



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**“Επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε
αντιδραστήρα SBR (Sequencing
Batch Reactor - αντιδραστήρας
διαλείπουσας λειτουργίας)”**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΙΟΥΚΗ ΙΩΑΝΝΑ – ΕΛΕΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΛΥΜΠΕΡΑΤΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2021

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε πειραματικά στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και για την ολοκλήρωση της υπήρξαν πολλοί άνθρωποι τους οποίους και θα ήθελα προσωπικά να ευχαριστήσω.

Πρώτα απ' όλα, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής αυτής, κο. Γεράσιμο Λυμπεράτο για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του, αλλά και με τους συνεργάτες του, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος και φυσικά για την υποστήριξη όλων καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα φυσικά να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Αχιλλέα Ζαρκαλίου για την καθημερινή του βοήθεια στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας αυτής, αλλά και για την άψογη συνεργασία, υποστήριξη και συμβολή του.

Επιπλέον, ευχαριστώ ιδιαίτερος την Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, μέλος ΕΔΙΠ του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθεια της, καθώς και τους υποψήφιους διδάκτορες Θεόφιλο Καμπερίδη, Χάρη Παυλόπουλο και Κωνσταντίνα Φιλίππου για τις χρήσιμες πληροφορίες που μου χάρισαν.

Τέλος, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς μου Στέλιο και Ελένη, καθώς και στον αδερφό μου Άκη, για την αγάπη και την στήριξη τους τα ακαδημαϊκά μου χρόνια. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους αγαπημένους Γιάννη, Φοίβη, Αθηνά και Άννα, αλλά και όλους αυτούς που υπήρξαν πάντα δίπλα μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Μας ενώνουν – και ελπίζω να συνεχίσουν να μας ενώνουν– υπέροχες αναμνήσεις και εμπειρίες.

Περίληψη

Η συμβατική μέθοδος επεξεργασίας των υγρών αστικών αποβλήτων και άλλων υγρών αποβλήτων χαμηλού οργανικού φορτίου ($<1000\text{mg}_{\text{COD}}/\text{L}$) είναι η αερόβια διεργασία της ενεργού ιλύος. Η συγκεκριμένη διεργασία απαιτεί κατανάλωση ποσών ενέργειας, κυρίως για τις ανάγκες του αερισμού, ενώ συγχρόνως κανένα από τα παραπροϊόντα της διεργασίας δεν είναι άμεσα ασφαλές προς απόρριψη στο περιβάλλον και αξιοποιήσιμο ενεργειακά. Συγκεκριμένα, το οργανικό φορτίο των αποβλήτων οξειδώνεται παρουσία οξυγόνου σε διοξείδιο του άνθρακα το οποίο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, ενώ η περίσσεια λάσπης που προκύπτει απαιτεί περεταίρω επεξεργασία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η λειτουργία μιας τεχνολογίας, η οποία πρόκειται για μια παραλλαγή της συμβατικής διεργασίας που περιγράφηκε μόλις. Ο Αντιδραστήρας Διαλείποντος Έργου με περιοδική λειτουργία (Sequencing Batch Reactor, SBR) αξιοποιεί διαθέσιμες ποσότητες COD, με σκοπό την αφαίρεση αζώτου (N) και φωσφόρου (P) από λύματα – ο οποίος είναι και ένας από τους στόχους της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας, όπως και ορισμένες αναπτυξιακές προσπάθειες στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του.

Η διεργασία της αερόβιας επεξεργασίας μελετήθηκε σε τρεις (3) πειραματικές φάσεις, οι οποίες διαχωρίζονται ως προς τη χρονική διάρκεια της φάσης του αερισμού καθώς και τη φύση του αποβλήτου τροφοδοσίας (1^η και 2^η πειραματική φάση: συνθετικό απόβλητο και 3^η πειραματική φάση: απόβλητο εκροής αναερόβιου ταχύρρυθμου αντιδραστήρα PABR). Όσον αφορά την συνθετική τροφοδοσία, τα χημικά χαρακτηριστικά της τείνουν να προσεγγίσουν αυτά ενός αστικού λύματος.

Η παραπάνω διεργασία παρουσίασε σε όλες τις πειραματικές φάσεις ικανοποιητικά αποτελέσματα, όσον αφορά την μείωση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων όπου ξεπέρασε το 87% και έφτασε έως και το 92%. Επιπλέον, η απομάκρυνση του ολικού αζώτου υπήρξε αρκετά αποτελεσματική για τις δύο (2) πρώτες πειραματικές φάσεις, όπου ξεπέρασε το 70% και έφτασε έως και το 88%.

Abstract

The conventional method of treatment for municipal wastewater and wastewater of low organic matter ($<1000\text{mg}_{\text{COD}}/\text{L}$) is the process of activated sludge operated under aerobic conditions. This process requires energy consumption, mainly for the requirements of ventilation, while at the same time none of the by-products of the process are immediately safe for disposal in the environment and energy efficient. More specifically, the organic load of waste is oxidized in the presence of oxygen to carbon dioxide which is released into the atmosphere, while the resulting sludge requires further treatment.

The present diploma thesis studies the operation of a technology as a variation of the conventional process of activated sludge. Sequencing Batch Reactor (SBR) utilizes available quantities of COD in organic load to remove nitrogen (N) and phosphorus (P) from wastewater feed – which is also one of the main objectives of this current thesis, as well as some efforts in the design and operation development of the reactor.

The aerobic treatment process was studied in three (3) experimental phases, which are separated in terms of the duration of the aeration phase as well as the nature of the feed waste (1st and 2nd experimental phase: synthetic wastewater and 3rd experimental phase: anaerobic effluent PABR reactor). In terms of synthetic wastewater feed, its chemical properties tend to approach those of a municipal wastewater.

Broadly, the process presented above showed satisfactory results in all experimental phases, when it comes to reducing the organic load of waste, where it exceeded 87% and even reached the percent of 92% in COD reduction. In addition, the removal of total nitrogen was quite satisfactory for the first two (2) experimental phases, where it exceeded 70% and reached up to 88%.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	11
1.1 Γενικά – Ανάγκη για επεξεργασία	11
1.2 Υγρά Απόβλητα	11
1.2.1 Κατηγοριοποίηση Υγρών Αποβλήτων	11
1.2.2 Σύσταση Υγρών Αστικών Αποβλήτων	11
1.2.3 Νομοθετικό Πλαίσιο.....	12
1.3 Φυσικά Χαρακτηριστικά Λυμάτων.....	14
1.4 Χημικά Χαρακτηριστικά Λυμάτων.....	15
1.4.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Biochemical Oxygen Demand (BOD) 15	
1.4.2 Ολικός οργανικός άνθρακας – Total Organic Carbon (TOC).....	15
1.4.3 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Chemical Oxygen Demand (COD)	16
1.4.4 $pH = -\log_{10}[H^+]$	17
1.4.5 Χλωρίδια.....	17
1.4.6 Αλκαλικότητα.....	17
1.4.7 Άζωτο	17
1.4.8 Φώσφορος.....	18
1.4.9 Θείο.....	18
1.4.10 Άλλες τοξικές ενώσεις και στοιχεία	18
1.5 Ρύποι στην Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων	19
1.5.1 Τα Βιοαποδομήσιμα Οργανικά ως Ρύποι στην Επεξεργασία των Υγρών Αποβλήτων	20
1.5.2 Τα Θρεπτικά Συστατικά ως Ρύποι στην Επεξεργασία των Υγρών Αποβλήτων	20
1.6 Επεξεργασία Ρύπων σε υγρή φάση	21
1.6.1 Φυσική Επεξεργασία	21
1.6.2 Χημική Επεξεργασία	22
1.6.3 Βιολογική Επεξεργασία.....	22
2. Στάδια Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων – Δευτεροβάθμια Επεξεργασία – Συστήματα Ενεργού Ιλύος.....	23
2.1 Προεπεξεργασία.....	23
2.2 Πρωτοβάθμια Επεξεργασία.....	23

2.3 Δευτεροβάθμια Επεξεργασία – Περιγραφή Διεργασίας Ενεργού Ιλύος (Activated Sludge Process, ASP)	24
2.4 Παραλλαγές Συστημάτων Ενεργού Ιλύος.....	26
2.4.1 Συμβατικό Σύστημα.....	26
2.4.2 Σύστημα διαλείποντος έργου με περιοδική λειτουργία.....	26
2.4.3 Άλλα συστήματα ενεργού ιλύος.....	26
3. Απομάκρυνση οργανικών, αζώτου και φωσφόρου.....	28
3.1 Απομάκρυνση Αζώτου.....	28
3.1.1 Νιτροποίηση	28
3.1.2 Απονιτροποίηση	30
3.2 Απομάκρυνση Φωσφόρου.....	31
3.2.1 Φυσικές και Χημικές Μέθοδοι.....	31
3.2.2 Βιολογικές Μέθοδοι	32
3.3 Διεργασίες απομάκρυνσης φωσφόρου.....	32
3.3.1 Διεργασία A/O.....	32
3.3.2 Διεργασία PhoStrip.....	33
3.4 Ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικών και θρεπτικών.....	34
3.4.1 Διεργασία A ² /O	34
3.4.2 Διεργασία Bardenpho	34
3.4.3 Διεργασία UCT.....	35
3.4.4 Διεργασία VIP	36
3.4.5 Διεργασία AOA(-SBR)	37
3.5 Τεχνολογία Απομάκρυνσης Θρεπτικών Τύπου Διαλείποντος Έργου με Περιοδική Λειτουργία (Sequencing Batch Reactor, SBR)	38
3.6 Άλλες τεχνολογίες και διατάξεις.....	40
3.6.1 Τεχνολογία MBR.....	40
3.6.2 Τεχνολογία SBMBR.....	42
3.6.3 Τεχνολογία SBBR	45
4. Πειραματικό Μέρος	47
4.1 Αναλυτικές Μέθοδοι.....	47
4.1.1 Μέτρηση pH.....	47
4.1.2 Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας	47
4.1.3 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών αιωρούμενων στερεών	48
4.1.4 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών στερεών	49

4.1.5 Προσδιορισμός χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD).....	50
4.1.6 Προσδιορισμός του ολικού αζώτου (TN).....	51
4.1.7 Προσδιορισμός νιτρικών	51
4.2 Πειραματική Διάταξη.....	52
4.3 Πειραματική Διεργασία.....	49
5. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα	51
5.1 Χαρακτηρισμός τροφοδοσίας	51
5.2 Εκροή	52
5.3 Συνθήκες SBR.....	59
5.4 Συμπεράσματα	64
7. Βιβλιογραφία	66

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Τυπική σύσταση ανεπεξέργαστων αστικών αποβλήτων.....	12
Πίνακας 2: Απαιτήσεις για απορρίψεις από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων σε λιγότερο ευαίσθητες περιοχές διάθεσης	13
Πίνακας 3: Απαιτήσεις για διάθεση από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων σε περισσότερο ευαίσθητες περιοχές διάθεσης.....	13
Πίνακας 4: Χημική σύσταση τροφοδοσίας συνθετικού υγρού αποβλήτου και περιεκτικότητες.....	49
Πίνακας 5: Χημική σύσταση διαλύματος ιχνηθέτη (trace element solution) και περιεκτικότητες.....	49
Πίνακας 6: Χρόνοι κάθε σταδίου σε έναν πλήρη κύκλο του SBR για κάθε μια από τις τρεις (3) πειραματικές φάσεις.....	50
Πίνακας 7: Μέσες τιμές για Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD), Ολικό άζωτο (TN) και Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS) για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις, όσον αφορά την Τροφοδοσία του SBR.	51
Πίνακας 8: Μέσες τιμές για Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS), pH και Ολική Αλκαλικότητα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις, όσον αφορά την Τροφοδοσία του SBR.	51
Πίνακας 9: Μέσες τιμές για Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD), Ολικό άζωτο (TN), Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS), pH και Ολική Αλκαλικότητα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις, όσον αφορά την Εκροή του SBR.....	52
Πίνακας 10: Αποτελέσματα ανάλυσης ιόντων (φθορίου, χλωρίου, βρωμίου, νιτρικών, νιτρικών, φωσφορικών και θειικών) για τροφοδοσία και εκροή SBR.....	56
Πίνακας 11: Μέσες τιμές για Ολικά Στερεά (TS), Ολικά Πτητικά Στερεά (VS), Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS), pH και Ολική Αλκαλικότητα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις, όσον αφορά τον αντιδραστήρα του SBR.....	59

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση ολικών στερεών	14
Σχήμα 2: Τυπική διεργασία ενεργού ιλύος με δεξαμενή αερισμού (Δ.Α.), δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Δ.Δ.Κ.) και ανακυκλοφορία ιλύος	24
Σχήμα 3: Αναπαράσταση της διεργασίας A/O	33
Σχήμα 4: Αναπαράσταση διεργασίας A ² /O	34
Σχήμα 5: Σύστημα Bardenpho πέντε (5) σταδίων	35
Σχήμα 6: Διεργασία UCT	35
Σχήμα 7: Διεργασία VIP	36
Σχήμα 8: Αναπαράσταση διεργασίας AOA	37
Σχήμα 9: Αναπαράσταση φάσεων λειτουργίας ενός αντιδραστήρα διαλείποντος έργου περιοδικής λειτουργίας (SBR)	39
Σχήμα 10: Μέση απομάκρυνση TSS σε συστήματα CAS (conventional active sludge, συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος) και MBR	40
Σχήμα 11: Διάγραμμα ροής τυπικής διάταξης Αντιδραστήρα Μεμβράνης Διαλείποντος Έργου με περιοδική λειτουργία (SBMBR)	44
Σχήμα 12: Μικρό σύστημα SBBR με ενεργό ιλύ και φορείς βιοφίλμ. 1) Θάλαμος για ακατέργαστα και ανακυκλωμένα λύματα, 2) θάλαμος αερισμού, καθίζηση και απόχυση λυμάτων, 3) αντλίες ανύψωσης αέρα (μαμούθ αντλίες), 4) ρευστοποιημένο αντιδραστικό μέσο με ενεργούς φορείς λάσπης και βιοφίλμ, 5) φυσητήρας, 6) μονάδα ελέγχου με συμπιεστή	46
Σχήμα 13: Διάγραμμα ροής πειραματικής διάταξης	48
Σχήμα 14: Σχηματική απεικόνιση χρόνων κάθε σταδίου σε έναν πλήρη κύκλο του SBR για κάθε μια από τις τρεις (3) πειραματικές φάσεις	50
Σχήμα 15: Μέσες τιμές COD εισόδου και εξόδου στην τροφοδοσία και εκροή του SBR, αντίστοιχα, για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις	53
Σχήμα 16: Διάγραμμα για το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, COD (mg/L) συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του SBR (ημέρες) για την Τροφοδοσία και την Εκροή για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις	54
Σχήμα 17: Διάγραμμα για το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, COD (mg/L) συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του SBR (ημέρες) για την Τροφοδοσία και την Εκροή για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις	54
Σχήμα 18: Μέσες τιμές TN εισόδου και εξόδου στην τροφοδοσία και εκροή του SBR, αντίστοιχα, για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις	55
Σχήμα 19: Διάγραμμα συγκέντρωσης Ολικών Αιωρούμενων Στερεών, TSS (g/L) ανά ημέρα λειτουργίας SBR (ημέρες) στην εκροή του	57
Σχήμα 20: Διάγραμμα συγκέντρωσης Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών, VSS (g/L) ανά ημέρα λειτουργίας SBR (ημέρες) στην εκροή του	57
Σχήμα 21: Συνολικό διάγραμμα συγκέντρωσης Ολικών Αιωρούμενων Στερεών, TSS (g/L) ανά ημέρα λειτουργίας SBR (ημέρες) στην εκροή του	58

Σχήμα 22: Διάγραμμα για το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, COD (<i>mg/L</i>) συναρτήσει του χρόνου ανά ώρα αερισμού (<i>ώρες</i>) μέσα στον αντιδραστήρα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις.	60
Σχήμα 23: Διάγραμμα Ολικού Αζώτου, TN (<i>mg/L</i>) συναρτήσει του χρόνου ανά ώρα αερισμού (<i>ώρες</i>) κατά την 1 ^η πειραματική φάση μέσα στον αντιδραστήρα.	61
Σχήμα 24: Διάγραμμα Ολικού Αζώτου, TN (<i>mg/L</i>) συναρτήσει του χρόνου ανά ώρα αερισμού (<i>ώρες</i>) κατά την 2 ^η πειραματική φάση μέσα στον αντιδραστήρα.	62
Σχήμα 25: Διάγραμμα Ολικού Αζώτου, TN (<i>mg/L</i>) συναρτήσει του χρόνου ανά ώρα αερισμού (<i>ώρες</i>) κατά την 2 ^η πειραματική φάση μέσα στον αντιδραστήρα.	63

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά – Ανάγκη για επεξεργασία

Τα τελευταία χρόνια, η ανθρωπότητα καλείται συνεχώς να αντιμετωπίσει πολλαπλά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως είναι η αλλαγή του κλίματος, η μείωση της βιοποικιλότητας, αλλά και η συνεχής μόλυνση του εδάφους, του νερού και του αέρα. Τα προβλήματα αυτά καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για βιώσιμη επεξεργασία και τελική διάθεση της ιλύος από τις εγκαταστάσεις αστικών λυμάτων (Ε. Ε. Λ.). Ταυτόχρονα, σύμφωνα με τις τελευταίες έρευνες, η παραγωγή της ιλύος αυξάνεται με καλπάζοντες ρυθμούς, προκαλώντας σημαντικά προβλήματα στη δημόσια υγεία και καλώντας την ανθρωπότητα να δράσει άμεσα. Για την ρύπανση του περιβάλλοντος μεγάλο μερίδιο ευθύνης έχει ο ίδιος ο άνθρωπος. Τα απόβλητα οικιακής χρήσης, τα νερά της τουαλέτας, ακόμα και τα απόβλητα από τις βιομηχανίες καταλήγουν σε κάποιον αποδέκτη (έδαφος, αέρας, νερό). Το γεγονός αυτό καθιστά την επεξεργασία τους, πριν την διάθεσή τους, εξαιρετικά σημαντική. Η επεξεργασία των αποβλήτων ακολουθεί συγκεκριμένες προδιαγραφές, έτσι ώστε η ποιότητα των αποβλήτων να είναι συμβατή με το περιβάλλον, όταν αυτά θα καταλήξουν εκεί. Συνεπώς, πριν την απόθεσή τους στους αποδέκτες, θα επεξεργαστούν με σκοπό την απομάκρυνσή σωματιδίων, βαρέων μετάλλων και θρεπτικών ουσιών που ενδέχεται να είναι επιβλαβή για τον αποδέκτη, καθώς και για την ανθρώπινη υγεία.¹

1.2 Υγρά Απόβλητα

1.2.1 Κατηγοριοποίηση Υγρών Αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα – ή, αλλιώς, «λύματα»– κατηγοροποιούνται στα **οικιακά λύματα** (δηλαδή, από τα νοικοκυριά) και στα **αστικά λύματα** (τα λύματα, δηλαδή, που προέρχονται από τις συνήθεις δραστηριότητες μιας πόλης στο σύνολό της. Στην περίπτωση που στα υγρά απόβλητα αυτά εμπεριέχονται και απόβλητα βιομηχανιών, τότε ονομάζονται **υγρά αστικά απόβλητα**).

1.2.2 Σύσταση Υγρών Αστικών Αποβλήτων

Αναλόγως τη σύστασή τους (δηλαδή, ανάλογα τα φυσικά, χημικά ή/και βιολογικά χαρακτηριστικά τους), τα ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα μπορούν να καταταχθούν σε **ασθενή, ενδιάμεσα και ισχυρά**.¹

Πίνακας 1: Τυπική σύσταση ανεπεξέργαστων αστικών αποβλήτων. (Λυμπεράτος, Βαγενάς, 2016)

Ρύποι	Μονάδες	Συγκέντρωση			
		Ασθενές	Ενδιάμεσο	Ισχυρό	
Στερεά, ολικά (TS)	mg/L	350	720	1200	
- Διαλυτά, ολικά (TDS)		250	500	850	
Σταθεροποιημένα		145	300	525	
Πτητικά		105	200	325	
- Αιωρούμενα (SS)		100	220	350	
Σταθεροποιημένα		20	55	75	
Πτητικά		80	165	275	
- Καθιζάνοντα		5	10	20	
BOD ₅		110	220	400	
TOC		80	160	290	
COD		250	500	1000	
Άζωτο, ολικό (TN)		20	40	85	
- Οργανικό		8	15	35	
- Αμμωνία		12	25	50	
- Νιτρώδη		0	0	0	
- Νιτρικά		0	0	0	
Φόσφορος, ολικός (P)		4	8	15	
- Οργανικός		1	3	5	
- Ανόργανος		3	5	10	
Χλώριο		30	50	100	
Θειικά		20	30	50	
Αλκαλικότητα (CaCO ₃)		50	100	200	
Λίπος		50	100	150	
Κολοβακτηρίδια, ολικά		no./100mL	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
VOCs		μg/L	<100	100-400	>400

1.2.3 Νομοθετικό Πλαίσιο

Στο δεύτερο τεύχος της Εφημερίδας της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας (αρ. φύλλου 192), αναγράφεται η πιο πρόσφατη υπουργική απόφαση σχετικά με τις απαιτήσεις για αποχέτευση, επεξεργασία και διάθεση των αστικών υγρών αποβλήτων (ΑΥΑ) που καθορίζονται ανάλογα με την εκάστοτε νομοθεσία.

