-322	3,4	86695	2	7,3
2/2/2024	-320	3,4	86784	2	7,3
16/2/2024	-317	3,38	86854	2	7,4
25/2/2024	-321	3,4	86976	2	7,2
7/3/2024	-315	3,4	87122	2	7,2
19/3/2024	-318	3,4	87320	2	7,2
28/3/2024	-319	3,4	87465	2	7,2
8/4/2024	-322	3,41	87681	2	7,4
16/4/2024	-321	3,41	87791	2	7,4
22/4/2024	-316	3,35	87958	2	7,6
27/4/2024	-320	3,35	88026	2	7,5
2/5/2024	-317	3,4	88097	2	7,6
12/5/2024	-316	3,4	88410	2	7,7
28/5/2024	-309	3,4	88716	2	7,7
7/6/2024	-295	3,6	88900	2	7,7
14/6/2024	-309	3,39	88979	2	7,7
24/6/2024	-311	3,39	89252	2	7,8
29/6/2024	-308	3,39	89380	2	7,8
5/7/2024	-310	3,4	89509	2	7,8
11/7/2024	-303	3,41	89671	2	7,7
19/7/2024	-308	3,41	89965	2	8
26/7/2024	-282	3,6	90049	2	8
2/8/2024	-309	3,6	90277	2	8
8/8/2024	-308	3,41	90477	2	8
18/8/2024	-287	3,61	90820	2	8,3
24/8/2024	-291	3,61	91021	2	8,3
14/9/2024	-318	3,4	91555	2	8,1
28/9/2024	-320	3,39	91819	1,5	8
3/10/2024	-330	3,38	91909	1,5	8
11/10/2024	-326	3,38	92044	1,5	7,9
17/10/2024	-328	3,41	92130	1,5	7,9
26/10/2024	-331	3,41	92303	1,5	8
2/11/2024	-365	3,05	92446	1,5	8
7/11/2024	-348	3,42	92510	1,5	8,1
18/11/2024	-329	3,4	92695	1,5	8
22/11/2024	-290	3,41	92858	1,5	8
6/12/2024	-335	3,42	93023	1,5	8
15/12/2024	-350	3,42	93108	1,5	8
23/12/2024	-327	3,42	93276	1,5	8,1
29/12/2024	-390	3,43	93390	1,5	8,1



Γράφημα: 5-5 Ετήσια παροχή (m³) 2024

Η κατανομή της παροχής για το έτος 2024 αποτυπώνει την επίδραση των εποχικών μεταβολών στη λειτουργία της εγκατάστασης. Οι τιμές παρουσιάζουν αισθητές διακυμάνσεις, οι οποίες σχετίζονται κυρίως με τις μεταβολές της κυκλοφορίας και της επισκεψιμότητας στις εγκαταστάσεις των ΣΕΑ.

Οι μεγαλύτερες παροχές καταγράφονται κατά τους μήνες Μάιο και Αύγουστο, με τον Αύγουστο να εμφανίζει τη μέγιστη τιμή του έτους. Αυξημένα επίπεδα παρατηρούνται επίσης κατά τον Απρίλιο και τον Ιούλιο, γεγονός που συνδέεται τόσο με τις μετακινήσεις της πασχαλινής περιόδου όσο και με την αυξημένη κυκλοφορία κατά τους θερινούς μήνες.

Αντίθετα, οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται κυρίως τον Φεβρουάριο και τον Σεπτέμβριο. Η υποχώρηση της παροχής μετά την κορύφωση του Αυγούστου αντανάκλα τη σταδιακή επιστροφή της εγκατάστασης σε συνθήκες μειωμένης υδραυλικής επιβάρυνσης.

Οι διακυμάνσεις αυτές επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργία του συστήματος MBR, καθώς οι περίοδοι υψηλής φόρτισης συνεπάγονται αυξημένες απαιτήσεις διήθησης και μεγαλύτερη καταπόνηση των μεμβρανών.