Πιο συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, η ισχύουσα νομοθεσία περιλαμβάνει την Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) 5673/400 της 14/03/1997, η οποία προσαρμόζει στα ελληνικά πλαίσια την Ευρωπαϊκή Οδηγία 91/271/ΕΟΚ «για τη διαχείριση των αστικών υγρών αποβλήτων». Πάνω σε αυτή, έχουν εκδοθεί άλλες δύο (2) νεότερες τροποποιήσεις σχετικά με τον κατάλογο των ευαίσθητων περιοχών στην Ελλάδα – που, όμως, δεν επηρεάζουν τις τιμές των εκτιμώμενων απαιτήσεων.

Σύμφωνα λοιπόν με την ΚΥΑ 5673/400 της 14/03/1997, δίκτυα αποχέτευσης αστικών λυμάτων όφειλαν να διαθέτουν οι ακόλουθοι οικισμοί:

- Μέχρι 31/12/2000: αυτοί με ισοδύναμους κατοίκους (ι.κ.) > 15000 και
- Μέχρι 31/12/2005: αυτοί με ι.κ. μεταξύ 2000 και 15000.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι 1 ι.κ. ισοδυναμεί με αποικοδομήσιμο φορτίο BOD₅ = 60g/ημέρα και αναλογεί σε 125-150L/άτομο/ημέρα.

Επίσης, τα αστικά υγρά απόβλητα προς αποχέτευση όφειλαν να υποστούν σε δευτεροβάθμια επεξεργασία (ή αντίστοιχης κατάλληλης επεξεργασίας):

- Μέχρι 31/12/2000: οι οικισμοί με ι.κ. > 15000,
- Μέχρι 31/12/2005: αυτοί με 10000 < ι.κ. < 15000 και
- Μέχρι 31/12/2005: αυτοί με 2000 < ι.κ. < 10000.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η τελευταία κατηγορία οικισμών απορρίπτει τα απόβλητά της σε μη θαλάσσια νερά και εκβολές ποταμών, με αποτέλεσμα να απαιτείται δευτεροβάθμια (ή αντίστοιχη) επεξεργασία.

Η ΚΥΑ 5673/400 κάνει αναφορά για δύο (2) τύπους περιοχών διάθεσης – λιγότερο και περισσότερο ευαίσθητες, οι οποίες κινδυνεύουν από το φαινόμενο του ευτροφισμού. Όσον αφορά τις περισσότερο ευαίσθητες, υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις που αναγράφονται στον παρακάτω Πίνακα 3 – και συνήθως επιτυγχάνονται με επιπλέον (τριτοβάθμια) επεξεργασία, για απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου. Οι απαιτήσεις που αφορούν την πρώτη κατηγορία περιοχών, αναγράφονται στον παρακάτω Πίνακα 2. Σε κάθε περίπτωση, παρέχεται η δυνατότητα εφαρμογής είτε της συγκέντρωσης διάθεσης, είτε της ελάχιστης ποσοστιαίας μείωσης (%).^{2,3}

Πίνακας 2: Απαιτήσεις για απορρίψεις από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων σε λιγότερο ευαίσθητες περιοχές διάθεσης. (Λυμπεράτος, Βαγενάς, 2016)

Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/L)	Τυπικές Συγκεντρώσεις ΑΥΑ (mg/L)	Ελάχιστη ποσοστιαία μείωση (%)
Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD₅)	25	110-400	70-90
Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	125	250-1000	75
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)	60 (2000-10.000 ι.κ.)	100-350	70-90
	35 (> 10.000 ι.κ.)		

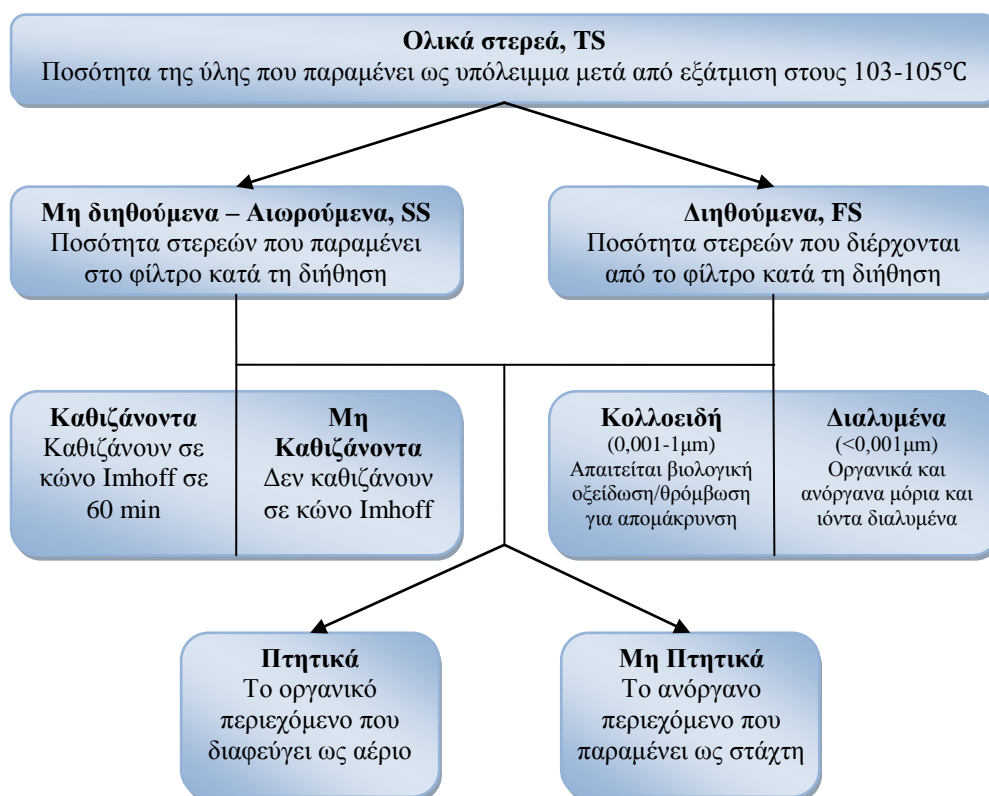
Πίνακας 3: Απαιτήσεις για διάθεση από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων σε περισσότερο ευαίσθητες περιοχές διάθεσης. (Λυμπεράτος, Βαγενάς, 2016)

Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/L)	Τυπικές Συγκεντρώσεις ΑΥΑ (mg/L)	Ελάχιστη ποσοστιαία μείωση (%)
Ολικός φώσφορος (P)	2 (10.000-100.000 ι.κ.)	4-15	80
	1 (> 100.000 ι.κ.)		
Ολικό άζωτο (TKN)	15 (1000-100.000 ι.κ.)	20-85	70-80
	10 (> 100.000 ι.κ.)		

1.3 Φυσικά Χαρακτηριστικά Λυμάτων

Προκειμένου να χαρακτηριστούν με πλήρη τρόπο τα υγρά απόβλητα, αναγκαία θεωρείται η χαρτογράφηση των χαρακτηριστικών τους. Αυτά κατηγοριοποιούνται σε φυσικά, χημικά και βιολογικά – με τα δύο τελευταία να έχουν βασικότερες επιπτώσεις στη δημόσια και περιβαλλοντική υγεία. Βέβαια, τα φυσικά χαρακτηριστικά είναι και τα πιο αντιληπτά από τον ευρύ πληθυσμό και, άρα, προκαλούν άμεσες αντιδράσεις. Σε αυτά, ανήκουν τα **στερεά**, η **οσμή**, η **θερμοκρασία** και το **χρώμα**. Από αυτά, αξίζει να γίνει εκτενέστερη αναφορά στα στερεά και την κατηγοριοποίησή τους, καθώς πρόκειται να απασχολήσει σε ευρύ βαθμό την επεξεργασία των μετρήσεων της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, λοιπόν, τα Ολικά Στερεά (**Total Solids, TS**) κατηγοριοποιούνται σε Διηθούμενα (**Filterable Solids, FS**) και Αιωρούμενα Στερεά (**Suspended Solids, SS**). Μετά την εξάτμιση των πτητικών οργανικών, η μάζα των αφυδατωμένων (αιωρούμενων) στερεών, που παραμένουν στο φίλτρο, τα διαφοροποιεί σε **Μη Πτητικά** – δηλαδή το ανόργανο περιεχόμενο του υπολείμματος που απομένει ως στάχτη–, και σε **Πτητικά Στερεά** – δηλαδή, το οργανικό περιεχόμενο που διαφεύγει ως αέριο.¹



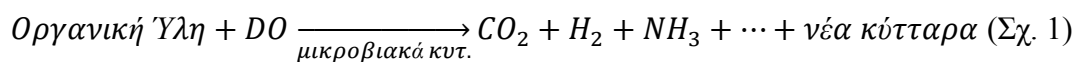
Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση ολικών στερεών. (Λυμπεράτος, Βαγενάς, 2016)

1.4 Χημικά Χαρακτηριστικά Λυμάτων

Οι χημικοί δείκτες που έχουν κριθεί αποδεκτοί και χρησιμοποιούνται ευρέως για τον χοντρικό χαρακτηρισμό των λυμάτων (οργανικής ύλης) ακολουθούν παρακάτω. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε οργανικούς (BOD, COD, TOC) και ανόργανους (pH, αλκαλικότητα, άζωτο, φώσφορος, θείο κ.ά.).¹

1.4.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο - Biochemical Oxygen Demand (BOD)

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved Oxygen – DO) που απαιτείται για την βιοχημική οξείδωση της οργανικής ύλης ενός αποβλήτου, σύμφωνα με την αντίδραση (Σχ. 1):

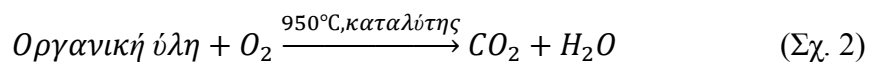


Τα αποτελέσματα της παραπάνω μέτρησης του BOD συμβάλλουν στον προσδιορισμό της ποσότητας του οξυγόνου που απαιτείται προσεγγιστικά για:

- i) Την βιολογική σταθεροποίηση της υφιστάμενης οργανικής ύλης,
- ii) Την διαστασιολόγηση των μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων,
- iii) Την μέτρηση της αποτελεσματικότητας των διεργασιών και
- iv) Τον προσδιορισμό των ορίων συγκεντρώσεων των υγρών αποβλήτων που διατίθενται στο περιβάλλον και αν συμφωνούν με την ισχύουσα νομοθεσία.^{1,4}

1.4.2 Ολικός οργανικός άνθρακας - Total Organic Carbon (TOC)

Με τον προσδιορισμό του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) πραγματοποιείται οξείδωση με οξυγόνο στους 950°C, σε ειδικό κλίβανο, παρουσία κάποιου καταλύτη. Η οξείδωση αυτή (Σχ. 2) μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής:

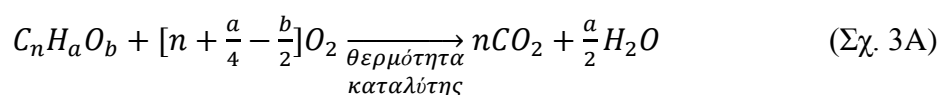


Η μέτρηση του TOC πραγματοποιείται σε αναλυτή υπερύθρων και αναφέρεται στο περιεχόμενο του δείγματος σε άνθρακα, C. Αρχικά, προτού τεθεί το δείγμα υπό ανάλυση, πρέπει να υποστεί όξυνση του pH του, καθώς και αερισμό, ώστε να απομακρυνθούν τα ανόργανα συστατικά που μπορεί να εμπεριέχει. Για παράδειγμα, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποτελεί ένα τέτοιο ανόργανο συστατικό.

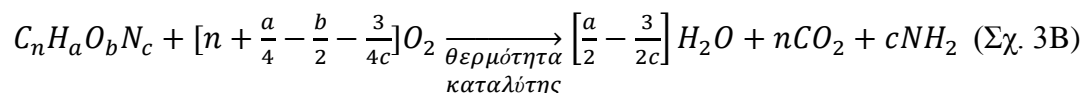
Πλεονεκτεί έναντι άλλων μεθόδων, καθώς είναι ταχεία (κάθε μέτρηση διαρκεί 2-10min), αλλά μειονεκτεί λόγω του ακριβούς της εξοπλισμού και περιορίζει τη χρήση της σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων.

1.4.3 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο - Chemical Oxygen Demand (COD)

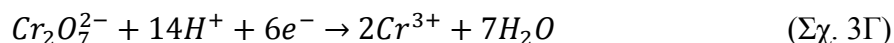
Η περιεκτικότητα σε οργανικά που μπορεί να μετρηθεί με ποσότητα που απαιτείται για την οξείδωση οργανικής ύλης από κάποιο ισχυρό χημικό οξειδωτικό παράγοντα με παρουσία καταλύτη. Ένα αρκετά ισχυρό οξειδωτικό μέσο που συναντάται συνήθως είναι το διχρωμικό κάλλιο ($K_2Cr_2O_7$), ενώ σαν καταλύτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο θειικός άργυρος (Ag_2SO_4). Η αντίδραση που πραγματοποιείται κατά την οξείδωση είναι η εξής (Σχ. 3Α)¹:



Στην περίπτωση που το οργανικό δείγμα περιέχει και άζωτο, η Σχ. 3Α μπορεί να διαμορφωθεί ως εξής (Σχ. 3Β):



Το $K_2Cr_2O_7$ δρα ως οξειδωτικό, σύμφωνα με την αντίδραση (Σχ. 3Γ):



Για τον πειραματικό προσδιορισμό του, έχουν αναπτυχθεί τρεις μέθοδοι:

- i) Η **Μέθοδος Ανοικτής Επαναρροής (Open Reflux Method)**. Αυτή η μέθοδος προτιμάται για ευρύ φάσμα αποβλήτων με μεγάλο όγκο δείγματος προς ανάλυση, όπως δείγματα με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών,
- ii) Η **Μέθοδος Κλειστής Επαναρροής με τιτλοδότηση (Open Reflux, Titrimetric Method)**. Πιο οικονομική μέθοδος όσον αφορά την χρήση αντιδραστηρίων (μικροί όγκοι), αλλά δύσκολη στη λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών, και
- iii) Η **Μέθοδος Κλειστής Επαναρροής με φωτομέτρηση (Open Reflux, Colorimetric Method)**. Η απορρόφηση βασίζεται στην φωτομέτρηση των διχρωμικών ιόντων, τα οποία προκύπτουν έπειτα από την οξείδωση του οργανικών από το οξειδωτικό μέσο ($K_2Cr_2O_7$) και, προφανώς, όσο περισσότερο $K_2Cr_2O_7$ αντιδρά, τόσο μεγαλύτερη απορρόφηση λαμβάνεται κατά την φωτομέτρηση.⁴

1.4.4 $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$

Πρόκειται για μια χημική παράμετρο που επηρεάζει ιδιαίτερα τη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών στα λύματα. Αν και οι περισσότεροι μικροοργανισμοί είναι ουδετερόφιλοι, προκειμένου να είναι αποτελεσματικά ενεργοί, το pH τους είναι αναγκαίο να βρίσκεται στο εύρος 6-9. Εντός του εύρους αυτού, τα pH που έχουν βάση την αλκαλικότητα (alkalinity-based pHs) και αυτά που έχουν βάση τα όξινα ανθρακικά (bicarbonate-based pHs) είναι σχεδόν ίσα, επειδή η ολική αλκαλικότητα οφείλεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στο διττανθρακικό ιόν. Επίσης, αρκετοί ρύποι, για να καθίσταντο βιοεπεξεργάσιμοι, ενδεχομένως, χρειάζονται εξουδετέρωση με κάποια βάση ή οξύ.⁴

1.4.5 Χλωρίδια

Η μεγάλη περιεκτικότητα σε χλωρίδια μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική παρεμπόδιση της βιολογικής επεξεργασίας.¹

1.4.6 Αλκαλικότητα

Το χαρακτηριστικό της (ολικής) αλκαλικότητας στα υγρά απόβλητα οφείλεται κυρίως στην παρουσία υδροξειδίων, ανθρακικών και διττανθρακικών στοιχείων (ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο, κάλιο ή αμμωνία), με τα πιο διαδεδομένα να είναι αυτά του ασβεστίου και του μαγνησίου. Ανάλογα το στοιχείο, χωρίζεται σε ανθρακική αλκαλικότητα (αν το στοιχείο είναι τα ανθρακικά), σε διττανθρακική αλκαλικότητα (αν το στοιχείο είναι τα διττανθρακικά) κ.ο.κ. Επίσης, η αλκαλικότητα συνεισφέρει στην αντίσταση στις μεταβολές του pH, λόγω προσθήκης οξέων και μπορεί να προσδιοριστεί μέσω τιτλοδότησης – διαδικασία που αναλύεται στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Η αλκαλικότητα των υγρών αποβλήτων συνήθως οφείλεται στο νερό τροφοδοσίας, στο υπόγειο νερό, καθώς και στα υλικά που προστίθενται κατά την οικιακή χρήση.⁴

1.4.7 Άζωτο

Στα αστικά υγρά απόβλητα, το άζωτο συναντάται υπό μορφή αμμωνίας σε ισορροπία με ιόντα αμμωνίου σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση (Σχ. 4):



Πρόκειται για απαραίτητο στοιχείο στην ανάπτυξη μικροοργανισμών, καθώς περίσσεια αυτού οδηγεί σε ανάπτυξη φυκιών (ευτροφισμός), ενώ έλλειψη αυτού υποδηλώνει μειωμένη ανάπτυξη μικροβίων (βιολογικός καθαρισμός).¹

Οι μορφές του ολικού αζώτου είναι το οργανικό άζωτο (λόγω ύπαρξης πρωτεϊνών), η αμμωνία, τα νιτρώδη και τα νιτρικά. Η παρουσία νιτρωδών και

νιτρικών σε αποχετευτικά συστήματα σπάνια παρατηρείται και αποτελεί παράδειγμα εκκένωσης αποβλήτων βιομηχανικής προέλευσης, εφόσον νιτρώδη και νιτρικά δεν παράγονται σε αποχετεύσεις. Η παραγωγή τους συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νιτροποίησης σε διεργασίες επεξεργασίας ενεργής ιλύος.⁵

Όσον αφορά τον πειραματικό τους προσδιορισμό, το οργανικό άζωτο προσδιορίζεται με τη μέθοδο Kjeldahl, όπου και το υδατικό δείγμα οδηγείται αρχικά σε βρασμό (απομάκρυνση αμμωνίας) κι έπειτα χωνεύεται (μετατροπή οργανικού αζώτου σε αμμωνία). Για το ολικό άζωτο Kjeldahl (άθροισμα οργανικού και αμμωνιακού αζώτου, TKN), πρόκειται για ίδια ακριβώς διαδικασία, μόνο που δεν έχουμε το πρώτο στάδιο της απομάκρυνσης της αμμωνίας.¹

1.4.8 Φώσφορος

Όπως και το άζωτο, έτσι και ο φώσφορος αποτελεί απαραίτητο (θρεπτικό) στοιχείο στην ανάπτυξη των απαιτούμενων μικροοργανισμών σε μια μονάδα βιολογικού καθαρισμού. Στα αστικά υγρά απόβλητα, κυμαίνεται σε συγκεντρώσεις 4-15mg/L φωσφόρου, ενώ συναντάται υπό τη μορφή ορθοφωσφορικών (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4), πολυφωσφορικών (χρειάζονται διάσπαση προς ορθοφωσφορικά με υδρόλυση) και οργανικού φώσφορου (σημαντικά επίπεδα σε βιομηχανικά απόβλητα και ιλύες).

1.4.9 Θείο

Το θείο πρόκειται για αναγκαίο στοιχείο για τη σύνθεση πρωτεϊνών των μικροοργανισμών. Στα υγρά απόβλητα συναντάται υπό τη μορφή θειικών τα οποία ανάγονται τελικά προς υδρόθειο (εξαιρετικά τοξικό και δύσσομο αέριο), που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μέσω των υπονόμων, όπου και συσσωρεύεται και οξειδώνεται σε θειικό οξύ και προκαλεί διάβρωση των σωληνώσεων.

1.4.10 Άλλες τοξικές ενώσεις και στοιχεία

Σε αρκετές περιπτώσεις, όταν τα υγρά απόβλητα προέρχονται από εγκαταστάσεις βιομηχανιών αλλά και όχι μόνο, περιέχουν και ιόντα βαρέων μετάλλων, όπως είναι χαλκός, μόλυβδος, άργυρος, χρώμιο, αρσενικό, βόριο και νικέλιο, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία ρύπων υψηλής προτεραιότητας και πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη κατά τον σχεδιασμό μονάδων επεξεργασίας. Παρ' όλα αυτά, αρκετά μέταλλα από αυτά (σίδηρος, χρώμιο, κάδμιο κ.ά.), όταν βρίσκονται σε ίχνη, είναι απαραίτητα στα περισσότερα νερά για την ανάπτυξη της βιολογικής ζωής. Ωστόσο, σε μεγαλύτερες ποσότητες, αυτά θα πρέπει να απομακρύνονται αυστηρά, καθώς εκτός από τοξικά, δυσχεραίνουν και την μετέπειτα επεξεργασία του αποβλήτου που προορίζεται για επαναχρησιμοποίηση. Περισσότερα για τα βαρέα

μέταλλα και τους ρύπους στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, πρόκειται να αναλυθούν στην επόμενη Παράγραφο 1.5.