Γράφημα: 5-6 Υποπίεση μεμβρανών (mbar) 2024

Το διάγραμμα της υποπίεσης για το 2024 παρουσιάζει μια σχετικά σταθερή συμπεριφορά κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους, με τις τιμές να κινούνται κυρίως μεταξύ -300 και -350 mbar. Κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται αύξηση της απαιτούμενης υποπίεσης, η οποία συνδέεται με τις αυξημένες παροχές λυμάτων που καταγράφονται τους ίδιους μήνες. Η λειτουργία των μεμβρανών υπό υψηλότερα υδραυλικά φορτία οδηγεί σε αύξηση της διαμεμβρανικής πίεσης (TMP) και εντονότερη συσσώρευση στερεών στην επιφάνειά τους. Για σημαντικό χρονικό διάστημα οι τιμές παραμένουν υψηλότερες από το επιθυμητό όριο λειτουργίας των -300 mbar, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη αντίσταση στη διήθηση και σταδιακή ανάπτυξη φαινομένων έμφραξης. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται προς το τέλος του έτους, όπου καταγράφονται τιμές που προσεγγίζουν ή υπερβαίνουν τα -380 έως -400 mbar.

Η συνολική εξέλιξη της υποπίεσης επιβεβαιώνει τη στενή συσχέτισή της με τις μεταβολές του υδραυλικού φορτίου και αναδεικνύει τη σημασία της συστηματικής παρακολούθησης, καθώς και της εφαρμογής κατάλληλων διαδικασιών καθαρισμού και συντήρησης, για τη διατήρηση της αποδοτικότητας του συστήματος MBR.

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας
«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστήρων
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»

Πίνακας 5-9 Λειτουργικά στοιχεία 2025.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΥΠΟΠΙΕΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ	ΥΨΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	ΠΑΡΟΧΗ ΕΞΟΔΟΥ	ΩΡΙΑΙΑ ΠΑΡΟΧΗ	pH
3/1/2025	-390	3,43	93491	1,5	8
11/1/2025	-353	3,43	93667	1,5	8
18/1/2025	-346	3,42	93776	1,5	8
27/1/2025	-342	3,43	93910	1,5	7,9
8/2/2025	-397	3,42	94104	1,5	8
17/2/2025	-387	3,41	94241	1,5	8
22/2/2025	-397	3,42	94273	1,5	8
28/2/2025	-392	3,42	94318	1,5	8
10/3/2025	-396	3,43	94393	1,5	8,1
15/3/2025	-388	3,43	94475	1,5	8,1
28/3/2025	-374	3,44	94892	1,5	8,1
7/4/2025	-371	3,42	95034	1,5	8
12/4/2025	-382	3,42	95131	1,5	8
17/4/2025	-382	3,52	95243	1,5	8
24/4/2025	-366	3,62	95436	1,5	8
2/5/2025	-367	3,62	95690	1,5	8
15/5/2025	-320	4,2	95933	1,5	8
23/5/2025	-389	3,4	96129	1,5	8
31/5/2025	-395	3,42	96350	1,5	8
7/6/2025	-316	3,61	96520	1,5	7,9
14/6/2025	-385	3,61	96680	1,5	8
23/6/2025	-395	3,62	96910	1,5	8
27/6/2025	-399	3,61	97030	1,5	8
3/7/2025	-345	3,6	97214	1,5	8
9/7/2025	-220	3,4	97394	1,5	8
17/7/2025	-222	3,43	97563	1,5	8
23/7/2025	-238	3,41	97742	2,5	8
1/8/2025	-243	3,41	97944	2,5	8
7/8/2025	-322	3,41	98211	2,5	8
14/8/2025	-243	3,39	98470	2,5	7,9
19/8/2025	-240	3,4	98668	2,5	8,1
27/8/2025	-243	3,39	98975	2,5	8,1
5/9/2025	-245	3,4	99275	2,5	8,3
11/9/2025	-238	3,4	99475	2,5	8,3
19/9/2025	-244	3,38	99668	2,5	8,1
28/9/2025	-237	3,38	99872	2,5	8,1
4/10/2025	-221	3,65	99963	2,5	8,2
11/10/2025	-246	3,46	100122	2,5	8
18/10/2025	-240	3,44	100264	2,5	8
27/10/2025	-241	3,4	100441	2,5	8
1/11/2025	-243	3,44	100543	2,5	8
11/11/2025	-247	3,43	100726	2,5	8
15/11/2025	-245	3,5	100781	2,5	8
23/11/2025	-254	3,53	100903	2,5	8
1/12/2025	-248	3,52	100998	2,5	8
6/12/2025	-244	3,49	101076	2,5	8
14/12/2025	-243	3,36	101189	2,5	8
20/12/2025	-230	3,6	101250	2,5	8
29/12/2025	-237	3,48	101535	2,5	8,1

Στον παρακάτω Πίνακα 5-10 υπολογίζονται βασικά στατιστικά στοιχεία για το 2025 όπως προκύπτουν από την συλλογή των λειτουργικών στοιχείων του Πίνακα 5-9.

Πίνακας 5-10 Στατιστικά στοιχεία 2025.

Παράμετρος	Υποπίεση μεμβρανών (mbar)	Υδραυλική φόρτιση (m ³ /ημέρα)
Μέση τιμή	-307,10	22,47
Διάμεσος	-316,00	22,20
Τυπική απόκλιση	69,54	8,85
Ελάχιστη τιμή	-220	6,40
Μέγιστη τιμή	-399	44,50



Γράφημα: 5-7 Ετήσια παροχή (m³) 2025

Τα δεδομένα του 2025 παρουσιάζουν συνολική αύξηση της παροχής σε σχέση με το 2024, με έντονη εποχική μεταβλητότητα. Η αθροιστική παροχή του Πίνακα 5-9 αυξάνεται από 93.491 m³ στις αρχές Ιανουαρίου σε 101.535 m³ στο τέλος Δεκεμβρίου, δηλαδή κατά περίπου 8.044 m³.

Κατά το δεύτερο εξάμηνο παρατηρείται σταδιακή αποκλιμάκωση της παροχής μετά την κορύφωση του Αυγούστου, χωρίς όμως να επανέρχεται στα χαμηλά επίπεδα που χαρακτηρίζουν τους πρώτους μήνες του έτους. Οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται κυρίως τον Ιανουάριο, τον Φεβρουάριο και τον Νοέμβριο.

Η αυξημένη φόρτιση που χαρακτηρίζει το 2025 συνεπάγεται υψηλότερες απαιτήσεις λειτουργίας για τη μονάδα επεξεργασίας και ειδικότερα για το σύστημα μεμβρανών. Κατά τις περιόδους αιχμής αυξάνεται η πιθανότητα ανάπτυξης φαινομένων έμφραξης, λόγω της μεγαλύτερης κατακράτησης στερεών και της αυξημένης επιβάρυνσης του εξοπλισμού. Συνεπώς, η εφαρμογή προληπτικών ενεργειών συντήρησης και η συνεχής αξιολόγηση των λειτουργικών παραμέτρων αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τη διατήρηση της αποδοτικής λειτουργίας της εγκατάστασης.



Γράφημα: 5-8 Υποπίεση μεμβρανών (mbar) 2025

Η εξέλιξη της υποπίεσης κατά το 2025 παρουσιάζει δύο διακριτές λειτουργικές φάσεις, γεγονός που αντανακλά σημαντικές μεταβολές στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Κατά το πρώτο εξάμηνο, οι τιμές κυμαίνονται σε σχετικά υψηλά επίπεδα, μεταξύ περίπου -320 και -400 mbar, υποδεικνύοντας αυξημένη αντίσταση στη διήθηση και μεγαλύτερη επιβάρυνση των μεμβρανών. Η συμπεριφορά αυτή είναι

πιθανό να συνδέεται με τη συσσώρευση στερεών και βιολογικού υλικού στην επιφάνεια των μεμβρανών, καθώς και με τις αυξημένες απαιτήσεις επεξεργασίας.

Από τις αρχές Ιουλίου παρατηρείται αισθητή βελτίωση της λειτουργικής εικόνας, καθώς οι τιμές της υποπίεσης μειώνονται σημαντικά και διαμορφώνονται κυρίως μεταξύ -230 και -250 mbar. Η μεταβολή αυτή υποδηλώνει μείωση της αντίστασης στη διήθηση και σχετίζεται με την αντικατάσταση των ρυπασμένων μεμβρανών με καινούργιες μεμβράνες. Παρά την παροδική αύξηση της υποπίεσης κατά τον Αύγουστο, οι τιμές επανέρχονται γρήγορα στα βελτιωμένα επίπεδα και παραμένουν σχετικά σταθερές έως το τέλος του έτους.