1.5 Ρύποι στην Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων

Οι ρύποι που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και, κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία τους, λόγω ορισμένων κριτηρίων είναι απαραίτητο να απομακρυνθούν, ακολουθούν στη συνέχεια. Μάλιστα, ορισμένοι από αυτούς που πρόκειται να απασχολήσουν περισσότερο το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, θα αναλυθούν εκτενέστερα στην πορεία. Αυτοί είναι οι εξής:

α) τα **Αιωρούμενα στερεά**,

β) τα **Βιοαποδομήσιμα** (ή βιοαποικοδομήσιμα) **οργανικά**,

γ) οι **Παθογόνοι οργανισμοί** (που είναι δυνατόν να μεταφέρουν μεταδοτικές ασθένειες μέσω των υγρών αποβλήτων),

Πιο αυστηρά κριτήρια που εντάχθηκαν πρόσφατα στη νομοθεσία, αφορούν συγκεκριμένα τους παρακάτω ρύπους:

δ) τα **Θρεπτικά συστατικά** (όπως άζωτο, φώσφορος κ.ά.),

ε) οι **Επιλεκτικοί ρύποι** (υψηλής προτεραιότητας και τοξικότητας, όπως είναι οι οργανικές και ανόργανες ενώσεις που προκαλούν καρκινογένεση, μεταλλαξιογένεση και τερατογένεση κ.ά.),

Ενώ, επιπρόσθετα, όταν πρόκειται για επαναχρησιμοποίηση νερού, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται τελικώς υπόψη και οι εξής ρύποι:

στ) τα **Μη αποδομήσιμα οργανικά** (όπως οι επιφανειοδραστικές ενώσεις, οι φαινόλες, οι χρωστικές και τα αγροτικά φυτοφάρμακα),

ζ) τα **Βαρέα μέταλλα** και

η) τα **Διαλυτοποιημένα ανόργανα** (όπως το ασβέστιο, το νάτριο και τα θειικά, που προστίθενται στο αρχικό οικιακό νερό τροφοδοσίας ως αποτέλεσμα χρήσης του και πρέπει να απομακρυνθούν προτού επαναχρησιμοποιηθεί).¹

1.5.1 Τα Βιοαποδομήσιμα Οργανικά ως Ρύποι στην Επεξεργασία των Υγρών Αποβλήτων

Η **οργανική ύλη (βιομάζα)** στα λύματα συναντάται στις εξής κατηγορίες: α) **βιοαποδομήσιμη** (ή βιοαποικοδομήσιμη) **οργανική ύλη** και β) **μη βιοαποδομήσιμη** (ή μη βιοαποικοδομήσιμη).

Όσον αφορά την βιοαποδομήσιμη οργανική ύλη (οργανικά, βιομάζα), αυτή χωρίζεται ανάμεσα στην εύκολα βιοαποδομήσιμη και στην μη εύκολα βιοαποδομήσιμη βιομάζα. Ουσιαστικά, η βιοαποδομήσιμη βιομάζα πρόκειται για τις πρωτεΐνες, τους υδατάνθρακες και τα λιπαρά που περιέχονται σε ένα απόβλητο. Αν, λοιπόν, τα απόβλητα αυτά αφεθούν ελεύθερα προς διάθεση στο περιβάλλον και τον υδροφόρο ορίζοντα, τότε η βιολογική τους σταθεροποίηση θα συμβάλλει στην εξάντληση του οξυγόνου, καθώς και στην ανάπτυξη συνθηκών σύψης.⁶

1.5.2 Τα Θρεπτικά Συστατικά ως Ρύποι στην Επεξεργασία των Υγρών Αποβλήτων

Η αφαίρεση αζώτου (N) και φωσφόρου (P) είναι ένα βασικό ζήτημα της επεξεργασίας λυμάτων, λόγω των δυσμενών επιπτώσεών τους στο υδάτινο περιβάλλον. Και τα δύο αποτελούν βασικά θρεπτικά συστατικά που διεγείρουν την ανάπτυξη άλγης (algae) σε φυσικά υδάτινα περιβάλλοντα, απειλώντας την ασφάλεια του πόσιμου νερού, αλλά και την ανθρώπινη υγεία.

Δεδομένου ότι θεωρούνται οι κύριες πηγές ρύπανσης, η αφαίρεση τους από τα λύματα μέσω της τεχνολογίας βιολογικής αφαίρεσης θρεπτικών συστατικών (Biological Nutrient Removal, BNR) έχει προσελκύσει εκτεταμένη προσοχή, ειδικά δίνοντας έμφαση στην ταυτόχρονη αφαίρεση και των δύο στοιχείων. Η τεχνολογία της αερόβιας επεξεργασίας σε αντιδραστήρα τύπου διαλείποντος έργου με περιοδική λειτουργία (Sequenced Batch Reactor, SBR) και οι τροποποιημένες διεργασίες της έχουν εφαρμοστεί για πολλά είδη εφαρμογών επεξεργασίας λυμάτων, λόγω των μοναδικών πλεονεκτημάτων της, όπως απλή δομή, υψηλή ευελιξία και σταθερότητα λειτουργίας, καλός έλεγχος όγκου και αποτελεσματική αφαίρεση θρεπτικών. Ωστόσο, αυτά πρόκειται να αναλυθούν εκτενώς στα κεφάλαια που ακολουθούν.

1.6 Επεξεργασία Ρύπων σε υγρή φάση

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής, πρόκειται να γίνει εμβάθυνση μόνο στην επεξεργασία ρύπων σε υγρή φάση ή, αλλιώς, στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η ίδια χωρίζεται σε **φυσική, χημική και βιολογική**.

1.6.1 Φυσική Επεξεργασία

- **Καθίζηση.** Εφαρμόζεται σε υγρής φάσης ρεύματα αποβλήτων, είτε αυτά είναι αστικής, είτε βιομηχανικής προέλευσης, στα οποία εμπεριέχονται αιωρούμενα ανόργανα ή οργανικά σωματίδια. Προτού διέλθει η διεργασία της καθίζησης, επιτυγχάνεται η συσσωμάτωση των αιωρούμενων σωματιδίων, προκειμένου και να αυξηθεί η ταχύτητα καθίζησης τους. Η διεργασία πραγματοποιείται σε δεξαμενές ορθογώνιων ή κυκλικών διαστάσεων, όπου με συνεχή (σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας) ή περιοδικό τρόπο (σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας), τελείται η απομάκρυνση των παραγόμενων – με τάση προς καθίζηση– στερεών (λάσπης).
- **Διήθηση.** Πρόκειται για συμπληρωματική διεργασία στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων – με ιδιαίτερα αυστηρές προδιαγραφές απόρριψης–, ωστόσο, αποτελεί βασική διεργασία για την επεξεργασία του πόσιμου νερού. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ώθηση του υγρού ρεύματος μέσα από διηθητικό μέσο, το οποίο, αναλόγως το πορώδες, κατακρατά διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων.
- **Ρόφηση/Εκρόφηση αερίων.** Αρχικά, κατά τη ρόφηση, μεταφέρεται οξυγόνο ατμοσφαιρικού αέρα στην υδατική φάση, ώστε να αξιοποιηθεί από μικροοργανισμούς για την αποικοδόμηση των ρύπων και την αναπνοή/αναπαραγωγή τους. Από την άλλη, κατά την εκρόφηση, δύσσομες ενώσεις εκροφούνται (stripping) σε αέρα (ή ατμό), ο οποίος στη συνέχεια υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία προς ανάκτηση των ενώσεων αυτών. Άλλα από τα τελικά προϊόντα της διεργασίας που απομακρύνονται είναι CO₂, CH₄, NH₄ κ.λπ. Και οι δύο εφαρμόζονται στη βιολογική επεξεργασία υγρών αποβλήτων.
- **Επίπλευση.** Μέσω της διεργασίας αυτής, απομακρύνονται (ελαιώδεις) ουσίες σε διασπορά, με πυκνότητα μικρότερη του νερού. Αφότου το υγρό ρεύμα οδηγηθεί σε δεξαμενή προς ηρεμία, το ελαιώδες στρώμα, όντας ελαφρύτερο, διαχωρίζεται μηχανικά στην επιφάνεια. Εκτός από μηχανικά, το στρώμα αυτό μπορεί να διαχωριστεί και με ταυτόχρονη παροχή αέρα σε διασπορά στη διεπιφάνεια των φυσαλίδων, με τις ελαιώδεις ουσίες να παρασέρνονται στην ελεύθερη επιφάνεια και να συλλέγονται.

1.6.2 Χημική Επεξεργασία

- **Εξουδετέρωση.** Εφαρμόζεται σε ρεύματα αποβλήτων (όξινα ή βασικά) που βρίσκονται σε υγρή φάση και είναι βιομηχανικής προέλευσης, ενδεχομένως ως το μοναδικό στάδιο επεξεργασίας. Η συγκεκριμένη διεργασία πραγματοποιείται σε δεξαμενές ανάδευσης, ενώ η παραγόμενη λάσπη (άλατα) οδηγείται σε απομάκρυνση.
- **Οξείδωση/Αναγωγή.** Και οι δύο εφαρμόζονται σε ρεύματα αποβλήτων που βρίσκονται σε υγρή φάση και είναι βιομηχανικής προέλευσης. Η οξείδωση μπορεί να πραγματοποιηθεί, είτε ομογενώς (καταλυτική ή μη) στην υγρή φάση, είτε ετερογενώς (καταλύτης σε στερεά μορφή), σε απόβλητα με μη βιοδιασπάσιμους οργανικούς ρύπους. Σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (αύξηση ρυθμού) και υψηλής πίεσης (αύξηση διαλυτότητας οξυγόνου), εφαρμόζεται η διεργασία της υγρής οξείδωσης. Τέλος, υπάρχουν και οι προχωρημένες χημικές μέθοδοι οξείδωσης, όπου και δημιουργούνται ρίζες υδροξυλίου, όπως είναι η φωτοκατάλυση, ο οζονισμός, η αντίδραση Fenton κ.ά. Από την άλλη, η αναγωγή μπορεί να εφαρμοστεί σε απόβλητα που περιέχουν αναγωγίμους ρύπους (κατά βάση μεταλλικά ιόντα).
- **Απολύμανση.** Πρόκειται για διεργασία χημικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, κυρίως αστικής προέλευσης, που περιέχουν μικροοργανισμούς οι οποίοι κρίνονται ακατάλληλοι προς περιβαλλοντική διάθεση. Βασικά απολυμαντικά που χρησιμοποιούνται είναι το υπεροξείδιο του υδρογόνου, το όζον, το χλώριο, αλλά και η υπεριώδης ακτινοβολία.
- **Ιοντοεναλλαγή.** Εφαρμόζεται σε ρεύματα αποβλήτων που βρίσκονται σε υγρή φάση και είναι είτε: α) βιομηχανικής προέλευσης και περιέχουν ιόντα εύκολα εναλλάξιμα, όπως είναι τα βαριά μέταλλα, σε κάποιο στερεό εναλλάκτη, είτε β) αστικής προέλευσης για απομάκρυνση αμμωνίας. Η διεργασία πραγματοποιείται σε στήλη πληρωτικού υλικού (ιοντοεναλλάκτη).

1.6.3 Βιολογική Επεξεργασία

Εφαρμόζεται σε ρεύματα αποβλήτων που βρίσκονται σε υγρή φάση, είτε αυτά είναι αστικής (λύματα), είτε βιομηχανικής προέλευσης (γεωργικών βιομηχανιών, τροφίμων κ.λπ.) που περιέχουν μεγάλο ποσοστό βιοδιασπάσιμων (ή βιοαποικοδομήσιμων) ενώσεων. Ανάλογα με τη φύση του αποβλήτου εφαρμόζονται αερόβιες (παρουσία οξυγόνου), ανοξικές (παρουσία εναλλακτικού δέκτη ηλεκτρονίων) ή αναερόβιες διεργασίες (ζύμωση απουσία ανόργανου αποδέκτη ηλεκτρονίων). Οι αερόβιες διεργασίες πραγματοποιούνται σε απόβλητα χαμηλού ή μέσου οργανικού φορτίου ενώ οι αναερόβιες σε απόβλητα υψηλού οργανικού φορτίου. Στην τελευταία κατηγορία, πρόκειται να εμβαθύνει και το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.¹

2. Στάδια Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων – Δευτεροβάθμια Επεξεργασία – Συστήματα Ενεργού Ιλύος

Τα κύρια στάδια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων κατηγοριοποιούνται, κατά σειρά, ως εξής:

- Προεπεξεργασία,
- Πρωτοβάθμια επεξεργασία,
- Δευτεροβάθμια επεξεργασία και
- Τριτοβάθμια επεξεργασία.

2.1 Προεπεξεργασία

Κατά την προεπεξεργασία υγρών αποβλήτων, απομακρύνονται υλικά τα οποία συνήθως προκαλούν βλάβες στο μηχανολογικό εξοπλισμό (αεριστήρες, αντλίες κ.λπ.), αλλά και προβλήματα στη συντήρηση και τη λειτουργία. Για τον λόγο αυτό, απομακρύνονται λίπη, άμμος, τεμάχια πλαστικού και ξύλου, γίνεται εξισορρόπηση της παροχής και εξομάλυνση του ρυπαντικού φορτίου. Συνήθως, χρησιμοποιούνται οι εξής μέθοδοι:

- **Σχάρισμα.** Απομακρύνονται χονδρά στερεά και αντικείμενα μεγάλου όγκου (σχαρίσματα), ενώ έπειτα αυτά μπορούν να πολτοποιηθούν ή να αλεστούν (άλεση) και είτε να επαναφερθούν στο υγρό ρεύμα, είτε να μεταφερθούν σε ΧΥΤΑ (στερεών).
- **Αμμοσυλλογή/Εξάμμωση.** Τα απόβλητα από τη σχάρα οδηγούνται στον αμμοσυλλέκτη για την απομάκρυνση χονδρής άμμου και χαλικιών.
- **Λιποσυλλογή.** Αφαιρούνται λίπη και έλαια που αποτρέπουν τη δημιουργία ιλύος κατάλληλων για καθίζηση προδιαγραφών. Όταν αυτά δεν μπορούν να ανακυκλωθούν, καίγονται σε ειδικούς κλιβάνους.
- **Εξισορρόπηση παροχής.** Σε τελικό στάδιο, πραγματοποιείται εξισορρόπηση της παροχής σε δεξαμενή εξισορρόπησης, όπου εξουδετερώνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις και εξασφαλίζεται σταθερή παροχή στις επόμενες διεργασίες για ευκολότερο έλεγχο.

2.2 Πρωτοβάθμια Επεξεργασία

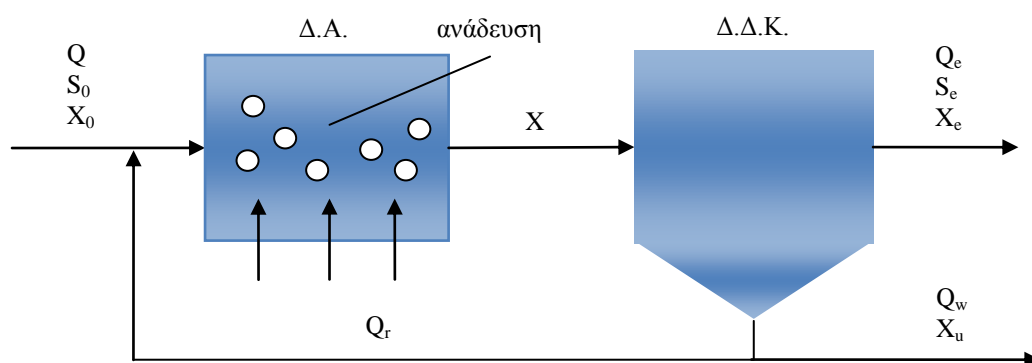
Σε επόμενο στάδιο από αυτό της προεπεξεργασίας, ακολουθεί η πρωτοβάθμια επεξεργασία (ή πρωτοβάθμια καθίζηση) του υγρού αστικού αποβλήτου. Η επεξεργασία αυτή έχει ως βασικό στόχο την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (0,1-0,001mm), τα οποία επηρεάζουν τα επίπεδα του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) του δυνητικά εξερχόμενου αποβλήτου στη μετέπειτα δευτεροβάθμια επεξεργασία – και, πιο συγκεκριμένα, συμβάλλει αποτελεσματικά στη μείωσή του. Ποσοστό αφαίρεσης αιωρούμενων στερεών και BOD₅ στην πρωτοβάθμια καθίζηση: 50-70% και 25-40%, αντίστοιχα.

2.3 Δευτεροβάθμια Επεξεργασία – Περιγραφή Διεργασίας Ενεργού Ιλύος (Activated Sludge Process, ASP)

Η μέθοδος της ενεργού ιλύος είναι ο κύριος εκπρόσωπος του συστήματος αερόβιας αναστολής ανάπτυξης και η πιο κοινή και σύγχρονη επεξεργασία αιωρούμενης βιομάζας για τη διεργασία των υγρών αποβλήτων.¹

Ιστορικά, η διεργασία της ενεργού ιλύος (ή δραστικής λάσπης, activated sludge) αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στην Αγγλία το 1914 από τους Arden και Lockett. Ο όρος «ενεργός» ή «δραστικός» προέρχεται από την υψηλή παρουσία βακτηρίων και άλλων μικροοργανισμών στη βιομάζα που ζει στα εισερχόμενα λύματα. Με άλλα λόγια, ονομάστηκε κατ' αυτόν τον τρόπο, καθώς περιλαμβάνει την παραγωγή μιας ενεργοποιημένης μάζας μικροοργανισμών, οι οποίοι μπορούν να σταθεροποιούν τα υγρά απόβλητα υπό αερόβιες συνθήκες.^{1,7}

Όταν γίνεται αναφορά στην συμβατική διεργασία ενεργού ιλύος, τυπικά γίνεται λόγος για μια δεξαμενή αερισμού (ΔΑ), στην οποία πραγματοποιείται η βιολογική οξείδωση των οργανικών, και μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Δ.Δ.Κ.), στην οποία καθιζάνουν οι μικροοργανισμοί (βλ. Σχήμα 2).⁷



Σχήμα 2: Τυπική διεργασία ενεργού ιλύος με δεξαμενή αερισμού (Δ.Α.), δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Δ.Δ.Κ.) και ανακυκλοφορία ιλύος (ρεύμα Q_r).

Αρχικά, τα οργανικά λύματα εισέρχονται στη Δ.Α. και οι μικροοργανισμοί, που βρίσκονται εντός αυτής, τα οξειδώνουν. Εντός της Δ.Α., το οξυγόνο τροφοδοτείται με συνεχή παροχή –που είναι απαραίτητο για τη βιολογική οξείδωση–, είτε με επιφανειακούς αεριστήρες, είτε με διαχύτες, ενώ ταυτόχρονα με τον αερισμό, εξασφαλίζεται και καλή ανάμειξη του υγρού (ανάμικτο υγρό, mixed liquor). Κατά τη βιολογική οξείδωση, αναπτύσσονται επιπλέον μικροοργανισμοί (μέσω της **αφομοίωσης**), όπως ορισμένα είδη βακτηρίων και μυκήτων, και, από αυτούς, παράγονται διάφορα μεταβολικά προϊόντα, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), νιτρικά (NO_3^-) και θειικά (SO_4^{2-}). Επομένως, η ανίχνευση νιτρικών, θειικών και CO_2 στο στάδιο της βιολογικής οξείδωσης, σηματοδοτεί την ανάπτυξη νέων μικροοργανισμών.

Επιπροσθέτως, οι μικροοργανισμοί αυτοί παράγουν λιπολυσακχαρίτες και άλλες ουσίες που προκαλούν τη συσσωμάτωσή τους σε **κροκίδες** (bioflocs), οι οποίες

αποτελούν την **ενεργό ιλύ**. Ωστόσο, από αυτά τα είδη των μικροοργανισμών, οι μύκητες και τα νηματοειδή βακτήρια επηρεάζουν με ανεπιθύμητο τρόπο τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος στην Δ.Δ.Κ., καθώς αποτρέπουν τον ορθό σχηματισμό αυτών των κροκίδων, μη έχοντας αποδεκτά χαρακτηριστικά.

Προκειμένου η ενεργός ιλύς να έχει αποδεκτά έως καλά χαρακτηριστικά καθίζησης στη Δ.Δ.Κ., είθισται να θεωρείται απαραίτητη η παραμονή της εντός του συμβατικού συστήματος για διάστημα τουλάχιστον τεσσάρων (4) ημερών. Έπειτα, για να αποφευχθεί η συσσώρευση μικροοργανισμών, οι βιολογικές κροκίδες ανακυκλοφορούνται με ένα κομμάτι της ιλύος να απομακρύνεται από το σύστημα (**περίσσεια ιλύος**), επιτρέποντας έτσι την διατήρηση μεγάλου χρόνου παραμονής των στερεών (**Solids Retention Time, SRT**), συγκριτικά με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (**Hydraulic Retention Time, HRT**) και μειώνοντας τον συνολικά απαιτούμενο όγκο για την επιθυμητή απομάκρυνση οργανικών.

Ανακεφαλαιώνοντας όλα τα παραπάνω, η ενεργός ιλύς είναι υπεύθυνη για την απορρόφηση των διαλυμένων και αιωρούμενων οργανικών (και ανόργανων) στερεών που υπάρχουν στα λύματα.¹

2.4 Παραλλαγές Συστημάτων Ενεργού Ιλύος

Το βασικό σύστημα ενεργού ιλύος συναντάται σε διάφορες παραλλαγές, που, ανάλογα την εφαρμογή, κρίνονται περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλες. Οι κατηγορίες συστημάτων αναλύονται στη συνέχεια.

2.4.1 Συμβατικό Σύστημα

Στα συμβατικά συστήματα, η δεξαμενή αερισμού προσομοιάζει έναν αυλωτό αντιδραστήρα. Στην είσοδο της δεξαμενής, η οργανική φόρτιση είναι αυξημένη, ενώ το διαλυμένο οξυγόνο (DO), παρουσιάζεται χαμηλό. Το σχεδιάγραμμα του συστήματος προσομοιάζει αυτό του Σχήματος 2.