Κατά το δεύτερο εξάμηνο καταγράφονται μικρότερες διακυμάνσεις, στοιχείο που υποδηλώνει ομαλή λειτουργία του συστήματος MBR και αποτελεσματικό περιορισμό των φαινομένων έμφραξης, ακόμη και σε περιόδους αυξημένης υδραυλικής φόρτισης.

Συνολικά, τα δεδομένα του 2025 δείχνουν ότι, παρά την αυξημένη παροχή λυμάτων, η λειτουργία του συστήματος παρέμεινε ικανοποιητική. Η σημαντική μείωση της υποπίεσης μετά τα μέσα του έτους και η διατήρησή της σε σταθερά επίπεδα αποτελούν ένδειξη αποτελεσματικής συντήρησης του εξοπλισμού. Η συστηματική παρακολούθηση της υποπίεσης εξακολουθεί να αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων και τη διασφάλιση της υψηλής απόδοσης της εγκατάστασης.

6. Περιγραφή μονάδας άρδευσης

6.1 Δεξαμενή άρδευσης

Η επεξεργασμένη εκροή που προορίζεται για άρδευση του χώρου πρασίνου αποθηκεύεται σε δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης ωφέλιμου όγκου 24 m³ και στη συνέχεια οδηγείται στο δίκτυο άρδευσης, σύμφωνα με τον σχεδιασμό της εγκατάστασης.

6.2 Αντλιοστάσιο άρδευσης

Το δίδυμο αντλιοστάσιο της άρδευσης αποτελείται από δύο πολυβάθμιες αντλίες με inverter, τους αισθητήρες ροής που τοποθετούνται στην κατάθλιψη κάθε αντλίας και τον πίνακα χειρισμού του συστήματος. Η λειτουργία των αντλιών γίνεται εναλλάξ λειτουργώντας πάντα ως αντλία τροφοδοσίας η μια αντλία και η δεύτερη αντλία ως εφεδρική.



Εικόνα 6-1 Αντλιοστάσιο άρδευσης

6.3 Προγραμματιστής ελέγχου άρδευσης

Ο προγραμματιστής ελέγχου άρδευσης επιτρέπει τον ημερήσιο, εβδομαδιαίο και μηνιαίο προγραμματισμό του ποτίσματος, καθώς και τον διαχωρισμό του δικτύου σε ζώνες άρδευσης, ώστε να προσαρμόζεται η παροχή στις ανάγκες του περιβάλλοντος χώρου.



Εικόνα 6-2 Προγραμματιστής δικτύου άρδευσης

6.4 Δίκτυο άρδευσης

Το δίκτυο άρδευσης είναι κατασκευασμένο από σωλήνα πολυαιθυλενίου. Η κεντρική στήλη κάθε ζώνης έχει εξωτερική διάμετρο Φ50, ενώ οι διακλαδώσεις έχουν διάμετρο Φ18 και διαθέτουν σταλάκτες, σύμφωνα με τη διάταξη της εγκατάστασης.



Εικόνα 6-3 Αποψη χώρου ποτίσματος

7. Γενικό πρόγραμμα εργασιών

7.1 Καθημερινές εργασίες

- Έλεγχος της καλής λειτουργίας του H/M εξοπλισμού.
- Οπτική επιθεώρηση του ηλεκτρικού πίνακα.
- Οπτική επιθεώρηση της καθαρότητας των εξερχόμενων υγρών και ειδοποίηση του κατασκευαστή σε περίπτωση θολερότητας ή διαφυγής ιλύος.
- Εντοπισμός ενοχλητικών οσμών.
- Έλεγχος των ροών, όπως της ανακυκλοφορίας και της ανυψώσεως για την αποφυγή μερικών ή ολικών εμφράξεων.
- Ενημέρωση του ειδικού βιβλίου παρακολούθησης της εγκατάστασης σχετικά με το μετρηθέν ποσοστό ενεργού ιλύος, το διαλυμένο οξυγόνο, το υπολειπόμενο χλώριο καθώς και κάθε μη κανονική συμπεριφορά του συστήματος ή εκτελεσθείσα εργασία συντήρησης ή ρύθμισης.
- Έλεγχος του υπολειμματικού χλωρίου με το test kit και ρύθμιση της δοσομετρικής αντλίας, εφόσον απαιτηθεί.