2.4.2 Σύστημα διαλείποντος έργου με περιοδική λειτουργία (ή διαλείπουσας λειτουργίας)

Τα τελευταία χρόνια, ενδιαφέρον έχει προσεγγίσει μια διάταξη απομάκρυνσης φωσφόρου τύπου διαλείποντος έργου με περιοδική λειτουργία ή **Διαλείπουσας Λειτουργίας (Sequencing Batch Reactor, SBR)**. Σε αντίθεση με την συμβατική διάταξη ενεργού ιλύος, οι διεργασίες δεν λαμβάνουν χώρα στο χώρο (δηλαδή, σε ξεχωριστούς αντιδραστήρες), αλλά στο χρόνο (όλες μέσα στον ίδιο αντιδραστήρα). Η περιοδική του λειτουργία περιλαμβάνει κύκλο διεργασιών που ποικίλλει από 3-24h. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται ξεκινούν από την τροφοδοσία του αντιδραστήρα με τα προς επεξεργασία απόβλητα, αερόβιο στάδιο επεξεργασίας, καθίζηση των βιοστερεών, εκροή του επεξεργασμένου υγρού και φάση ηρεμίας. Επιπλέον, δεν απαιτείται ανακυκλοφορία ιλύος, ούτε ανακυκλοφορία μικτού υγρού. Σε επόμενο κεφάλαιο, που εμβαθύνει στο τεχνολογικό κομμάτι των συστημάτων, πρόκειται να αναλυθεί περαιτέρω η λειτουργία του συγκεκριμένου αντιδραστήρα που αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

2.4.3 Άλλα συστήματα ενεργού ιλύος

Άλλα συστήματα ενεργού ιλύος αφορούν κυρίως τροποποιήσεις του συμβατικού συστήματος, όσον αφορά τις μεταβλητές του αερισμού, της τροφοδοσίας ή της ανακυκλοφορίας.

- **Σύστημα σταδιακά μειούμενου αερισμού.** Το βασικά συμβατικό σύστημα τροποποιείται όσον αφορά τη μεταβλητή του αερισμού. Επίσης, λόγω αυξημένης ζήτησης σε οξυγόνο στην είσοδο, οι διαχυτήρες τοποθετούνται πιο κοντά σε αυτή.
- **Τελείως αναμειγμένο σύστημα.** Βασικότερος στόχος του συγκεκριμένου συστήματος αποτελεί η μέγιστη δυνατή ομοιογένεια του ανάμικτου υγρού. Επομένως, η τροφοδοσία και η ανακυκλοφορία πραγματοποιούνται σε

διάφορα σημεία στη δεξαμενή αερισμού. Επίσης, διαθέτει το πλεονέκτημα ότι «αντέχει» σε ξαφνικές αυξήσεις BOD₅ στην εκροή.

- **Σύστημα βηματικού αερισμού.** Η εισροή μοιράζεται σε διάφορα σημεία της δεξαμενής αερισμού.
- **Σύστημα τροποποιημένου αερισμού.** Πρόκειται για σύστημα διακοπτόμενου αερισμού – δηλαδή, όχι συνεχή. Ωστόσο, το σύστημα αυτό επιτυγχάνει μικρότερη απομάκρυνση BOD₅.
- **Σύστημα παρατεταμένου αερισμού.** Το σύστημα αυτό λειτουργεί στην περιοχή ενδογενούς αναπνοής των μικροοργανισμών, επιτυγχάνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, σταθεροποίηση της λάσπης.
- **Σύστημα οξειδωτικής τάφρου.** Το απόβλητο ρέει κυκλικά με ταχύτητα 0,3 έως 0,6m/s, ενώ ο αερισμός πραγματοποιείται σε συγκεκριμένο σημείο.
- **Σύστημα με επαφή-σταθεροποίηση.** Αρχικά, μιλώντας πάντοτε για μικρές μονάδες, η ιλύς αερίζεται στη δεξαμενή αερισμού για ~3-6h, λόγω της διεργασίας της οξείδωσης που απαιτεί μεγαλύτερους χρόνους. Στη συνέχεια, τα απόβλητα έρχονται σε σύντομη επαφή με αυτή τη δραστική λάσπη για ~30-90min όπου και γίνεται η ταχεία προσρόφηση των οργανικών.
- **Διεργασία Kraus.** Η ενεργός ιλύς από την ανακυκλοφορία αναμιγνύεται με το υπερκείμενο υγρό από τη χώνευση λάσπης και, προτού οδηγηθεί στη δεξαμενή αερισμού, αερίζεται προκειμένου να νιτροποιηθεί η αμμωνία. Κατάλληλο για απόβλητα πτωχά σε άζωτο.
- **Σύστημα ταχύρρυθμου αερισμού.** Συνδυάζει υψηλή οργανική φόρτιση με μεγάλη πυκνότητα λάσπης και αερισμό με τουρμπίνες. Πολύ ικανοποιητική απομάκρυνση BOD, ειδικά για μεγάλη φόρτιση σε μικρό διαθέσιμο χώρο.
- **Σύστημα αερισμού με οξυγόνο.** Στο σύστημα αυτό, παρέχεται καθαρό οξυγόνο – αντί για αέρα–, ενώ οι δεξαμενές αερισμού είναι καλυμμένες. Ιδιαίτερα αποτελεσματικό για μεγάλες διακυμάνσεις παροχής και οργανικής φόρτισης σε μικρό διαθέσιμο χώρο.

3. Απομάκρυνση οργανικών, αζώτου και φωσφόρου

Μετά το πέρας της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, η εκροή εξακολουθεί να διαθέτει μη αποδεκτά προς απόρριψη χαρακτηριστικά, όπως επίπεδα αιωρούμενων στερεών ~30mg/L, ολικών στερεών ~300mg/L, BOD₅ μεταξύ 20-30mg/L, καθώς και σεβαστές ποσότητες παθογόνων μικροοργανισμών – οι οποίοι, βέβαια, εξαλείφονται κατά το στάδιο της απολύμανσης.

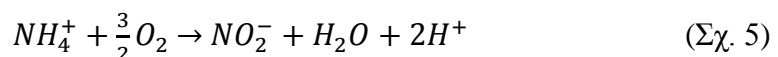
Παρ' όλα τα παραπάνω, βασικότερη ανησυχία αποτελεί τα σημαντικά επίπεδα συγκεντρώσεων αζώτου (~20mg/L) και φωσφόρου (~7mg/L). Οι συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων δεν είναι, σε καμία περίπτωση, αποδεκτές περιβαλλοντικά προς ελεύθερη διάθεση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι αναφέρονται ως θρεπτικά συστατικά, καθώς η παρουσία τους στους φυσικούς αποδέκτες προκαλεί την ανάπτυξη μικροφυκών που ευθύνονται ευρέως για το φαινόμενο του ευτροφισμού. Αφότου, λοιπόν, αναπτυχθούν τα μικροφύκη, στη συνέχεια, σαπίζουν και καταλήγουν ως τροφή για άλλους μικροοργανισμούς (βακτήρια) τα οποία, όμως, δεσμεύουν το οξυγόνο και δυσμενώς προκαλούν θάνατο στους υδρόβιους οργανισμούς, όπως τα ψάρια.¹

3.1 Απομάκρυνση Αζώτου

3.1.1 Νιτροποίηση

Η μορφή του στοιχείου του αζώτου στα υγρά απόβλητα συναντάται σε τέσσερις (4) μορφές: **οργανικό άζωτο, αμμωνία, νιτρικά και νιτρώδη ιόντα**. Από αυτές, το οργανικό άζωτο και η αμμωνία είναι οι δύο (2) βασικότερες μορφές στις οποίες συναντάται. Φυσικά, το οργανικό άζωτο μπορεί να μετατραπεί σε αμμωνία, κατά την αργή βιολογική διεργασία της αμμωνιοποίησης. Ωστόσο, στα υγρά απόβλητα, το συνολικό άζωτο κυμαίνεται, συνήθως, μεταξύ των 20-85mg/L, όπου το 40% πρόκειται για οργανικό, ενώ το υπόλοιπο 60% για αμμωνία.

Στο περιβάλλον, η διεργασία της οξειδωσης της αμμωνίας (νιτροποίηση) αποτελείται από δύο στάδια. Αρχικά, η αμμωνία μετατρέπεται σε νιτρώδη ιόντα, μέσω της διεργασίας της νιτροδοποίησης (Σχ. 5), κι έπειτα, σε νιτρικά, μέσω της νιτροκοποίησης (Σχ. 6) από δύο διαφορετικές ομάδες βακτηρίων (νιτροποιητές, αυτότροφοι μικροοργανισμοί) – Nitrosomonas για την νιτροδοποίηση, ενώ Nitrobacter για την νιτροκοποίηση^{1,8}:

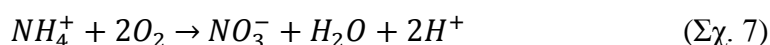


Φυσικά, οι παραπάνω ομάδες βακτηρίων συναντώνται στην ενεργό ιλύ και, προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της έκπλυσής τους, λόγω βραδείας κινητικής ανάπτυξης, η ηλικία της ιλύος πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη. Μεγάλες

ηλικίες υλός σηματοδοτούν μεγάλους χρόνους παραμονής, κάτι που ευεργετεί τη διεργασία της φυσικής οξείδωσης (νιτροποίηση) της αμμωνίας.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι δύο παραπάνω τύποι νιτροποιητών ανήκουν στην κατηγορία των αυτότροφων μικροοργανισμών. Είναι αερόβιοι και αρνητικοί κατά Gram-test (gram-negative bacteria – βακτήρια με λεπτό στρώμα πεπτιδογλυκάνης και εξωτερική λιπιδική μεμβράνη). Επίσης, είναι ικανοί για την οξείδωση του αμμωνιακού ή του νιτρώδους αζώτου, ενώ δεν δημιουργούν ενδοσπόρους. Ωστόσο, διαφέρουν ως προς τη μορφολογία, το μέγεθος, τον τρόπο αναπαραγωγής, την κυτταροπλασματική μεμβράνη, την κινητικότητα, καθώς και ως προς το περιβάλλον στο οποίο λαμβάνουν ανάπτυξη.

Αθροίζοντας, λοιπόν, τις παραπάνω αντιδράσεις, προκύπτει η ακόλουθη συνολική αντίδραση που παρουσιάζεται παρακάτω (Σχ. 7):



Στην παραπάνω αντίδραση (Σχ. 7) παρατηρείται ότι τα ιόντα αμμωνίου (NH_4^+) πρόκειται για τη διαδεδομένη μορφή της αμμωνίας στα υγρά απόβλητα (για pH 6-7). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι για την πλήρη οξείδωση της αμμωνίας απαιτούνται 4,57g οξυγόνου ανά g αμμωνιακού αζώτου (νιτρογενής απαίτηση οξυγόνου, NAO). Αυτή η απαίτηση καθορίζει αναγκαία και την απομάκρυνση της αμμωνίας, προτού το απόβλητο αφηθεί για τελική διάθεση στο περιβάλλον.

Κινητική Νιτροποίησης

Ο ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων αναπτύσσεται από την εξής έκφραση (Εξ. 1):

$$r_A = \widehat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) x_{BA} - b_A x_{BA} \quad (\text{Εξ. 1})$$

Όπου:

x_{BA} : συγκέντρωση αυτότροφων (νιτροποιητικών) οργανισμών

$\widehat{\mu}_A$: μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτότροφων οργανισμών

S_{NH} : συγκέντρωση αμμωνίου

S_O : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου

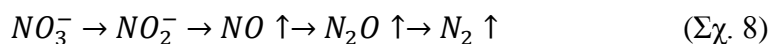
b_A : ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής αυτότροφων οργανισμών

K_{NH}, K_{OA} : συντελεστές κορεσμού

3.1.2 Απονιτροποίηση

Συνηθέστερα, η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό άζωτο δεν είναι επαρκής για την αφαίρεσή του από τα λύματα, καθώς μονάχα ελαχιστοποιεί την απαίτηση σε οξυγόνο στους υδάτινους αποδέκτες, από τη στιγμή που η εκροή πρόκειται να διατεθεί στο περιβάλλον μετά τη νιτροποίηση. Στην περίπτωση ανεπαρκούς νιτροποίησης, είναι απαραίτητη, λοιπόν, η διεργασία της απονιτροποίησης, προκειμένου να γίνει η απομάκρυνση των απαιτούμενων νιτρικών και νιτρωδών ιόντων.

Κατά τη διεργασία της απονιτροποίησης, πραγματοποιείται η βιολογική αναγωγή των νιτρωδών και νιτρικών ιόντων προς αέρια οξείδια του αζώτου (NO, N₂O) και, τελικά, προς αέριο άζωτο που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, λόγω χαμηλής διαλυτότητας. Η διεργασία αυτή διεξάγεται κάτω από **ανοξικές συνθήκες** από **ετερότροφα**, προαιρετικά αερόβια, **βακτήρια**. Τα βακτήρια αυτά αξιοποιούν ως πηγή άνθρακα διάφορες οργανικές ενώσεις (π.χ. μεθανόλη) – ζωτικής φύσεως για την κυτταρική σύνθεση των οργανισμών αυτών, αλλά και για την παραγωγή ηλεκτρονίων απαραίτητων για την αναγωγή, ενώ οι ίδιοι δύνανται να χρησιμοποιήσουν για την οξείδωση των ενώσεων αυτών τόσο το μοριακό οξυγόνο, όσο και το οξυγόνο από τα νιτρικά – το τελευταίο δρώντας ως αποδέκτης ηλεκτρονίων (βλ. Σχ. 8). Ωστόσο, ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου, αυτό κρίνεται προτιμητέο έναντι της χρήσης νιτρικών και νιτρωδών ως τελικοί αποδέκτες ηλεκτρονίων. Η πλήρης σειρά των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα είναι η εξής (Σχ. 8):



Παρά την σειρά αντιδράσεων της παραπάνω Σχ. 8, μέχρι αρκετά πρόσφατα, θεωρούνταν ότι αποτελεί διεργασία δύο σταδίων ($NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow N_2 \uparrow$), διότι η παραγωγή των NO και N₂O ως ελεύθερων ενδιάμεσων προϊόντων, κατά την αναγωγή αυτή, δεν είχε πιστοποιηθεί, είτε εξαιτίας πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων των προϊόντων σε συνήθη συστήματα απονιτροποίησης, είτε εξαιτίας διάφορων τεχνικών δυσκολιών. Οι πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, συνήθως, οφείλονται στην άμεση εξάρτηση τους από τις φυσικές και χημικές συνθήκες περιβάλλοντος. Έχει αποδειχτεί ότι μεγάλες μεταβολές στο pH των λυμάτων, προκαλούν μεγάλες μεταβολές στην παραγωγή των οξειδίων NO και N₂O.

Κινητική Απονιτροποίησης

Προκειμένου να εξαχθεί κινητική που να περιγράφει την διεργασία της απονιτροποίησης, γίνεται η παραδοχή της αναγωγής ενός σταδίου. Πιο συγκεκριμένα, η Σχ. 8 μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής:



Συνηθέστερα, η κινητική είναι κλασική, τύπου Monod, ώστε να περιγράψει την επίδραση των δύο υποστρωμάτων (νιτρικά, οργανικός άνθρακας). Ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των απονιτροποιητικών βακτηρίων, μ_H , μπορεί να παρασταθεί από την παρακάτω εξίσωση (Εξ. 2):

$$\mu_H = \mu_H' \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \quad (\text{Εξ. 2})$$

Επομένως, ο συνολικός ρυθμός ανάπτυξης των απονιτροποιητικών βακτηρίων περιγράφεται από την εξής σχέση (Εξ. 3):

$$r_H = \mu_H \cdot x_{BH} - b_H x_{BH} \Rightarrow r_H = \mu_H' \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot x_{BH} - b_H x_{BH} \quad (\text{Εξ. 3})$$

Όπου:

x_{BH} : συγκέντρωση ετερότροφων (απονιτροποιητικών) οργανισμών,

μ_H' : μέγιστος ειδικός ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης (τυπικά $\sim 4,2d^{-1}$),

K_{NO} , K_S : συντελεστές κορεσμού (20mgCOD/L και 0,5mg-N/L, αντίστοιχα),

b_H : ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής ετερότροφων οργανισμών

S_{NO} : συγκέντρωση νιτρικών (mg-N/L)^{1,7,8}

3.2 Απομάκρυνση Φωσφόρου

Η μορφή του στοιχείου του φωσφόρου στα υγρά απόβλητα συναντάται σε τρεις (3) μορφές: ορθοφωσφορικά, πολυφωσφορικά και οργανικός φώσφορος. Κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία (ή καθίζηση), απομακρύνεται ήδη ένα ποσοστό του 10%, ενώ κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, δεσμεύεται ένα ακόμα μικρό ποσό για την μικροβιακή ανάπτυξη των βακτηρίων. Το μεγαλύτερο ποσοστό διαλύεται και προκειμένου να αφαιρεθεί, απαιτείται προχωρημένη επεξεργασία. Η απομάκρυνσή του επιτυγχάνεται με ποικίλες μεθόδους. Μερικές από αυτές είναι: α) φυσικές, β) χημικές και γ) βιολογικές.

3.2.1 Φυσικές και Χημικές Μέθοδοι

Όσον αφορά τις χημικές μεθόδους, ο πιο διαδεδομένος τρόπος απομάκρυνσης του φωσφόρου, που εφαρμόζονταν μέχρι προσφάτως, ήταν η χημική του κατακρήμνιση με χρήση αλάτων ασβεστίου, αλουμινίου (συνήθως υδροξείδια) ή σιδήρου (θεικού ή χλωριούχου).

Αντίθετα, η αφαίρεσή του με φυσικές μεθόδους μπορεί να πραγματοποιηθεί με προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα (10-30%), υπερδιήθηση (20-50%), καθώς και αντίστροφη όσμωση (90-100%).

3.2.2 Βιολογικές Μέθοδοι

Όπως αναφέρθηκε και στην παραπάνω παράγραφο αφαίρεσης του αζώτου, η βιολογική απομάκρυνση (στην προκειμένη περίπτωση, του φωσφόρου) εδράζεται στην εναλλαγή αερόβιων και αναερόβιων συνθηκών, κάνοντας χρήση κατάλληλων μικροοργανισμών (βακτηρίων, φωσφοροβακτηρίων) και εκθέτοντάς τους στις συνθήκες αυτές (ποσοστό απομάκρυνσης 70-90%).

Βάσει των παραπάνω, μερικά από τα **πλεονεκτήματα των βιολογικών μεθόδων** είναι το υψηλό ποσοστό στοιχειακής απομάκρυνσης (φωσφόρου) που αυτές επιτυγχάνουν, συγκριτικά με το αντίστοιχο χαμηλό κόστος λειτουργίας τους, ενώ επίσης αποφεύγεται η προσθήκη χημικών που επιβαρύνουν την μετέπειτα επεξεργασία του υγρού ρεύματος, αλλά και της παραγόμενης λάσπης στις δεξαμενές καθίζησης.

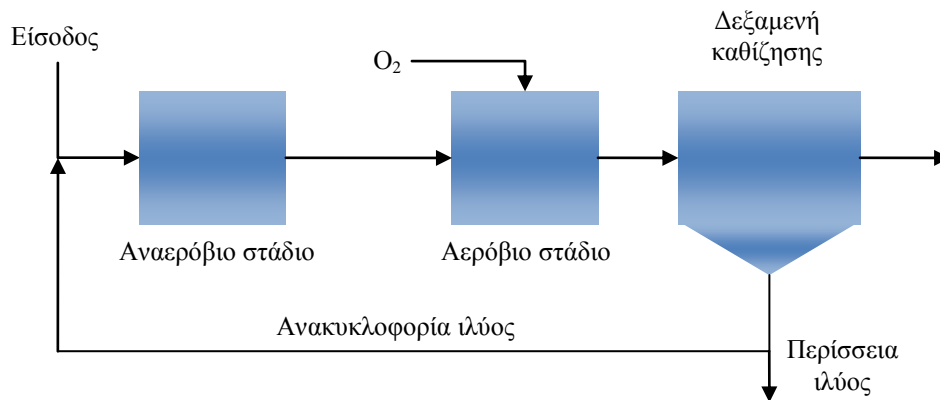
Επιστρέφοντας στην δράση των φωσφοροβακτηρίων, αυτά τα βακτήρια έχουν την εξής ικανότητα: προσροφούν και συσσωρεύουν ενδοκυτταρικά περισσότερο φώσφορο από όσο απαιτείται για την κυτταρική τους ανάπτυξη και τον συντηρούν υπό τη μορφή πολυφωσφορικών αλυσίδων – κάτι που αποτελεί και σημαντικό μηχανισμό επιβίωσής τους, έναντι των υπόλοιπων ετερότροφων χωρίς αυτή τη δυνατότητα αποθήκευσης. Αυτοί οι μικροοργανισμοί (του γένους *Acinetobacter* και είδους *Lwoffii*) στο ανάμικτο υγρό, λοιπόν, είναι απαραίτητο να εκτεθούν σε αναερόβιες συνθήκες, απουσία νιτρικών και διαλυμένου οξυγόνου. Η απουσία αυτή επιτρέπει στα βακτήρια να προσλάβουν στα κύτταρά τους οξικό οξύ (όσα το έχουν ως υπόστρωμα μικρής αλυσίδας), κάνοντας χρήση των αποθηκευμένων τους πολυφωσφορικών ως πηγή ενέργειας και, παράλληλα, ελευθερώνοντας φωσφορικά στο υγρό μέσο.