7.2 Εβδομαδιαίες εργασίες

- Έλεγχος της στάθμης των λαδιών των φυσητήρων και αυστηρή τήρηση των οδηγιών των κατασκευαστών των μηχανημάτων.
- Έλεγχος του ποσοστού ενεργού ιλύος στις δεξαμενές αερισμού.
- Έλεγχος του διαλυμένου οξυγόνου στις δεξαμενές αερισμού.

7.3 Μηνιαίες εργασίες

- Αναλύσεις δειγμάτων εξόδου καθαρών.

7.4 Ετήσιες εργασίες

- Γενική συντήρηση της εγκατάστασής

7.5 Μέτρα Υγιεινής και Ασφάλειας



Ο χώρος όπου βρίσκεται εγκατεστημένος ο εξοπλισμός πρέπει να είναι προστατευμένος από την προσέγγιση μη εξειδικευμένων ατόμων.



Το σύστημα επειδή έχει κινούμενα μέρη και χημικά, θα πρέπει να το χειρίζεται μόνο εξειδικευμένο προσωπικό για αποφυγή ατυχήματος.



Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην χρήση των χημικών και ιδιαίτερα κατά την πλήρωση των δοχείων



Για την προστασία του χειριστή από τυχόν ατύχημα από τα χημικά, θα πρέπει να τοποθετηθεί στο χώρο αυτόματη πλύντρα ματιών και σώματος.



Ο χειριστής θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με όλα τα απαραίτητα και κατάλληλα ΜΑΠ (γάντια, αναπνευστική μάσκα, γυαλιά κ.τ.λ.) όπως αυτά ορίζονται στα πληροφοριακά έντυπα του κάθε χημικού για την προστασία της υγείας.



Πρέπει να τηρούνται όλοι οι κανόνες ασφαλείας που αφορούν τη χρήση χημικών όπως αναφέρεται στα ειδικά έντυπα για την προστασία της υγείας.



Μετά τις εργασίες στην εγκατάσταση, ο χειριστής θα πλένεται υποχρεωτικά με καθαρό νερό και σαπούνι.



Απαγορεύεται αυστηρά η φύλαξη ή η κατανάλωση τροφίμων στο χώρο της εγκατάστασης ή του πεδίου άρδευσης.



Απαγορεύεται η κάθοδος στις δεξαμενές της εγκαταστάσεως μεμονωμένων ατόμων. Σε περίπτωση που είναι απαραίτητη η επίσκεψη του εσωτερικού των δεξαμενών, ο εργαζόμενος θα είναι τουλάχιστον προσδεμένος και θα υπάρχουν στην επιφάνεια του εδάφους τουλάχιστον δύο άτομα.



Σε περίπτωση επαφής με υποχλωριώδες νάτριο, θα γίνεται άμεση πλύση του εκτεθειμένου μέλους με άφθονο καθαρό νερό

8. Συμπέρασμα

Από την επεξεργασία και αξιολόγηση των λειτουργικών δεδομένων της εγκατάστασης για την περίοδο 2022–2025 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Σύμφωνα με τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων (βλέπε Πίνακα4-1) καθώς και με τις απαιτήσεις της ζητούμενης απόδοσης του συστήματος όπως αναφέρεται στον Πίνακα 4-3, οι συγκεντρώσεις των ρύπων βρίσκονται εντός των ορίων όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1.
- Η υδραυλική φόρτιση παρουσιάζει έντονη εποχικότητα, με υψηλότερες παροχές κατά τις περιόδους αυξημένης κυκλοφορίας και επισκεψιμότητας του ΣΕΑ. Η μέση ημερήσια υδραυλική φόρτιση αυξήθηκε από 16,65 m³/d το 2023 σε 20,07 m³/d το 2024 και 22,47 m³/d το 2025, καταδεικνύοντας σταδιακή αύξηση της φόρτισης της εγκατάστασης.
- Η στάθμη της δεξαμενής αερισμού κατά τις περιόδους αυξημένης παροχής διατηρήθηκε σε υψηλότερα επίπεδα, γεγονός που επιβεβαιώνει την άμεση επίδραση της υδραυλικής φόρτισης στη λειτουργία της εγκατάστασης.
- Κατά το 2025 η συνολική παροχή που καταγράφηκε στην εγκατάσταση ανήλθε περίπου σε 8.000 m³, παρουσιάζοντας αυξημένη φόρτιση σε σχέση με τα προηγούμενα έτη. Το πρώτο εξάμηνο του 2025, η υποπίεση των μεμβρανών κυμάνθηκε περίπου μεταξύ –320 και –400 mbar, υποδεικνύοντας αυξημένη αντίσταση στη διήθηση. Μετά την αντικατάσταση των επιβαρυνμένων μεμβρανών, η υποπίεση μειώθηκε κυρίως στην περιοχή –230 έως –250 mbar, γεγονός που καταδεικνύει σαφή βελτίωση των συνθηκών διήθησης.
- Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ανέρχεται σε περίπου 15 kW, ενώ η συνολική διάρκεια λειτουργίας του βασικού εξοπλισμού κατά το 2025 ήταν περίπου 33.500 h. Η μεγαλύτερη ενεργειακή απαίτηση συνδέεται με τον αερισμό και τη λειτουργία των μεμβρανών, καθώς και με τις αντλητικές διατάξεις. Με βάση τις επιμέρους ώρες λειτουργίας και τις ονομαστικές ισχύεις, η εκτιμώμενη κατανάλωση είναι περίπου 81.322,5