Τα τελευταία χρόνια, η επιστήμη έχει αναπτύξει διάφορα συστήματα και διατάξεις απομάκρυνσης φωσφόρου από υγρά απόβλητα, είτε αυτά είναι αστικής, είτε βιομηχανικής προέλευσης, που βασίζονται στην τεχνολογία της ενεργού ιλύος. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για συστήματα σε αιώρημα που λειτουργούν είτε για αποκλειστική απομάκρυνση φωσφόρου (διεργασίες A/O, PhoStrip), είτε για ταυτόχρονη απομάκρυνση φωσφόρου και αζώτου (διεργασίες A²/O, Bardenpho 5 σταδίων, UCT και VIP). Για την ταυτόχρονη απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου, πρόκειται να γίνει εκτενής αναφορά στην επόμενη παράγραφο.

3.3 Διεργασίες απομάκρυνσης φωσφόρου

3.3.1 Διεργασία A/O

Πρόκειται για διεργασία συνδυασμένης οξειδωσης άνθρακα και απομάκρυνσης φωσφόρου που περιλαμβάνει ένα αναερόβιο και ένα αερόβιο στάδιο σε σειρά.



Σχήμα 3: Αναπαράσταση της διεργασίας A/O.

Η παραπάνω διάταξη (Σχήμα 3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διεργασία νιτροποίησης, με κατάλληλο χρόνο παραμονής στην δεξαμενή του αερόβιου σταδίου. Αρχικά, στο αναερόβιο στάδιο, τα φωσφοροβακτήρια απελευθερώνουν ένα μέρος του ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου τους φωσφόρου σε μορφή διαλυτού φωσφόρου, ενώ, παράλληλα, συμβαίνει και μερική μείωση του BOD, στο κομμάτι αυτό. Έπειτα, στο αερόβιο στάδιο, τα κύτταρα των φωσφοροβακτηρίων προσλαμβάνουν τον φώσφορο αυτό, ο οποίος και τελικά απομακρύνεται από το υγρό μέσο κατά την απομάκρυνση της πλούσιας σε φωσφορικά ιλύος. Η ανακυκλοφορία της ιλύος στην είσοδο και η ανάμειξή της με το εισερχόμενο απόβλητο ευνοεί ικανοποιητικά τον χρόνο παραμονής των φωσφοροβακτηρίων στο σύστημα. Ο λόγος BOD/P είναι αυτός που καθορίζει την συγκέντρωση του φωσφόρου στην έξοδο του συστήματος. Όταν $BOD/P > 10/1$, τότε η συγκέντρωση του στην έξοδο είναι 1mg/L ή και λιγότερο. Όταν $BOD/P < 10/1$, τότε προστίθενται άλατα αργιλίου ή σιδήρου, προκειμένου να μειωθεί η συγκέντρωση του φωσφόρου στην έξοδο κάτω από τα επιθυμητά επίπεδα (χημική ιζηματοποίηση).

3.3.2 Διεργασία PhoStrip

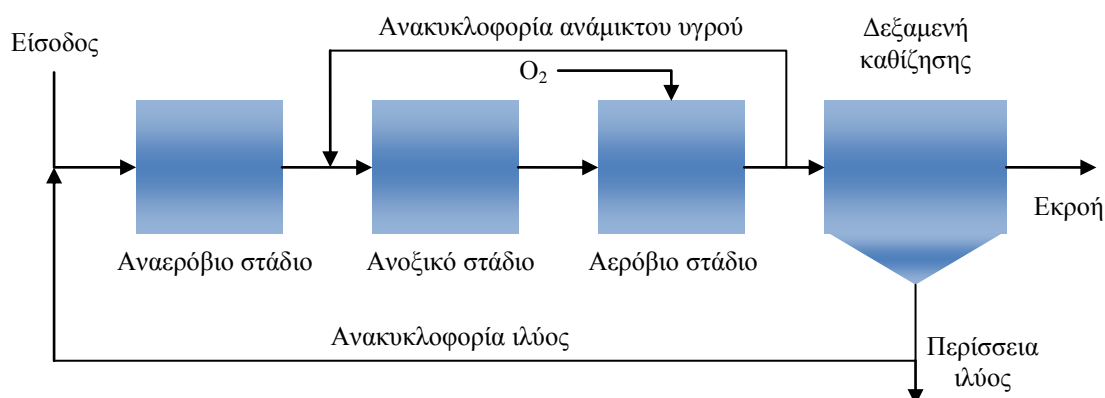
Στη διεργασία αυτή, ένα μέρος της ανακυκλοφορίας ιλύος οδηγείται σε μια δεξαμενή αναερόβιου σταδίου (υδραυλικός χρόνος παραμονής $\sim 8\text{-}12\text{h}$). Στο αναερόβιο αυτό στάδιο, απελευθερώνονται τα φωσφορικά, ενώ η ιλύς, με χαμηλή συγκέντρωση φωσφορικών, επιστρέφει στο αερόβιο στάδιο. Αντίθετα, το πλούσιο σε φωσφορικά υπερκείμενο υγρό τίθεται υπό επεξεργασία σε χωριστή δεξαμενή – με ασβέστη ή άλλο κροκιδωτικό μέσο. Τελικά, ο φώσφορος απομακρύνεται στο χημικό ίζημα. Συγκέντρωση συνολικού φωσφόρου στην έξοδο: $<1,5\text{mg/L}$.

3.4 Ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικών και θρεπτικών

Σε αυτό το κομμάτι, πρόκειται να αναλυθούν οι βασικότερες διεργασίες ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικών, αζώτου και φωσφόρου που συνδυάζουν με κατάλληλο τρόπο αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες.

3.4.1 Διεργασία A²/O

Πρόκειται για μια τροποποιημένη διεργασία της A/O, που αναφέρθηκε παραπάνω, με μοναδική της διαφορά η προσθήκη ενός ανοξικού σταδίου για απονιτροποίηση – με υδραυλικό χρόνο παραμονής στην ανοξική ζώνη ~1h.



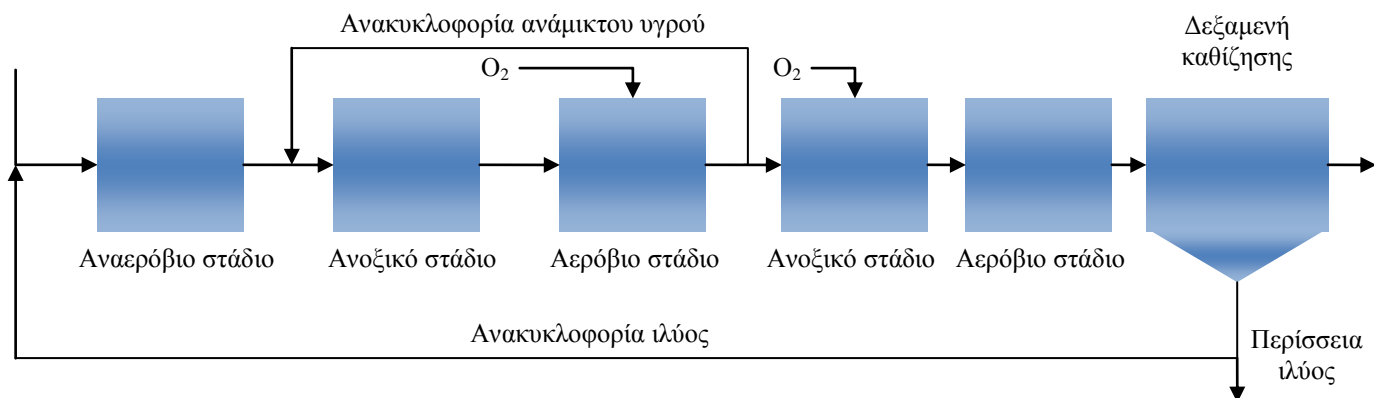
Σχήμα 4: Αναπαράσταση διεργασίας A²/O.

Στο παραπάνω Σχήμα 4, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο στην δεξαμενή ανοξικών συνθηκών, αλλά μόνο νιτρικά ή/και νιτρώδη, τα οποία εισέρχονται σε αυτή από την ανακυκλοφορία ανάμικτου υγρού με αφετηρία την έξοδο της αερόβιας δεξαμενής. Συγκέντρωση συνολικού φωσφόρου στην έξοδο: <math><2\text{mg/L}</math>.¹

Στο σύστημα αυτό, η πλήρης απομάκρυνση αζώτου (TN) είναι σχεδόν ανέφικτη. Προκειμένου, λοιπόν, να βελτιωθεί η αποδοτικότητα απομάκρυνσης TN, ο ρυθμός ανακυκλοφορίας ανάμικτου υγρού (νιτρικών) θα πρέπει είναι πολύ υψηλός, πράγμα που οδηγεί σε μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση και μεγάλη ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου να επιστρέψει από το αερόβιο στάδιο – κάτι που αποφεύγεται.⁹

3.4.2 Διεργασία Bardenpho

Το σύστημα Bardenpho πέντε (5) σταδίων περιλαμβάνει συνδυασμό αναερόβιων, ανοξικών και αερόβιων συνθηκών σε ζώνες για απομάκρυνση αζώτου, φωσφόρου, καθώς και οξείδωση οργανικών. Η διεργασία αυτή χρησιμοποιείται για απονιτροποίηση, μπορεί να τροποποιηθεί με την προσθήκη ενός αναερόβιου σταδίου (για απομάκρυνση φωσφόρου) και ενός ανοξικού σταδίου για επιπλέον απονιτροποίηση.

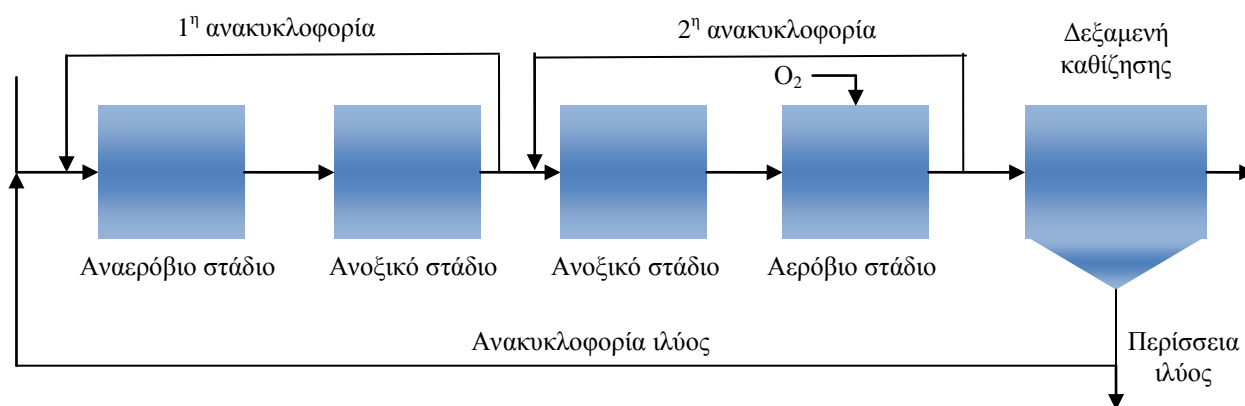


Σχήμα 5: Σύστημα Bardenpho πέντε (5) σταδίων.

Στο Σχήμα 5, έχουμε την ανακυκλοφορία του ανάμικτου υγρού που πραγματοποιείται από το πρώτο, κατά σειρά, αερόβιο στάδιο στην είσοδο του πρώτου ανοξικού. Έπειτα, παρατηρείται ότι στο δεύτερο ανοξικό στάδιο, έχουμε παραγωγή νιτρικών που χρησιμοποιούνται ως τελικοί αποδέκτες ηλεκτρονίων, ενώ ως τελικοί δότες, ο ενδογενής οργανικός άνθρακας. Κλείνοντας, με το τελευταίο αερόβιο στάδιο, ελαχιστοποιείται η απελευθέρωση φωσφόρου στην δεξαμενή καθίζησης, που ακολουθεί, και χρησιμεύει στην απομάκρυνση του αέριου αζώτου που βρίσκεται παγιδευμένο στις βιοκροκίδες. Στην έξοδο της δεξαμενής καθίζησης, τοποθετείται η ανακυκλοφορία ιλύος προς την είσοδο του πρώτου αναερόβιου σταδίου – στην αρχή της διεργασίας, αλλά και η αντίστοιχη απομάκρυνση περίσσειας ιλύος από το σύστημα.

3.4.3 Διεργασία UCT

Σε αντίθεση με την διεργασία Bardenpho, η διεργασία UCT (University of Cape Town) περιλαμβάνει τέσσερα (4) στάδια συνδυασμού αναερόβιων, ανοξικών και αερόβιων συνθηκών σε ζώνες, με σκοπό την απομάκρυνση αζώτου, φωσφόρου, καθώς και οξείδωση οργανικών.

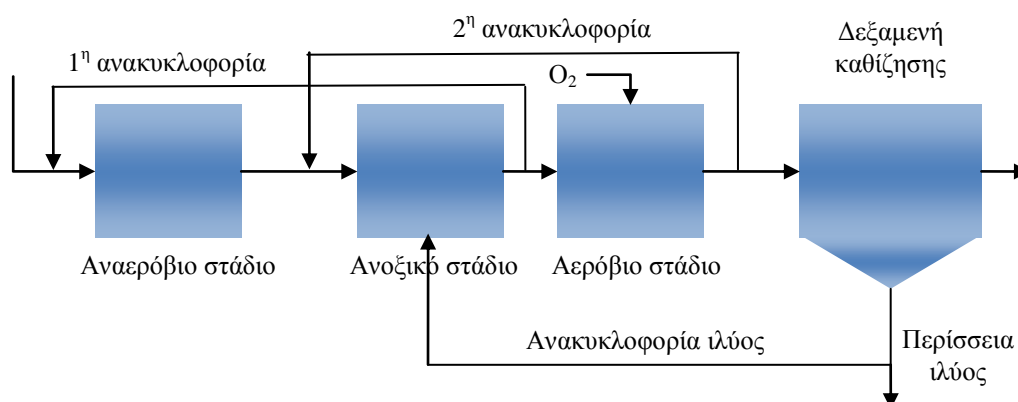


Σχήμα 6: Διεργασία UCT.

Καταρχάς, στο παραπάνω σχήμα, παρατηρείται ότι η ανακυκλοφορία ιλύος ξεκινά από την έξοδο της δεξαμενής καθίζησης και καταλήγει στην είσοδο του πρώτου ανοξικού σταδίου, ενώ η αντίστοιχη περίσσεια ιλύος απομακρύνεται από το σύστημα. Με αυτή την «παράκαμψη», ελαχιστοποιούνται τα νιτρικά στο αναερόβιο στάδιο, επιτρέποντας τα φωσφοροβακτήρια να λειτουργήσουν αναερόβια. Επιπλέον, στη συνολική διεργασία, υπάρχουν δύο (2) ανακυκλοφορίες ανάμικτου υγρού – η πρώτη ξεκινά από το πρώτο ανοξικό στάδιο και καταλήγει στο αναερόβιο, ενώ η δεύτερη από το αερόβιο στάδιο, στο δεύτερο, κατά σειρά, ανοξικό. Στην πρώτη ανακυκλοφορία, το ανάμικτο υγρό περιέχει επαρκή ποσότητα οργανικού φορτίου, το οποίο επιστρέφει στο αναερόβιο απαλλαγμένο, παράλληλα, από νιτρικά.

3.4.4 Διεργασία VIP

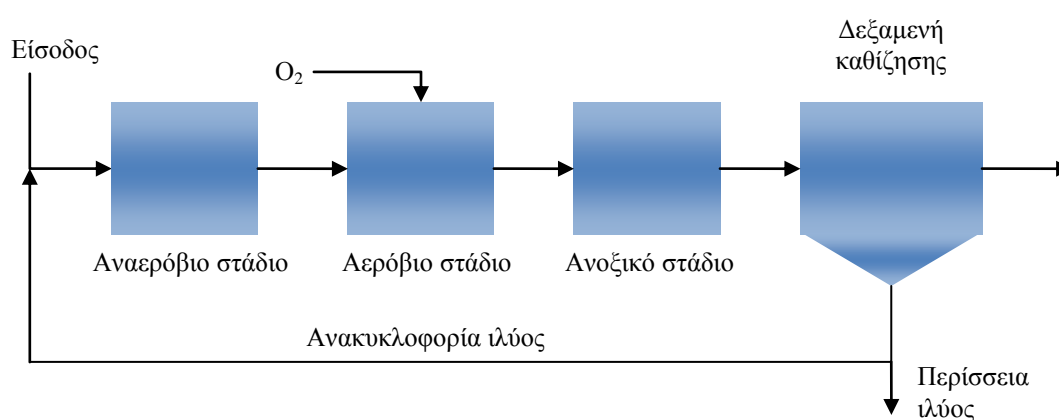
Στη διεργασία VIP, υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις, καθώς η ανακυκλοφορία ιλύος επιστρέφει στο (πρώτο και μοναδικό) ανοξικό στάδιο – και μαζί με αυτή, η δεύτερη ανακυκλοφορία ανάμικτου υγρού από την έξοδο του αερόβιου σταδίου. Η πρώτη ανακυκλοφορία ανάμικτου υγρού ξεκινά από το ανοξικό στάδιο και καταλήγει στην είσοδο της διεργασίας.¹



Σχήμα 7: Διεργασία VIP.

3.4.5 Διεργασία AOA(-SBR)

Στις συμβατικές διεργασίες BNR – A/O, A/O-SBR και A²/O, εμφανίζονται κάποια σχεδιαστικά και λειτουργικά προβλήματα που δυσχεραίνουν την προχωρημένη απομάκρυνση αζώτου (TN) χωρίς επιπλέον προσθήκη εξωτερικής πηγής άνθρακα. Μια πιθανή λύση σε αυτό, μπορεί να αποδειχτεί η αξιοποίηση της ενδογενούς αναπνοής νιτρικών (endogenous nitrate respiration), με μια νέα διεργασία να προκύπτει – η διεργασία A/O/A SBR. Σε αυτή, τα εισερχόμενα οργανικά μετατρέπονται σε εσωτερική πηγή άνθρακα κατά το αναερόβιο στάδιο, ενώ κατά το αερόβιο στάδιο, η αμμωνία ($NH_4^+ - N$) οξειδώνεται προς νιτρικά ($NO_3^- - N$). Η ενδογενής αναπνοή νιτρικών λαμβάνει χώρα στο τελικό ανοξικό στάδιο (post-anoxic stage) αξιοποιώντας την αποθηκευμένη εσωτερική πηγή άνθρακα από το αναερόβιο στάδιο.^{10,11}



Σχήμα 8: Αναπαράσταση διεργασίας AOA. (Yoo and Lee, 2018)

3.5 Τεχνολογία Απομάκρυνσης Θρεπτικών Τύπου Διαλείποντος Έργου με Περιοδική Λειτουργία (Sequencing Batch Reactor, SBR)

Το όνομα του SBR προσδίδεται στα συστήματα τα οποία έχουν να κάνουν με την επεξεργασία υγρών αποβλήτων που βασίζονται στην ενεργό ιλύ και λειτουργούν σε κύκλους γεμίματος-αδειάματος (fill and draw cycles). Η ενεργός ιλύς απορροφά τα διαλυμένα και αιωρούμενα οργανικά (και ανόργανα) στερεά, τα οποία τα οξειδώνει βιολογικά. Ο SBR αντιδραστήρας μπορεί να λειτουργήσει με τρόπο τέτοιο, ώστε να επιτευχθεί κάθε επιθυμητός συνδυασμός οξείδωσης άνθρακα, μείωσης αζώτου και απομάκρυνσης φωσφόρου. Η μείωση των στοιχείων αυτών μπορεί να επιτύχει με ή χωρίς την προσθήκη χημικών, μεταβάλλοντας αναλόγως κάθε φορά τη λειτουργία του αντιδραστήρα. Λειτουργεί αξιοποιώντας την διεργασία που εξηγήθηκε στην παραπάνω παράγραφο 3.4.

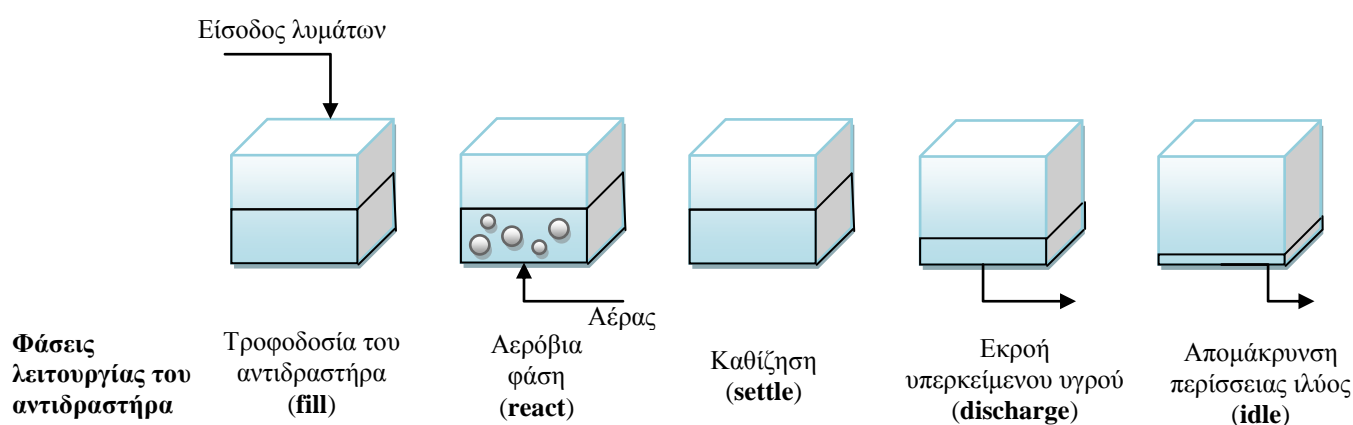
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην παράγραφο 2.4.2, η διαφοροποίηση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος είναι ότι, σε αυτά, οι διεργασίες του αερισμού και της καθίζησης λαμβάνουν χώρα σε ξεχωριστούς αντιδραστήρες, ενώ στα SBR συστήματα μέσα σε έναν μοναδικό αντιδραστήρα, με τις διεργασίες να διαδέχονται η μία την άλλη και ο κάθε κύκλος να επαναλαμβάνεται με την ολοκλήρωση του προηγούμενου. Συνοπτικά, το προς επεξεργασία απόβλητο τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα, υφίστανται διάφορες επεξεργασίες στον ίδιο αντιδραστήρα, ενώ διαφορετικές φάσεις λειτουργίας διαδέχονται η μία την άλλη σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, απομακρύνοντας σταδιακά το ρύπο.