kWh/έτος, με αντίστοιχο ενεργειακό κόστος περίπου 14.638 €/έτος για τιμή 0,18 €/kWh. Η ειδική κατανάλωση εκτιμάται σε περίπου 10,1 kWh/m³.

- Η επεξεργασμένη εκροή αξιοποιείται για την άρδευση χώρου πρασίνου περίπου 1.500 m², συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση νερού και στην επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου αποβλήτου.
- Η συστηματική παρακολούθηση των λειτουργικών παραμέτρων και η προληπτική συντήρηση, ιδιαίτερα των μεμβρανών και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, προκύπτουν ως απαραίτητες προϋποθέσεις για τη διατήρηση της αποδοτικής λειτουργίας της εγκατάστασης.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω διαπιστώνουμε ότι η επιλογή της χρήσης της τεχνολογίας βιοαντιδραστήρα μεμβράνης MBR και σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα της περιόδου 2022–2025 δείχνουν ότι το σύστημα διατήρησε ικανοποιητική λειτουργική συμπεριφορά ακόμη και υπό σημαντικές μεταβολές της υδραυλικής φόρτισης του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

- A.A. Sajjad, Y.H. Teow, A.W.M. Hussain, 2018, Sustainable approach of recycling palm oil mill effluent (POME) using integrated biofilm/membrane filtration system for internal plant usage, pp. 165-172, 10.11113/jt.v80.11054.
- Al-Kaisy, D. Veneziano, Z. Kirkemo, C. Dorrington, 2012, Practical guidelines for estimation of rest area use on rural interstates and arterial highways, Transp. pp. 117-124, 10.3141/2303-13.
- D.M. Ghaitidak, K.D. Yadav, 2013, Characteristics and treatment of greywater—a review, pp. 2795-2809, 10.1007/s11356-013-1533-0.
- Darmawan, S.R. Sari, H. Werdiningsih, A.S. Enis, 2021, Rest area development in Central Java, Int. J. Sustain. Transp. Technol., pp. 1-8, 10.31427/IJSTT.2021.4.1.1.
- Dominic, S. Baidurah, 2022, Recent developments in biological processing technology for palm oil mill effluent treatment—a review, 10.3390/biology11040525.
- European Court of Auditors, 2020, The EU Core Road Network: Shorter Travel Times but Network not yet Fully Functional.
- G.Parivallal, R. A. Govindaraju, A. Nagalingam, S. Devarajan, 2022, MLVSS / MLSS ratio's standard value obtained from different aeration tank samples of different capacity sewage treatment plant - A case study, <https://www.ipinnovative.com/open-access-journals>.
- J.F. José Chimuca, C.S. Andrade do Canto, J. Tavares de Sousa, V. Duarte Leite, W. Silva Lopes, 2023, Anaerobic dynamic membrane bioreactor applied to wastewater treatment: a review, Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry, pp. 19-34, 10.55815/413319.
- J.R. Meijer, M.A. Huijbregts, K.C. Schotten, A.M. Schipper, 2018, Global patterns of current and future road infrastructure, Environ. Res. Lett., Article 064006, 10.1088/1748-9326/aabd42.