Ειδικότερα, το σύστημα του SBR απαρτίζεται από πέντε (5) βασικά στάδια. Αρχικά, λαμβάνει χώρα το στάδιο της πλήρωσης (γεμίματος) του δοχείου (**fill**), όπου τροφοδοσία υγρού αποβλήτου γεμίζει τον αντιδραστήρα σε **αναερόβιες συνθήκες**. Έπειτα, ανάλογα την εκάστοτε λειτουργία, μπορεί να ακολουθήσουν **δύο ή περισσότερα εναλλασσόμενα αναερόβια/ανοξικά/αερόβια στάδια**.

Κατά την πλήρωση του αντιδραστήρα (fill), εστιάζοντας στη διάρκεια της φάσης της πλήρωσης, εντοπίζονται τόσο σύντομες χρονικά, όσο και μεγάλες φάσεις πλήρωσης. Στην περίπτωση που η πλήρωση είναι σύντομη, η διεργασία χαρακτηρίζεται από υψηλό (στιγμιαίο) συντελεστή οργανικής φόρτισης, καθιστώντας το σύστημα, κατ' αυτόν τον τρόπο, ανάλογο με ένα συνεχές σύστημα με δοχεία εν σειρά. Ειδικότερα, η βιομάζα εκτίθεται αρχικά σε υψηλή συγκέντρωση οργανικής ύλης, αλλά η συγκέντρωση αυτή μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Αντιστρόφως, εάν η φάση πλήρωσης είναι μεγάλη, ο στιγμιαίος συντελεστής οργανικής φόρτισης της διεργασίας είναι μικρός και το σύστημα θα είναι παρόμοιο με ένα σύστημα συνεχούς ροής πλήρους ανάμιξης. Αυτό σημαίνει ότι η βιομάζα θα παρουσιάζει μόνο χαμηλές και σχετικά σταθερές συγκεντρώσεις των συστατικών των λυμάτων.

Μετά το στάδιο της πλήρωσης, ακολουθεί το στάδιο του αερισμού (**aeration – react**), όπου και πραγματοποιείται η βιολογική οξείδωση των διαλυμένων και αιωρούμενων οργανικών (και ανόργανων) στερεών. Αφού ολοκληρωθεί και αυτό το βήμα, πραγματοποιείται το τρίτο στάδιο –αυτό της καθίζησης (**settle**)-, όπου η λάσπη

αρχίζει να κατακάθεται. Η λάσπη αυτή αποτελείται κυρίως από τους μικροοργανισμούς που έχουν τραφεί με τις οργανικές ουσίες των λυμάτων. Έπειτα, τελευταία ακολουθούν τα στάδια αυτά του αδειάσματος (**discharge**) – που όλα τα επεξεργασμένα λύματα απορρίπτονται– και αυτού όπου ένα μικρό μέρος της λάσπης, η οποία είναι πλούσια σε μικροοργανισμούς, απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα (**idle**). Η διαδικασία αυτή της απόρριψης, βοηθά στη γρήγορη αποκατάσταση ενός πληθυσμού μικροοργανισμών εντός της επόμενης παρτίδας των λυμάτων που παραδίδεται στον αντιδραστήρα, μειώνοντας με το τρόπο αυτό την ποσότητα του χρόνου που απαιτείται για την επεξεργασία της κάθε παρτίδας. Τέλος, αυτός ο κύκλος των πέντε σταδίων επαναλαμβάνεται.^{1,12}



Σχήμα 9: Αναπαράσταση φάσεων λειτουργίας ενός αντιδραστήρα διαλείποντος έργου περιοδικής λειτουργίας (SBR).

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί πως μπορεί ο SBR να έχει εφαρμοστεί ως μια εναλλακτική, βελτιωμένη τεχνολογία συμβατικής βιολογικής επεξεργασίας, ωστόσο παρουσιάζει διάφορα ελλείμματα. Η διαδικασία του είναι απλή στη λειτουργία, πολύ ευέλικτη για συνδυαστική απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου, ενώ ο κύκλος λειτουργίας του μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ανά πάσα στιγμή, προκειμένου να αντισταθμίσει τις αλλαγές στις συνθήκες της διαδικασίας και στα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τους στόχους διάθεσης των λυμάτων. Ωστόσο, μειονεκτεί αρκετά στο διαχωρισμό στερεού-υγρού, με αποτέλεσμα το απόβλητο στην εκροή του να είναι υψηλό σε επίπεδα θολερότητας.

Για να ξεπεραστούν αυτά και να βελτιωθεί η απόδοση του συνολικού συστήματος, εισήχθη η τεχνολογία μεμβρανών (φιλτραρίσματος με μεμβράνη) στη βιολογική επεξεργασία λυμάτων. Η διήθηση της μεμβράνης επιτρέπει έναν πλήρη διαχωρισμό στερεού-υγρού σε έναν MBR, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για σχηματισμό κροκίδων (bioflocs). Μέχρι σήμερα, η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία διαφόρων τύπων λυμάτων και επιδεικνύει καλή απόδοση ως προς την απομάκρυνση της οργανικής ύλης και τον βιολογικό διαχωρισμό της λάσπης.¹⁴

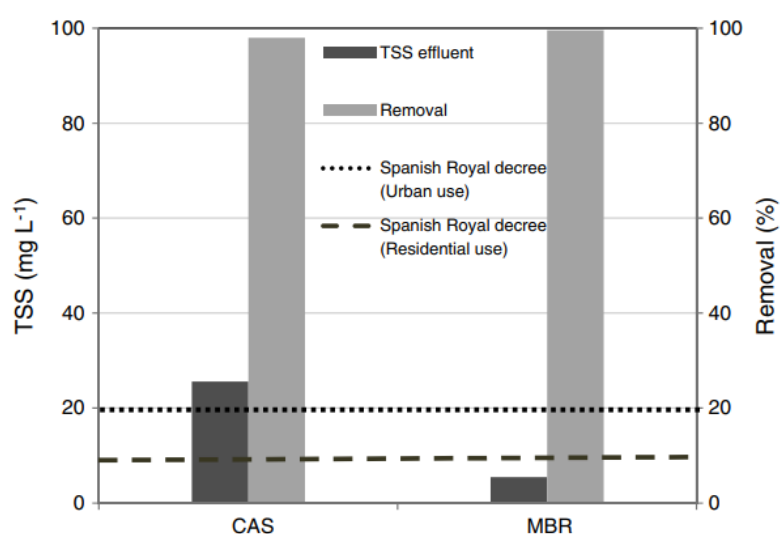
3.6 Άλλες τεχνολογίες και διατάξεις

3.6.1 Τεχνολογία MBR

Ο **Βιοαντιδραστήρας Μεμβράνης (Membrane Bioreactor, MBR)** ανήκει σε μια νέα τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων που συνδυάζει την τεχνολογία διαχωρισμού μεμβρανών με την τεχνική της συμβατικής βιολογικής επεξεργασίας.¹³

Η αρχή αυτής της τεχνολογίας είναι σχεδόν ίδια με τη συμβατική διεργασία ενεργού ιλύος, με τη μόνη διαφορά ότι αντί του διαχωρισμού του νερού και της ιλύος μέσω καθίζησης, η τεχνολογία MBR χρησιμοποιεί τη μεμβράνη που είναι πιο αποτελεσματική και λιγότερο εξαρτώμενη από τη συγκέντρωση οξυγόνου του νερού (βλ. Εικόνα 1). Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τη χρήση: α) ενός βιοαντιδραστήρα αιωρούμενης σωματιδιακής ανάπτυξης για βιοχημικές αντιδράσεις (όπως ζύμωση, βιολογική οξείδωση, νιτροποίηση και απονιτροποίηση) και β) ενός διαχωριστή με μονάδα μεμβράνης για στερεά (υγρός διαχωρισμός, δηλ. διήθηση του ανάμικτου υγρού διαμέσω μεμβρανών, με σκοπό τον διαχωρισμό του από την επεξεργασμένη εκροή). Η μονάδα αυτή είναι είτε εξωτερικού τύπου (external type), είτε εσωτερικού (ενσωματωμένη, submerged type), όπως αυτή που περιγράφεται στην αρχή της παραγράφου. Ο διαχωρισμός εντός της μονάδας αυτής πραγματοποιείται μέσω ανακυκλοφορίας του ανάμικτου υγρού υπό υψηλή πίεση εγκαρσίως της μεμβράνης. Κατά την ανακυκλοφορία, το διηθούμενο ρεύμα (permeate) διαπερνά τη μεμβράνη, ενώ το μη διηθούμενο (concentrate) επιστρέφει πίσω στον βιοαντιδραστήρα.

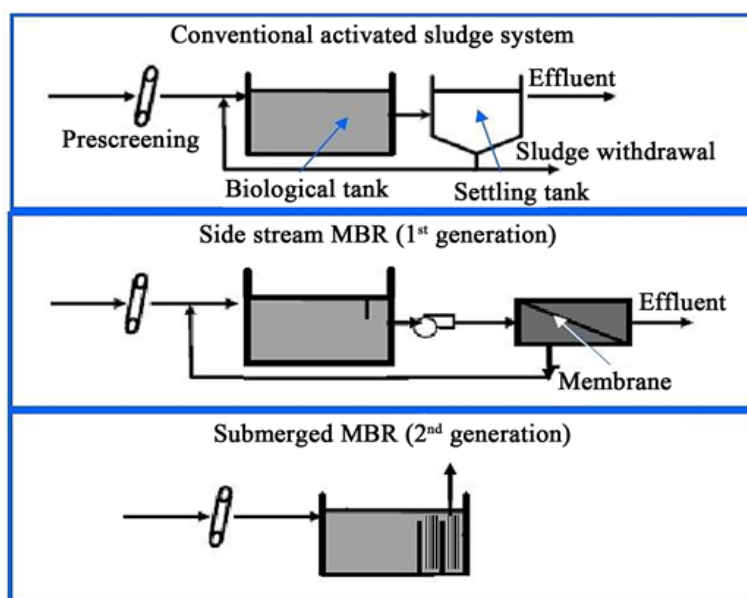
Εκτός από υψηλά κόστη συντήρησης των μεμβρανών αυτού του συστήματος (membrane fouling), υψηλά είναι και τα ενεργειακά κόστη λόγω ενεργειακής κατανάλωσης κατά την ανακυκλοφορία. Ωστόσο, συστήματα εργαστηριακής κλίμακας έχουν δείξει εντυπωσιακή απόδοση αφαίρεσης COD μέχρι και 98% και απομάκρυνση TSS έως και 100% σε ισχυρά αστικά λύματα (βλ. Σχήμα 10).^{15,16}



Σχήμα 10: Μέση απομάκρυνση TSS σε συστήματα CAS (conventional active sludge, συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος) και MBR. (Valderrama et al., 2012)

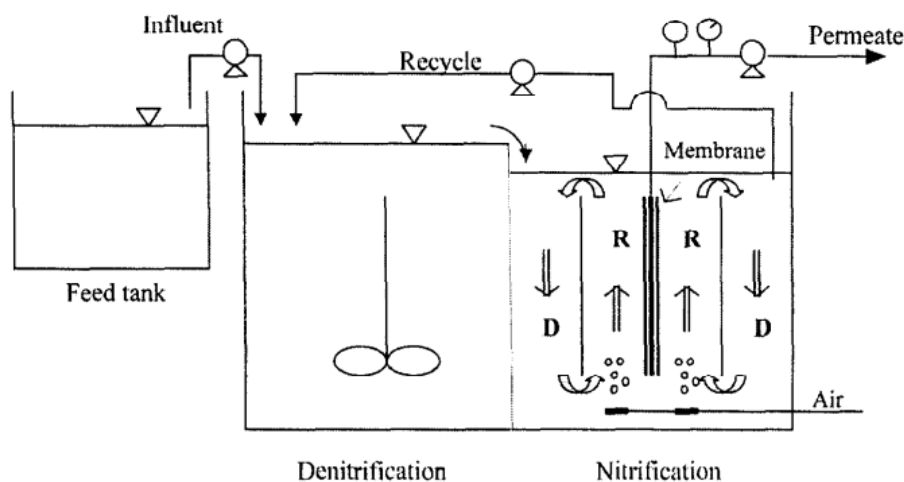
Κατά την τελευταία δεκαετία, οι αντιδραστήρες MBR γνώρισαν ανάπτυξη και ζήτηση άνευ προηγουμένου στην επεξεργασία οικιακών και αστικών αποβλήτων, λόγω πολλών πλεονεκτημάτων τους, όπως εξαιρετική ποιότητα διάθεσης των λυμάτων στην εκροή, μειωμένη παραγωγή λάσπης, μικρές απαιτήσεις σε όγκο βιολογικού αντιδραστήρα, συντομότερη διάρκεια κύκλου (λόγω απουσίας φάσης καθίζησης), δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλούς χρόνους παραμονής στερεών, καθώς και ευελιξία για μελλοντική επέκταση (1^η γενιά, 2^η γενιά, κ.ο.κ.).¹⁵

Ειδικότερα, όσον αφορά την ποιότητα διάθεσης, σχεδόν όλη η ενεργός ιλύς στον αντιδραστήρα μπορεί να παραμείνει μέσα στη μεμβράνη, αντί για τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης σε μια συμβατική διάταξη, και να βελτιώσει αποτελεσματικά τη συγκέντρωση της λάσπης έως και 18000-19000mg/L. Στις επόμενες παραγράφους, αναλύονται διάφορες επεκτάσεις του συστήματος MBR σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες, καθώς και πιθανά μειονεκτήματα κατά τη χρήση τεχνολογίας μεμβρανών.^{15,17}



Εικόνα 1: Εξέλιξη της τεχνολογίας χρήσης μεμβράνης σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρα και σύγκριση. (Fazal et al., 2021)

Παρατηρώντας την Εικόνα 1, αξίζει ακόμα να προστεθεί ότι τα συστήματα MBR με μεμβράνη ενσωματωμένου τύπου (submerged MBR, 2^{ης} γενιάς) πραγματοποιούν το διαχωρισμό μέσω αντλίας αναρρόφησης και ως εκ τούτου αποτελεί οικονομικότερη λύση έναντι αυτών της 1^{ης} γενιάς, λόγω χαμηλότερης πίεσης που απαιτείται κατά την αναρρόφηση, αλλά και απουσίας της ανακυκλοφορίας.¹⁶



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος MBR 2^{ns} γενιάς με μεμβράνη ενσωματωμένου τύπου (submerged MBR). (Sofia et al., 2004)

3.6.2 Τεχνολογία SBMBR

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία MBR παρουσίαζε ικανοποιητικά αποτελέσματα στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και απομάκρυνση θρεπτικών. Λόγω πολλών πλεονεκτημάτων και ευελιξίας για μελλοντική επέκταση, πρόσφατα, ανακαλύφθηκε μια νέα τεχνολογία – συνδυασμός των MBR και SBR–, που ονομάστηκε **Αντιδραστήρας Μεμβράνης Διαλείποντος Έργου με περιοδική λειτουργία (Sequencing Batch Membrane Bioreactor, SBMBR)**. Όχι μόνο μπορεί να δημιουργήσει κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη φωσφοροβακτηρίων – ένα από τα πλεονεκτήματα του κοινού MBR, κάτι που θα αναλυθεί παρακάτω–, αλλά μπορεί επίσης να καλύψει και τις ανάγκες αφαίρεσης θρεπτικών, ταυτόχρονα. Αυτά αποτελούσαν προϋπόθεση για την αποτελεσματική αφαίρεση N, P και COD σε έναν μόνο αντιδραστήρα.¹⁸

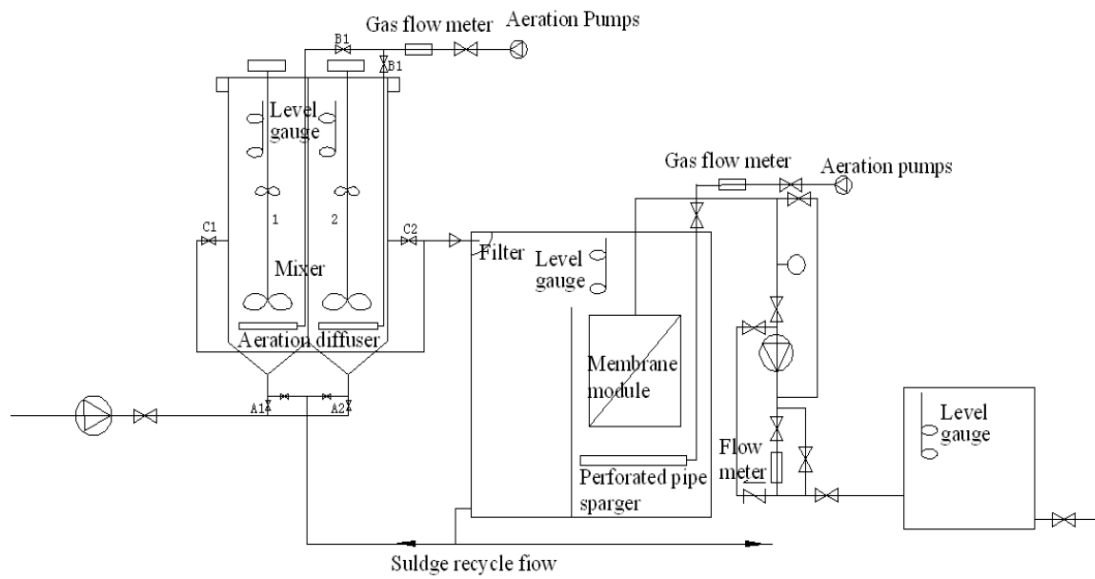
Αρχικά, ο SBMBR τυπικά λειτουργεί, όπως και ο SBR, σε κύκλους πλήρωσης και αδειάσματος (fill-discharge cycles), που διαδέχονται ο ένας τον άλλον, μέσα στον ίδιο βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Αυτό συμβαίνει ανεξάρτητα από το γεγονός ότι μεμβράνες μπορούν να εγκατασταθούν και σε αντιδραστήρες SBR. Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής της τεχνολογίας μεμβρανών στους SBMBR είναι η βελτιωμένη απόδοση απονιτροποίησης και η βελτιωμένη ποιότητα ιλύος, λόγω της αρχικά υψηλότερης οργανικής φόρτισης, σε σύγκριση με άλλες εγκαταστάσεις συνεχούς ροής. Παράπλευρο πλεονέκτημα αυτού αποτελεί ότι βελτιώνεται και η απόδοση της μεμβράνης, καθώς είναι ευρέως αποδεκτό ότι η ποιότητα της ιλύος (sludge quality, π.χ. δείκτης SVI), είναι ένας καλός δείκτης που δείχνει τη δυνατότητα φιλτραρίσματος της ιλύος. Επιπλέον, προσφέρει μεγάλη ευελιξία στον χειριστή να επιτυγχάνει εύκολα την επιθυμητή ποιότητα των λυμάτων, έχοντας αμελητέες επιπτώσεις στην απόδοση βιομάζας (biomass yield), καθώς και την απόδοση φιλτραρίσματος (filtration performance).

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του διαλείποντος κύκλου με περιοδική λειτουργία στους SBMBR, όπως και στους MBR, η χρήση μεμβρανών έχει το θετικό της μειωμένης διάρκειας κύκλου, λόγω της εξάλειψης της φάσης καθίζησης, καθώς και αυτό του μειωμένου όγκου αντιδραστήρα, λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών στο ανάμικτο υγρό (MLSS).¹⁹

Τέλος, η δυνατότητα συγκράτησης της μεμβράνης (membrane retention) συντελεί στη μέγιστη ανάπτυξη των μικροοργανισμών, οι οποίοι παγιδεύονται στον βιοαντιδραστήρα και αναπτύσσονται κάτω από ιδανικά κατάλληλες συνθήκες. Ως εκ τούτου, ο SBMBR έχει σχετικά ισχυρή ικανότητα να αποικοδομεί και να απορροφά οργανικές ενώσεις. Ταυτόχρονα, ο SBMBR με αναερόβια, ανοξικά και αερόβια στάδια ευνοεί τις ανάγκες απομάκρυνσης αζώτου και φωσφόρου.²⁰

Ερχόμενοι τώρα στα μειονεκτήματα του SBMBR – και, γενικότερα, του συνδυασμού SBR με τεχνολογία μεμβρανών και των MBR– δεν είναι κανένα άλλο από τον κίνδυνο της αυξημένης ρύπανσης της μεμβράνης (membrane fouling). Επίσης, ο καθορισμός των χρόνων του κάθε κύκλου (cycle times) για τις βιολογικές διεργασίες είναι πολύ σημαντικός. Εάν η διάρκεια του κύκλου λειτουργίας είναι πολύ μεγάλη, ο διαθέσιμος όγκος (available volume) του αντιδραστήρα δεν χρησιμοποιείται αποτελεσματικά. Εάν πάλι η διάρκεια του κάθε κύκλου είναι πολύ σύντομη, οι στόχοι διάθεσης στην έξοδο δεν μπορούν να επιτευχθούν. Συνήθως, οι χρόνοι του κάθε κύκλου υπολογίζονται εμπειρικά, αλλά δυστυχώς λίγα είναι τα διαθέσιμα δεδομένα για συστήματα SBMBR και βρίσκονται ακόμα σε στάδιο πειραμάτων και με λίγες εφαρμογές.^{13,19}

Ένα παράδειγμα εργαστηριακής διάταξης ενός SBMBR, που απεικονίζεται στο Σχήμα 11, μπορεί να αποτελείται από δύο παράλληλους αντιδραστήρες SBR και ένα δοχείο MBR αερόβιων συνθηκών. Αρχικά, στους SBR, κατά την αναερόβια φάση, πραγματοποιείται ανάδευση του αποβλήτου, ώστε να εξασφαλιστεί πλήρης ομοιογένεια. Ο ρυθμός του αερισμού στο σύστημα εξασφαλίζεται από δύο αυτόνομα συστήματα αερισμού και ρυθμίζεται από όργανο μέτρησης ροής αερίου (ροόμετρο). Ο χρόνος της αντίδρασης περιλαμβάνει συνδυασμό διεργασιών που προσομοιάζουν το σύστημα αναερόβιων/ανοξικών/αερόβιων συνθηκών ενός SBR. Για περαιτέρω μείωση οργανικού φορτίου, η εκροή του SBR εισέρχεται στο δοχείο MBR.^{13,20}



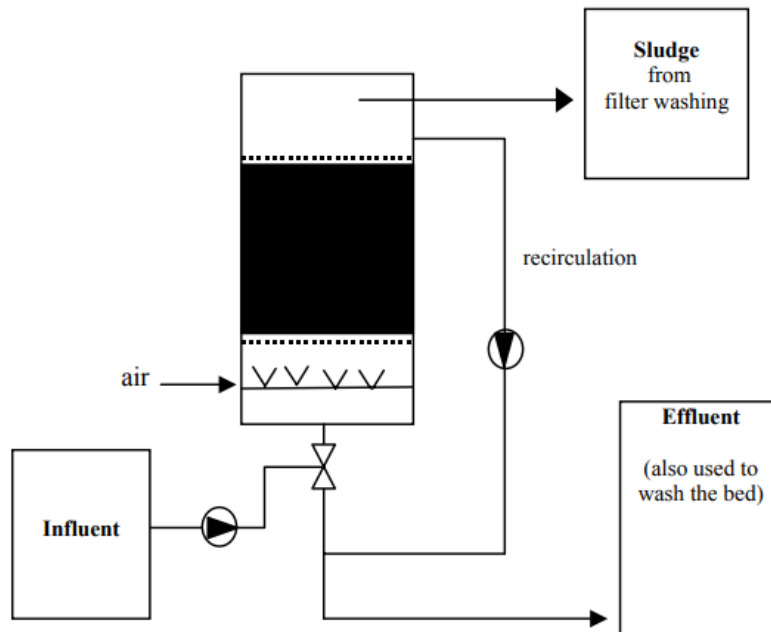
Σχήμα 11: Διάγραμμα ροής τυπικής διάταξης Αντιδραστήρα Μembrάνης Διαλείποντος Έργου με περιοδική λειτουργία (SBMBR). (Li, Yao and Lv, 2011)

3.6.3 Τεχνολογία SBBR

Ο όρος SBBR χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα συστήματα αντιδραστήρων βιολογικού φίλτρου σταθερής κλίνης (**Sequencing Biofilm Batch Reactor, SBBR**) που λειτουργούν σε λειτουργία «πλήρωσης και αδειάσματος» (“fill and draw” mode). Πρόκειται, δηλαδή, για ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει την συμβατική τεχνολογία ενεργού ιλύος, έχοντας, όμως, προσθέσει ένα σύστημα μεμβράνης, βιολογικής φύσεως (biofilm), επιτρέποντας έτσι τη χρήση του θαλάμου του αντιδραστήρα υπό υψηλότερα φορτία ρύπων και καθιστώντας την απομάκρυνσή τους πιο αποτελεσματική.^{21,22}

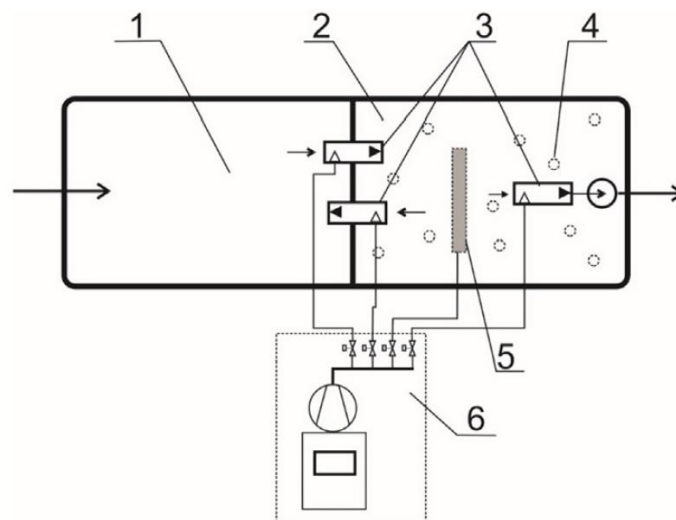
Η βασική διαφορά της εγκατάστασης SBBR από αυτή της συμβατικής ενεργού ιλύος έγκειται ότι, στο συμβατικό σύστημα, η βιομάζα βρίσκεται σε αιώρηση, ενώ στους SBBR, η βιομάζα είναι προσκολλημένη σε έναν σταθερό φορέα – κάποιο πορώδες υλικό, πάνω στο οποίο αναπτύσσονται μικροοργανισμοί. Τα λύματα διανέμονται στην επιφάνεια αυτή και, κατά την κάθοδο τους μέσα από τους πόρους του φορέα, έρχονται σε επαφή με τη βιομάζα, η οποία διασπά μέρος του οργανικού τους φορτίου. Για τη βιολογική διάσπαση, απαιτείται οξυγόνο, το οποίο τροφοδοτείται από διαχυτή αέρα κάτω από τον φορέα της βιομάζας, ενώ κατ’ αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται παράλληλα και επαρκή ανάμιξη του υγρού.²³

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι αυξάνει το μέγεθος και τη μικροβιολογική ποικιλομορφία του πληθυσμού της βιομάζας ανά μονάδα όγκου αντιδραστήρα, δημιουργώντας κατ’ αυτόν τον τρόπο συνθήκες που ενισχύουν την αποτελεσματικότητα της βιοαποικοδόμησης των ρύπων. Επίσης, εγκαταστάσεις αυτού του τύπου δεν είναι ευαίσθητες σε λειτουργία υποφόρτισης, καθώς υπάρχει επαρκής εξισορρόπηση με υδραυλικά άλματα, διότι δεν πρόκειται για σύστημα συνεχούς ροής.^{21,23}



Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση διάταξης αντιδραστήρα βιολογικού φίλτρου σταθερής κλίνης (Sequencing Biofilm Batch Reactor, SBBR). (Di Iaconi et al., 2002)

Αντίστοιχα με τους αντιδραστήρες βιοφίλμ σταθερής κλίνης, υπάρχουν και αντιδραστήρες βιοφίλμ κινούμενης κλίνης. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο φορέας της βιομάζας σε αυτά δεν είναι προσκολλημένος, αλλά πρόκειται για ελεύθερα κινούμενα (πλαστικά) τεμάχια μέσα στο θάλαμο αερισμού του βιολογικού αντιδραστήρα (βλ. Σχήμα 9). Πάνω σε αυτά, συνθέεται ένα στρώμα βιομάζας από τους μικροοργανισμούς, ενώ το, αναγκαίο για την αποδόμηση του οργανικού φορτίου, οξυγόνο τροφοδοτείται, όπως και πριν, από διαχυτή αέρα στο δάπεδο του αντιδραστήρα.²³



Σχήμα 12: Μικρό σύστημα SBBR με ενεργό ιλύ και φορείς βιοφίλμ. 1) Θάλαμος για ακατέργαστα και ανακυκλωμένα λύματα, 2) θάλαμος αερισμού, καθίζηση και απόχυση λυμάτων, 3) αντλίες ανύψωσης αέρα (μαμούθ αντλίες), 4) ρευστοποιημένο αντιδραστικό μέσο με ενεργούς φορείς λάσπης και βιοφίλμ, 5) φυσητήρας, 6) μονάδα ελέγχου με συμπιεστή. (Jucherski, Walczowski, Bugajski and Józwiakowski, 2019)

4. Πειραματικό Μέρος

4.1 Αναλυτικές Μέθοδοι

Οι αναλυτικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν, προκειμένου να ελεγχθεί η ορθή λειτουργία και η αποδοτικότητα του αντιδραστήρα, αλλά για και να πραγματοποιηθεί ο πλήρης χαρακτηρισμός της τροφοδοσίας, είναι βασισμένες στο βιβλίο Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater το οποίο αποτελεί το αποδεκτό εγχειρίδιο για την ανάλυση νερών και υγρών αποβλήτων.⁴

4.1.1 Μέτρηση pH

Η μέτρηση του pH των δειγμάτων πραγματοποιείται με τον εμβαπτισμό του ηλεκτροδίου της συσκευής του pH-μέτρου στο δείγμα και την καταγραφή της τιμής για την οποία σταθεροποιείται το όργανο μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα.

Αφού πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση της συσκευής, η συσκευή είναι έτοιμη για να ληφθεί η αντίστοιχη μέτρηση προς καταγραφή. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είναι ένα φορητό βαθμονομημένο ηλεκτρονικό pH-μετρο τύπου inoLab WTWseriesPHS-3DMeter.

4.1.2 Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας

Η Ολική Αλκαλικότητα (Total Alkalinity, TA) εκφράζει την αντίσταση στις μεταβολές του pH που προκαλούνται από την προσθήκη οξέων. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αλκαλικότητα είναι κυρίως το αποτέλεσμα της παρουσίας ανθρακικών (CO_3^{2-}), όξινων ανθρακικών (HCO_3^-), καθώς και ιόντων υδροξυλίου (OH^-) στα υγρά απόβλητα. Επιπλέον, άλλες ενώσεις που μπορούν να συνεισφέρουν στην αλκαλικότητα μπορούν να είναι βορικά, πυριτικά και φωσφορικά άλατα.

Για τη μέτρηση της αλκαλικότητας, απαιτείται τιτλοδότηση γνωστής ποσότητας δείγματος και όγκου 10mL, υπό συνεχή ανάδευση pH-μέτρου, το οποίο παραμένει εμβαπτισμένο στο δείγμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, με πρότυπο διάλυμα θεικού οξέος (H_2SO_4) 0,1N μέχρι το ισοδύναμο σημείο λάβει την τιμή 4,5. Στη συνέχεια, καταγράφεται η ποσότητα του πρότυπου διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε.

Η τιμή της ολικής αλκαλικότητας (εκφρασμένη σε $mgCaCO_3/L$) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (Εξ. 3):

$$\text{Ολική Αλκαλικότητα} = \frac{A}{V} \cdot N \cdot 5000 \quad (\text{Εξ. 3})$$

Όπου:

A : ο όγκος του θειικού οξέος (H_2SO_4) 0,1N (σε mL) που χρησιμοποιήθηκε για την τιτλοδότηση,

V : ο όγκος του δείγματος (σε mL),

N : η κανονικότητα (Normality) του οξέος.

Εναλλακτικά, από την εξίσωση (Εξ. 4):

$$\text{Ολική Αλκαλικότητα} = \frac{A}{V} \cdot t \cdot 1000 \quad (\text{Εξ. 4})$$

Όπου:

t : η συγκέντρωση του οξέος που προκύπτει από την τιτλοδότηση (σε $mgCaCO_3/L$).

Τέλος, το pH του τελικού σημείου που προκύπτει αναγράφεται ως εξής:

$$\langle \text{Η αλκαλικότητα σε pH} \text{ _____} = \text{_____ } mgCaCO_3/L \rangle$$

Που προκύπτει από την Εξ. 4 και επαληθεύεται με σαφήνεια, εάν αυτό το pH αντιστοιχεί σε σημείο καμπής της καμπύλης τιτλοδότησης.

4.1.3 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών αιωρούμενων στερεών

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (**Total Suspended Solids, TSS**) χαρακτηρίζονται τα μη διηθούμενα στερεά. Για τον προσδιορισμό τους, γνωστή ποσότητα όγκου επαρκώς αναμεμιγμένου δείγματος (10mL) διηθείται σε προζυγισμένο φίλτρο αφού φυσικά το ίδιο έχει τοποθετηθεί σε πυραντήριο για διάρκεια περίπου 15min και έχει τεθεί εντός ξηραντήρα για να κρυώσει πλήρως. Έπειτα, το υλικό που κατακρατείται στον ηθμό ξηραίνεται μέχρι σταθερού βάρους σε φούρνο στους 103–105°C για 12h. Η αύξηση του βάρους του ηθμού αντιπροσωπεύει τα ολικά αιωρούμενα στερεά (Εξ. 5):

$$\text{Ολικά Αιωρούμενα Στερεά} \left(\text{σε } \frac{mg}{mL} \text{ ή } \frac{g}{L} \right) = \frac{A-B}{V} \cdot 1000 \quad (\text{Εξ. 5})$$

Όπου:

A : το αρχικό βάρος του φίλτρου + το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 103–105°C (σε mg),

B : το αρχικό βάρος του φίλτρου (σε mg) και

V : ο όγκος του δείγματος (σε mL).

Τα Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (**Volatile Suspended Solids, VSS**) αποτελούν το κλάσμα των ολικών αιωρούμενων στερεών, το οποίο αναφλέγεται στους 550°C. Για τον προσδιορισμό τους, σε συνέχεια της προηγούμενης διαδικασίας,

το φίλτρο στο οποίο έχουν κατακρατηθεί τα ολικά αιωρούμενα στερεά, πυρακτώνεται, μέχρι σταθερού βάρους σε πυραντήριο στους 550 °C για περίπου 15min και κατόπιν αφήνεται να κρυώσει εντός ξηραντήρα για εξίσου χρονικό διάστημα. Η μείωση του βάρους του φίλτρου αντιστοιχεί στα πτητικά αιωρούμενα στερεά (Εξ. 6):

$$\text{Πτητικά αιωρούμενα στερεά(σε g/L)} = \frac{A-C}{V} \cdot 1000 \quad (\text{Εξ. 6})$$

Όπου:

A: το αρχικό βάρος του φίλτρου + το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 103–105°C (σε mg),

C: το αρχικό βάρος του φίλτρου (σε mg) + το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 550°C (σε mg) και

V: ο όγκος του δείγματος (σε mL).

4.1.4 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών στερεών

Ολικά Στερεά (Total Solids, TS)

Καλά αναμεμειγμένη ποσότητα δείγματος όγκου 20mL εξατμίζεται σε προζυγισμένη κάψα και ξηραίνεται μέχρι σταθερού βάρους σε φούρνο στους 103–105 °C για περίπου 12h και κατόπιν αφήνεται να κρυώσει εντός ξηραντήρα για χρονικό διάστημα 15min. Η αύξηση του βάρους σε σχέση με αυτό της άδειας κάψας αντιπροσωπεύει τα **Ολικά Στερεά (Total Solids, TS)**. Ο υπολογισμός τους μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας την παρακάτω σχέση (Εξ. 7):

$$\text{Ολικά στερεά(σε g/L)} = \frac{A-B}{V} \cdot 1000 \quad (\text{Εξ. 7})$$

Όπου:

A: το αρχικό βάρος της κάψας + το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 103–105°C (σε mg),

B: το αρχικό βάρος της κάψας (σε mg) και

V: ο όγκος του δείγματος (σε mL).

Πτητικά Στερεά (Volatile Solids, VS)

Το αποξηραμένο υπόλειμμα μαζί με την κάψα από την προηγούμενη μέθοδο με τα **Ολικά Στερεά (TS)** αναφλέγεται μέχρι σταθερού βάρους στους 550°C για δύο (2) περίπου ώρες. Συνήθως, απαιτείται ανάφλεξη 15-20min για 200mg υπολείμματος. Ωστόσο, για βαρύτερα κατάλοιπα, όπως στη δική μας περίπτωση, μπορεί να απαιτήσουν μεγαλύτερους χρόνους ανάφλεξης.

Κατόπιν, η κάψα αφήνεται να κρυώσει εντός ξηραντήρα για χρονικό διάστημα 15min και τα υπόλοιπα στερεά αντιπροσωπεύουν τα **Μη Πτητικά Στερεά (Fixed Solids, FS)**, ενώ το βάρος που χάνεται κατά την ανάφλεξη είναι τα **Πτητικά Στερεά (Volatile Solids, VS)**. Ο προσδιορισμός τους είναι χρήσιμος στον έλεγχο της λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων, επειδή προσφέρει μια προσέγγιση της ποσότητας της οργανικής ύλης που εμπεριέχεται στο στερεό κλάσμα των λυμάτων, της ενεργού ιλύος και των βιομηχανικών αποβλήτων. Ο υπολογισμός τους μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας την παρακάτω σχέση (Εξ. 8):

$$\text{Πτητικά Στερεά(σε g/L)} = \frac{A-B}{V} \cdot 1000 \quad (\text{Εξ. 8})$$

Όπου:

A: το αρχικό βάρος της κάψας + το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 103-105°C (σε mg) – δηλαδή, πριν την ανάφλεξη–,

B: το αρχικό βάρος της κάψας + το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 550°C (σε mg) – δηλαδή, μετά την ανάφλεξη– και

V: ο όγκος του δείγματος (σε mL).

4.1.5 Προσδιορισμός χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD)

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο με τα Χημικά Χαρακτηριστικά των Λυμάτων, ο προσδιορισμός του **Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD)** χρησιμοποιείται για την μέτρηση της οργανικής ισχύος και αντιστοιχεί στη συνολική ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξειδωση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό.

Η αντίδραση πραγματοποιείται με ισχυρό οξειδωτικό μέσο σε όξινο περιβάλλον, δηλαδή προστίθενται περίσσεια διχρωμικού καλίου ($K_2Cr_2O_7$), με θέρμανση σε ειδικό φούρνο (Hatch COD Reactor) σε θερμοκρασίες 141-143°C για 2 ώρες. Ως καταλύτης, για την οξειδωση των οργανικών ενώσεων, χρησιμοποιείται θειικό οξύ (H_2SO_4). Η αρχική διαδικασία περιλαμβάνει την προσθήκη σε ειδικά φιαλίδια 2,8mL καταλύτη H_2SO_4 , 1,2mL οξειδωτικού $K_2Cr_2O_7$ και 2mL δείγματος ή απιονισμένου νερού για την μέτρηση του τυφλού διαλύματος (blank).

Πιο συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός του (διαλυτού) Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (**Soluble Chemical Oxygen Demand, sCOD**) γίνεται με τη μέθοδο κλειστής επαναρροής με φωτομέτρηση στα 600nm σε ηλεκτρονικό φωτόμετρο τύπου Hach Lange (DR2800). Η μέθοδος αυτή περιγράφεται αναλυτικά στο εγχειρίδιο “Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater” – Μέθοδος 5220D. Να σημειωθεί ότι η επαναρροή είναι απαραίτητη εξαιτίας της ύπαρξης πτητικών οργανικών ενώσεων, οι οποίες κάτω από τις συνθήκες θέρμανσης μπορούν να

διαφύγουν. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης του διαλυτού COD γίνεται με την αναγωγή της απορρόφησης σε συγκέντρωση, με τη βοήθεια “πρότυπης καμπύλης” βαθμονόμησης. Δηλαδή, όσο περισσότερο διχρωμικό κάλιο έχει αντιδράσει, τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση που λαμβάνεται κατά την φωτομέτρηση.

4.1.6 Προσδιορισμός του ολικού αζώτου (TN)

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του **Ολικού Αζώτου (Total Nitrogen, TN)** πραγματοποιήθηκε σε κάθε δείγμα επίσης με τη βοήθεια της αναλυτικής συσκευής μέτρησης ολικού αζώτου (SHIMADZU TOC-L).

4.1.7 Προσδιορισμός νιτρικών

Ο ποσοτικός προσδιορισμός νιτρικών ιόντων για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια αναλυτικής συσκευής μέτρησης νιτρικών με Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης (**Atomic Absorption Spectroscopy, AAS**) σε εξωτερικό εργαστήριο.