- K. Pawęska, A. Bawiec, P. Dąbek, J. Baran, 2019 ,Increased Tourist Traffic and Problems With Wastewater Treatment in Mountain Protected Areas Feierabend Maryna, Juhna Talis, Dejus Sandis (rEd.): 12th Eastern European Young Water Professionals Conference Water Research and Innovations in Digital Era 31 March to 2 April 2021, Riga, Latvia.
- K.N.S. Ayuningtyas, R.B. Frazila, S.S. Wibowo, W. Weningtyas, M. Farda, 2019, Network analysis of intercity bus terminal and inner-city toll road development–the case of Bandung City, Int. J. Sustain. Transp. Technol., pp. 8-18, 10.31427/IJSTT.2019.2.1.2.
- K.W. Kandambi, J.M.S.J. Bandara, 2017, Criteria to Identify Optimum Spacing for Service Areas on Southern Expressway Extension.
- L. Deng, W. Guo, H.H. Ngo, X.C. Wang, Y. Hu, R. Chen, D. Cheng, S. Guo, Y. Cao, 2020, Application of a specific membrane fouling control enhancer in membrane bioreactor for municipal wastewater treatment: sludge characteristics and microbial community, 10.1016/j.biortech.2020.123612.
- Liu, L. Tan, L. Zhang, W. Tian, L. Ma, 2021, A review of the distribution of antibiotics in water in different regions of China and current antibiotic degradation pathways Frontiers in Environmental Science, 10.3389/fenvs.2021.692298
- M. El-Qelish, G.K. Hassan, S. Leaper, P. Dessì, A. Abdel-Karim, 2022, Membrane-based technologies for biohydrogen production: a review, Article 115239.
- M.J. Khan, A. Wibowo, Z. Karim, P. Posoknistakul, B.M. Matsagar, K.C.-W. Wu, C. Sakdaronnarong, 2024, Wastewater treatment using membrane bioreactor technologies: removal of phenolic contaminants from oil and coal refineries and pharmaceutical industries Polymers, p. 443
- M.J. Rocco, A. Hafuka, T. Tsuchiya, K. Kimura, 2023, Efficient recovery of organic matter from municipal wastewater by a high-rate membrane bioreactor equipped with flat-sheet ceramic membranes, p. 300,
- M.S. Alharthi, O. Bamaga, H. Abulkhair, H. Organji, A. Shaiban, F. Macedonio, A. Criscuoli, E. Drioli, Z. Wang, Z. Cui, W. Jin, M. Albeirutty, 2023, Evaluation of a hybrid moving bed biofilm membrane bioreactor and a direct contact membrane distillation system for purification of industrial wastewater, 10.3390/membranes13010016.

- Mohamed, S.-A. Abdelkader, 2007, A review of membrane bioreactor (MBR) technology and their applications in the wastewater treatment systems shock loads on MBR view project greywater treatment technology view project, <https://www.researchgate.net/publication/275040060>.
- Move, 2019, Transport in the European Union: Current Trends and Issues, European Commission Directorate-General for Mobility and Transport, Brussels.
- O.T. Iorhemen, R.A. Hamza, J.H. Tay, 2016, Membrane bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling Membranes, p. 33.
- P. Gkotsis, E. Peleka, A. Zouboulis, 2020, The use of natural minerals in a pilot-scale MBR for membrane fouling mitigation Separations, 10.3390/separations7020024.
- Pérez-Acebo, A. Romo-Martín, D.J. Findley, 2022, Spatial distribution and the facility evaluation of the service and rest areas in the toll motorway network of the European Union Appl., pp. 821-845, 10.1007/s12061-021-09421-3.
- R. Zuo, Y. Yu, C. Song, M. Liang, X. Lu, D. Ren, X. Wu, F. Zan, 2022, Evaluating fouling control and energy consumption in a pilot-scale, low-energy POREFLON non-aerated membrane bioreactor (LEP-N-MBR) system at different frequencies and amplitudes, 10.3390/membranes12111085.
- Rezk, A.G. Olabi, M.A. Abdelkareem, A.H. Alami, E.T. Sayed, 2023, Optimal parameter determination of membrane bioreactor to boost biohydrogen production-based integration of ANFIS modeling and honey badger algorithm Sustainability, p. 1589, 10.3390/su15021589.
- S. Das, M.G. O'Connell, H. Xu, R. Bernstein, J.H. Kim, K. Sankhala, T. Segal -Peretz, R. Shevate, W. Zhang, X. Zhou, S.B. Darling, J.B. Dunn, 2022, Assessing advances in anti-fouling membranes to improve process economics and sustainability of water treatment, pp. 2159-2173, 10.1021/acsestengg.2c00184.
- S. Xue, C. Ji, M.D. Kowal, J.C. Molas, C.W. Lin, B.T. Mcverry, C.L. Turner, W.H. Mak, M. Anderson, M. Muni, E.M.V. Hoek, Z.L. Xu, 2020, R.B. Kaner, Nanostructured graphene oxide composite membranes with ultrapermeability and mechanical robustness, pp. 2209 2218, 10.1021/acs.nanolett.9b03780

- S. Yadav, S. Kamsonlian, D. Gola, S. Pal, 2023, Reduction of contaminants from municipal wastewater of salori sewage treatment plant using electrochemical membrane bioreactor and bioelectricity generation, pp. 264-271, 10.12912/27197050/154921.
- T.U. Rahman, H. Roy, M.R. Islam, M. Tahmid, A. Fariha, A. Mazumder, N. Tasnim, M.N. Pervez, Y. Cai, V. Naddeo, M.S. Islam, 2023, The advancement in membrane bioreactor (MBR) technology toward sustainable industrial wastewater management
- X. Du, Y. Shi, V. Jegatheesan, I. Ul Haq, 2020, A review on the mechanism, impacts and control methods of membrane fouling in MBR system, 10.3390/membranes10020024.
- Y. Borshchenko, V. Vasilyev, A. Lizunov, A. Sharypov, 2017, Solutions of a multicriteria problem of optimum placement of short-term rest areas on highways, pp. 87-93, 10.1016/j.trpro.2017.01.020.
- Y. Yang, S. Qiao, J. Zhou, X. Quan, 2020, Mitigating membrane fouling based on in situ $\bullet\text{OH}$ generation in a novel electro-fenton membrane bioreactor, Environ. Sci. Technol., pp. 7669-7676.
- Y. Zakoor, H. Gzar, 2022, Statistical indicators to evaluate the performance of electrocoagulation with membrane bioreactor (EC-MBR) for treatment of organic matters in domestic wastewater, Wasit Journal of Engineering Sciences, pp. 26-41.
- Y.J. Chan, M.F. Chong, C.L. Law, 2010, Biological treatment of anaerobically digested palm oil mill effluent (POME) using a Lab-Scale Sequencing Batch Reactor, pp. 1738-1746, 10.1016/j.jenvman.2010.03.021.
- Y.T. Hameed, N.A. Abdalqadir, H.H. Nussrat, K. muftah Shahot, 2022, Evaluation of nitrification process in constructed wetlands: a review on novel biological nitrogen removal processes, Journal of Engineering and Sustainable Development, pp. 35-52, 10.31272/jeasd.26.5.4

Ελληνόγλωσση

- ΚΥΑ 191002/2013
- ΚΥΑ 5673/400/97
- ΚΥΑ οικ. 145116/2011 (ΦΕΚ 354-B-2011)
- Οδηγία (ΕΕ) 2000/60
- Οδηγία (ΕΕ) 2020/741
- Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019

Πηγές Διαδικτύου

- <https://ecc.com.gr/el/>
- <https://www.endress.com>
- <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/>
- <https://www.enrosun.com/products/membrane-bioreactor.html>
- <https://www.ivaco.it/menu/soffianti-a-canale-laterale-serie-sc/>
- <https://www.m-chemical.co.jp/sterapore/en/sewage.html>
- <https://www.novarotors.com/en/products/progressing-cavity-pumps-diamond/81/pumps-n-series>
- <https://www.pomperotomec.it/miscelatori/?lang=en>
- <https://www.pomperotomec.it/portfolio-articoli/tr/?lang=en>

Κωνσταντίνος Δ. Ζέρβας

**«Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο των βιοαντιδραστήρων
μεμβράνης σε σταθμό εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε
ελληνικό αυτοκινητόδρομο»**

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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