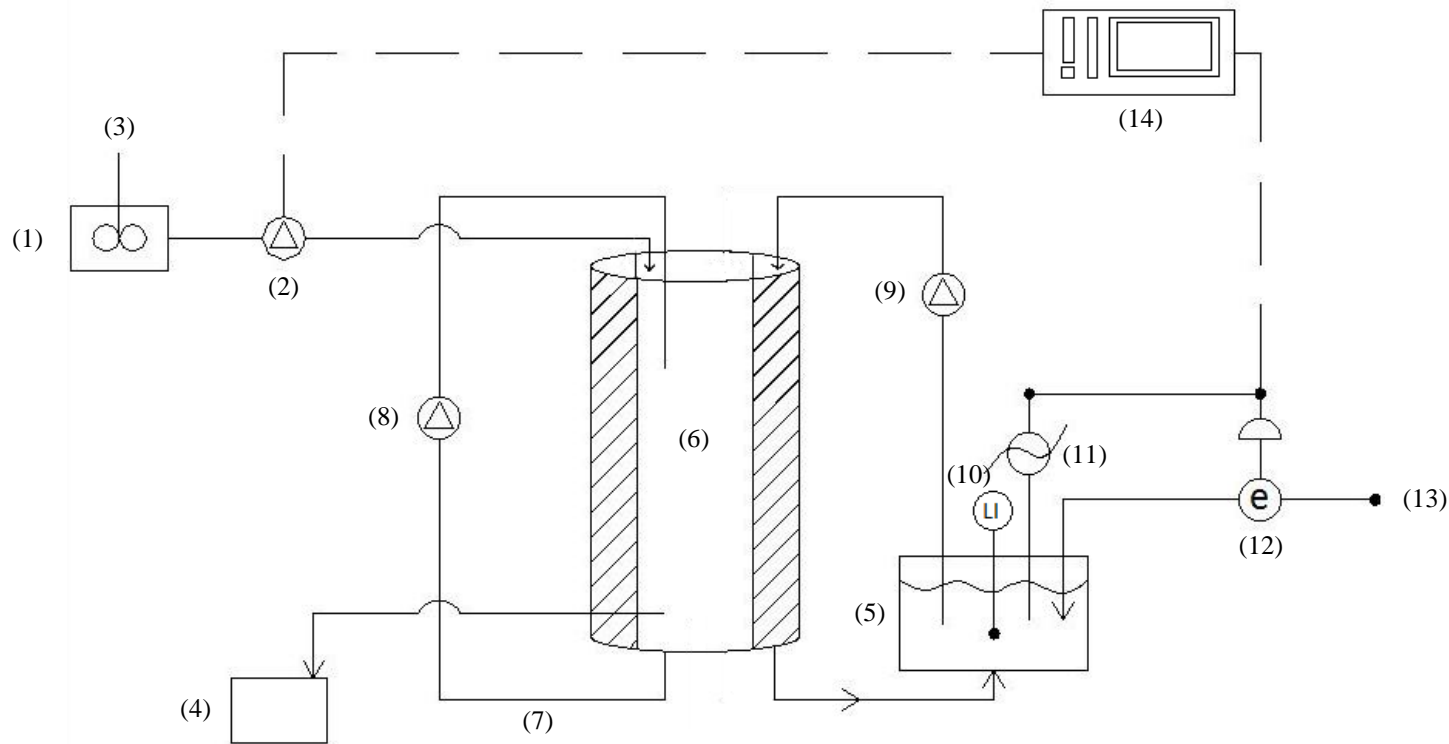
4.2 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική μας διάταξη αποτελείται από τα εξής (βλ. Σχήμα 13):

- Δοχείο τροφοδοσίας υγρού αποβλήτου-influent (παγολεκάνη, influent tank) [1],
- Αντλία τροφοδοσίας (lift pump) [2],
- Αναδευτήρας δοχείου τροφοδοσίας (stirrer) με θερμοστοιχείο [3],
- Δοχείο συλλογής εκροής-effluent (drain effluent tank) [4],
- Δεξαμενή νερού για το λουτρό (bath) στα τοιχώματα του αντιδραστήρα [5],
- Κύριο δοχείο αντίδρασης (reaction zone & tank), όπου και πραγματοποιείται ο αερισμός κατά την ανακυκλοφορία του ανάμικτου υγρού [6],
- Ανακυκλοφορία ανάμικτου υγρού [7],
- Αντλία ανακυκλοφορίας ανάμικτου υγρού [8],
- Υποβρύχια αντλία ανακυκλοφορίας νερού για το λουτρό στα τοιχώματα και πίσω στη δεξαμενή νερού [9],
- Όργανο μέτρησης στάθμης νερού (level indicator) στη δεξαμενή νερού [10],
- Ηλεκτρική αντίσταση για θέρμανση της δεξαμενής νερού [11],
- Ηλεκτρική βάννα για απώλειες νερού στη δεξαμενή νερού [12],
- Παροχή νερού από δίκτυο ύδρευσης [13],
- Πίνακας ελέγχου (control panel) για ρυθμίσεις αυτοματισμού και ενώνεται νοητά με ολόκληρο το σύστημα [14],
- Λοιπός ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (βάνες, όργανα μέτρησης κ.ά.) [15].



Εικόνα 4: Πειραματική διάταξη αντιδραστήρα SBR. Αριστερά: Η συνολική (κύρια) διάταξη της διεργασίας. Δεξιά: Δοχείο τροφοδοσίας υγρού αποβλήτου-influent (παγολεκάνη, influent tank).



Σχήμα 13: Διάγραμμα ροής πειραματικής διάταξης. (1) Δοχείο τροφοδοσίας-influent (παγολεκάνη, influent tank), (2) Αντλία τροφοδοσίας (lift pump), (3) Αναδευτήρας δοχείου τροφοδοσίας (stirrer) με θερμοστοιχείο – το οποίο δεν αναπαρίσταται σχηματικά–, (4) Δοχείο συλλογής εκροής-effluent (drain effluent tank), (5) Δεξαμενή νερού για το λουτρό (bath) στα τοιχώματα του αντιδραστήρα, (6) Κύριο δοχείο αντίδρασης (reaction zone & tank), όπου και πραγματοποιείται ο αερισμός, (7) Ανακυκλοφορία ανάμικτου υγρού, (8) Αντλία ανακυκλοφορίας ανάμικτου υγρού, (9) Υποβρύχια αντλία ανακυκλοφορίας νερού για το λουτρό στα τοιχώματα και πίσω στη δεξαμενή νερού, (10) Όργανο μέτρησης στάθμης (level indicator), (11) Ηλεκτρική αντίσταση, (12) Ηλεκτρική βάννα για απώλειες νερού στη δεξαμενή νερού, (13) Παροχή νερού από δίκτυο ύδρευσης, (14) Πίνακας ελέγχου (control panel) για ρυθμίσεις αυτοματισμού σε ολόκληρο το σύστημα, (15) Λοιπός ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (βάνες, όργανα μέτρησης κ.ά.) – δεν αναπαρίσταται σχηματικά.

4.3 Πειραματική Διεργασία

Για τα παρακάτω πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένας αντιδραστήρας SBR 15L. Σε κάθε πειραματικό κύκλο τροφοδοτούνταν με ποσότητα αποβλήτου ίσου όγκου με τα 2/3 του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα. Επίσης ίση ποσότητα αφαιρούνταν κατά το στάδιο της εκροής. Το 1/3 του ενεργού του όγκου καταλάμβανε η ενεργός ιλύς, η οποία παρέμενε στον αντιδραστήρα καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου.

Κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εκτελέστηκαν τρεις (3) πειραματικές φάσεις. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε συνθετικό υγρό απόβλητο, σκοπός του οποίου είναι η προσομοίωση των αστικών λυμάτων. Η σύσταση του ανωτέρου αποβλήτου αναγράφεται στον παρακάτω Πίνακα 4:

Πίνακας 4: Χημική σύσταση τροφοδοσίας συνθετικού υγρού αποβλήτου και περιεκτικότητες. (Liu et al., 2020)

Χημική σύσταση συνθετικού υγρού αποβλήτου		
Χημική ένωση	Συγκέντρωση (mg/L)	
	1 ^η φάση	2 ^η φάση
Γλυκόζη, $C_6H_{12}O_6$	600	500
Χλωριούχο αμμώνιο, NH_4Cl	152,8	
Φωσφορικό κάλιο, KH_2PO_4	43,9	
Θεικό μαγνήσιο (ένυδρο), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	27,5	
Χλωριούχο ασβέστιο, $CaCl_2$	2,5	
Χλωριούχο κάλιο, KCl	4,0	
Διττανθρακικό νάτριο (σόδα), $NaHCO_3$	125	
Trace element solution*	1 mL/L	

Πίνακας 5: Χημική σύσταση διαλύματος ιχνηθέτη (trace element solution) και περιεκτικότητες.* (Liu et al., 2020)

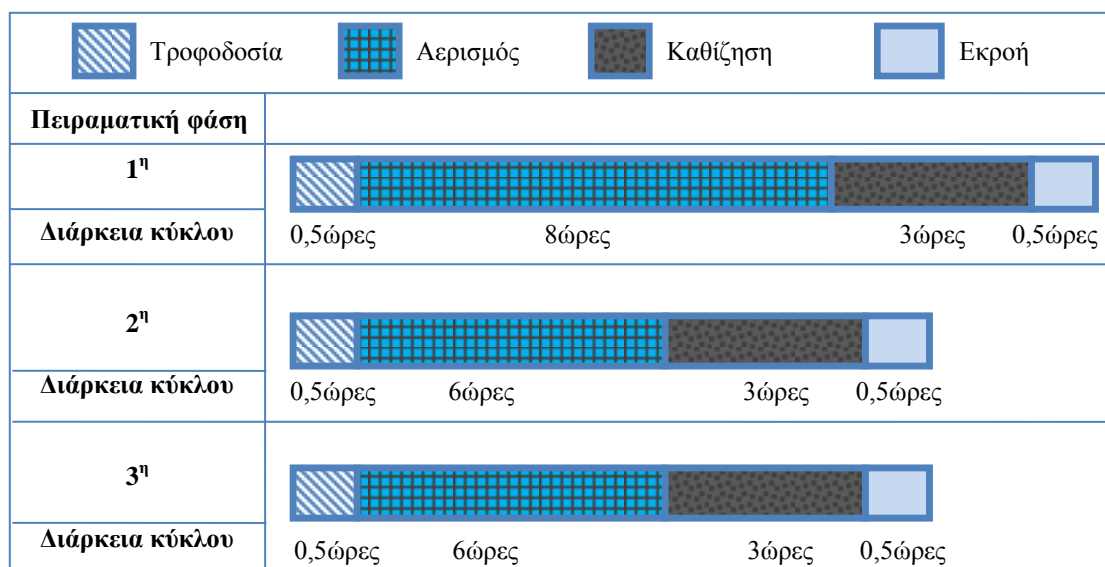
Χημική σύσταση διαλύματος trace element	
Χημική ένωση	Συγκέντρωση (mg/L)
Βορικό οξύ, H_3BO_3	187,5
Χλωριούχος σίδηρος (ένυδρος), $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	1875
Θεικός χαλκός (ένυδρος), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	37,5
Ιωδιούχο κάλιο, KI	225
Θεικό μαγγάνιο, $MnSO_4$	150
Θεικός ψευδάργυρος (ένυδρος), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	150
EDTA	12500

Κατά την πρώτη φάση λειτουργίας, επιλέχθηκε κύκλος με διάρκεια δώδεκα (12) ωρών, ενώ, σε δεύτερη φάση, η διάρκεια του κύκλου λειτουργίας μειώθηκε στις δέκα (10) ώρες. Η μείωση αυτή, αποτελεί μείωση ως προς την διάρκεια του αερισμού – από τις οκτώ (8) στις έξι (6) ώρες. Μειώθηκε επίσης κατά 100mg/L και η συγκέντρωση της γλυκόζης με σκοπό το σύστημα να μην παρουσιάσει δυσκολία προσαρμογής στις νέες συνθήκες. Ο χρόνος της τροφοδοσίας, της καθίζησης και τις εκροής παρέμεινε ο ίδιος – στις 0,5 ώρες, 3 ώρες και 0,5 ώρες, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, αφού ολοκληρώθηκαν οι δύο παραπάνω πειραματικές φάσεις, ο

αντιδραστήρας άρχισε να τροφοδοτείται από την εκροή **Αναερόβιου Ταχύρυθμου Αντιδραστήρα (Periodic Anaerobic Baffled Reactor, PABR)**. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6), παρατίθενται οι χρόνοι κάθε σταδίου σε έναν πλήρη κύκλο του SBR για κάθε πειραματική φάση. Η αντίστοιχη σχηματική απεικόνιση παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 14.

Πίνακας 6: Χρόνοι κάθε σταδίου σε έναν πλήρη κύκλο του SBR για κάθε μια από τις τρεις (3) πειραματικές φάσεις.

Πειραματική φάση	Διάρκεια Κύκλου (Ωρες)	Τροφοδοσία (Ωρες)	Αερισμός (Ωρες)	Καθίζηση (Ωρες)	Εκροή (Ωρες)
1	12	0,5	8	3	0,5
2	10	0,5	6	3	0,5
3	10	0,5	6	3	0,5



Σχήμα 14: Σχηματική απεικόνιση χρόνων κάθε σταδίου σε έναν πλήρη κύκλο του SBR για κάθε μια από τις τρεις (3) πειραματικές φάσεις.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να επισημανθεί ότι η φάση της εκροής του υπερκείμενου υγρού από τον αντιδραστήρα (discharge) και εκείνης της απομάκρυνσης περίσσειας ιλύος (idle) πραγματοποιούνται ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου, διότι λόγω απουσίας στερεών στο συνθετικό απόβλητο, καθώς και χαμηλής συγκέντρωσης στερεών στην εκροή του αναερόβιου αντιδραστήρα δεν παράγεται σημαντική ποσότητα περίσσειας ιλύος. Ειδικότερα, όπως θα αναφερθεί αναλυτικά παρακάτω, δεν υπήρξε ανοξικό στάδιο στο σύστημα, καθώς δεν κρίθηκε απαραίτητο εκ του αποτελέσματος. Καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους 35 °C.

5. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

5.1 Χαρακτηρισμός τροφοδοσίας

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 4.3 της Πειραματικής Διεργασίας, στην 1^η και 2^η πειραματική φάση, το απόβλητο που χρησιμοποιήθηκε ήταν συνθετικό, για λόγους προσομοίωσης. Επομένως, στον Πίνακα 7 παρακάτω, τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), καθώς και τα Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS) θεωρούνται πως είναι μηδενικά.

Ακόμα, παρατηρείται ότι τα επίπεδα του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD) στην τροφοδοσία κυμαίνονται μεταξύ του εύρους 400-800mg/L, του Ολικού Αζώτου (TN) μεταξύ του εύρους 14-34mg/L, η Ολική Αλκαλικότητα μεταξύ του εύρους 320-1200mg_{CaCO₃}/L, ενώ το pH διατηρείται σχεδόν σταθερό – κοντά στο 7. Από όλα τα παραπάνω, μπορεί να αξιολογηθεί ότι, για κάθε πειραματική φάση, η τροφοδοσία μπορεί να τοποθετηθεί κατά βάση στην κατηγορία ανεπεξέργαστων αποβλήτων ενδιάμεσης-ισχυρής ισχύος.

Πίνακας 7: Μέσες τιμές για Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD), Ολικό άζωτο (TN) και Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS) για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις, όσον αφορά την Τροφοδοσία του SBR.

Πειραματική φάση	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, COD (mg/L)	Ολικό Αζωτο, TN (mg/L)	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά, TSS (mg/L)
1	547,0	32,9	-
2	444,9	33,3	-
3	796,3	14,7	500

Πίνακας 8: Μέσες τιμές για Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS), pH και Ολική Αλκαλικότητα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις, όσον αφορά την Τροφοδοσία του SBR.

Πειραματική φάση	Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά, VSS (mg/L)	pH	Ολική Αλκαλικότητα, Total Alkalinity (mg _{CaCO₃} /L)
1	-	6,8	329
2	-	7,0	513
3	350	7,7	1153

5.2 Εκροή

Στον παρακάτω Πίνακα 9, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές για τον χαρακτηρισμό της εκροής του SBR και, πιο συγκεκριμένα, για το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD), το Ολικό άζωτο (TN), τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), τα Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS), το pH και την Ολική Αλκαλικότητα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις.

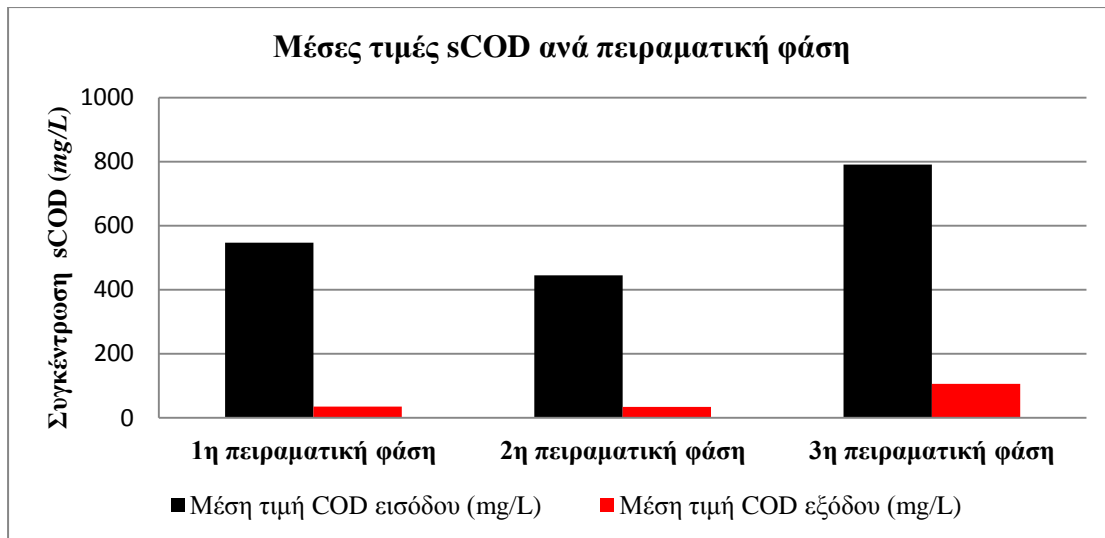
Πίνακας 9: Μέσες τιμές για Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD), Ολικό άζωτο (TN), Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS), pH και Ολική Αλκαλικότητα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις, όσον αφορά την Εκροή του SBR.

Πειραματική φάση	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, COD (mg/L)	Ολικό Άζωτο, TN (mg/L)	Ολικά Στερεά, TS (mg/L)	Πτητικά Στερεά, VSS (mg/L)	pH	Ολική Αλκαλικότητα, Total Alkalinity (mg _{CaCO₃} /L)
1	35,1	3,9	0,1	0,07	7,7	289
2	34,4	10,1	0,4	0,39	7,9	488
3	106,0	12,4	0,25	0,19	8,3	1100

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα, ο SBR φαίνεται να παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας. Σε κάθε πειραματική φάση, η εκροή παρουσιάζει συγκέντρωση οργανικών κάτω από το περιβαλλοντικό όριο απόρριψης των 120mg/L. Ωστόσο, όσον αφορά την απομάκρυνση του αζώτου, ο αντιδραστήρας δεν παρουσιάζεται να διαθέτει αντίστοιχη ικανότητα ικανοποιητικής απομάκρυνσής του, κρίνοντας κυρίως από τα αποτελέσματα της τρίτης (3^{ης}) πειραματικής φάσης.

Για το γεγονός αυτό, ευθύνεται η απουσία του ανοξικού σταδίου στον κύκλο λειτουργίας του SBR. Παρ' όλα αυτά, η συγκέντρωση του ολικού αζώτου παραμένει χαμηλότερη από το περιβαλλοντικό όριο των 14mg/L, συμβάν το οποίο δεν κρίνει απαραίτητο την ενσωμάτωση ανοξικού σταδίου στο σύστημα του αντιδραστήρα.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι τα επίπεδα του pH στην εκροή παραμένουν σταθερά και κοντά στο 8 (διακύμανση μεταξύ 7,7-8,3 – βασικές συνθήκες), ενώ η ολική αλκαλικότητα κυμαίνεται ανάμεσα 280-1100mg_{CaCO₃}/L. Συγκρίνοντας τις τιμές του pH και της αλκαλικότητας μεταξύ τροφοδοσίας και εκροής, παρατηρείται ότι οι βιολογικές διεργασίες που επιτελούνται μέσα στον SBR δεν επηρεάζουν σημαντικά τις συγκεκριμένες ιδιότητες του αποβλήτου.

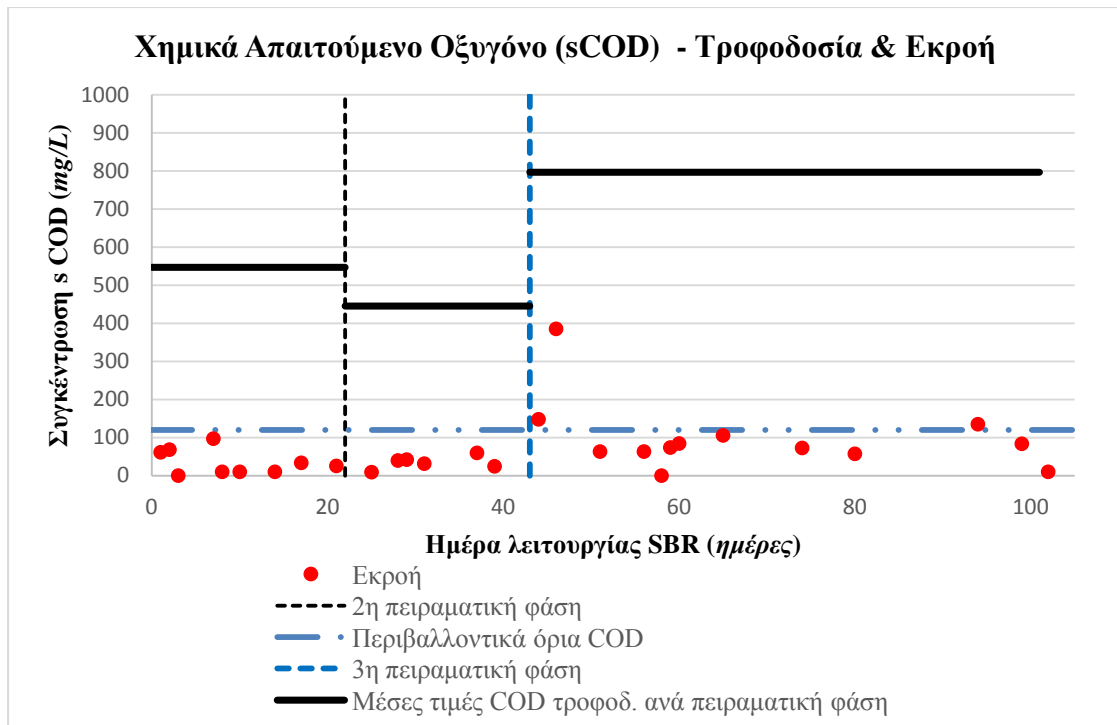


Σχήμα 15: Μέσες τιμές COD εισόδου και εξόδου στην τροφοδοσία και εκροή του SBR, αντίστοιχα, για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις.

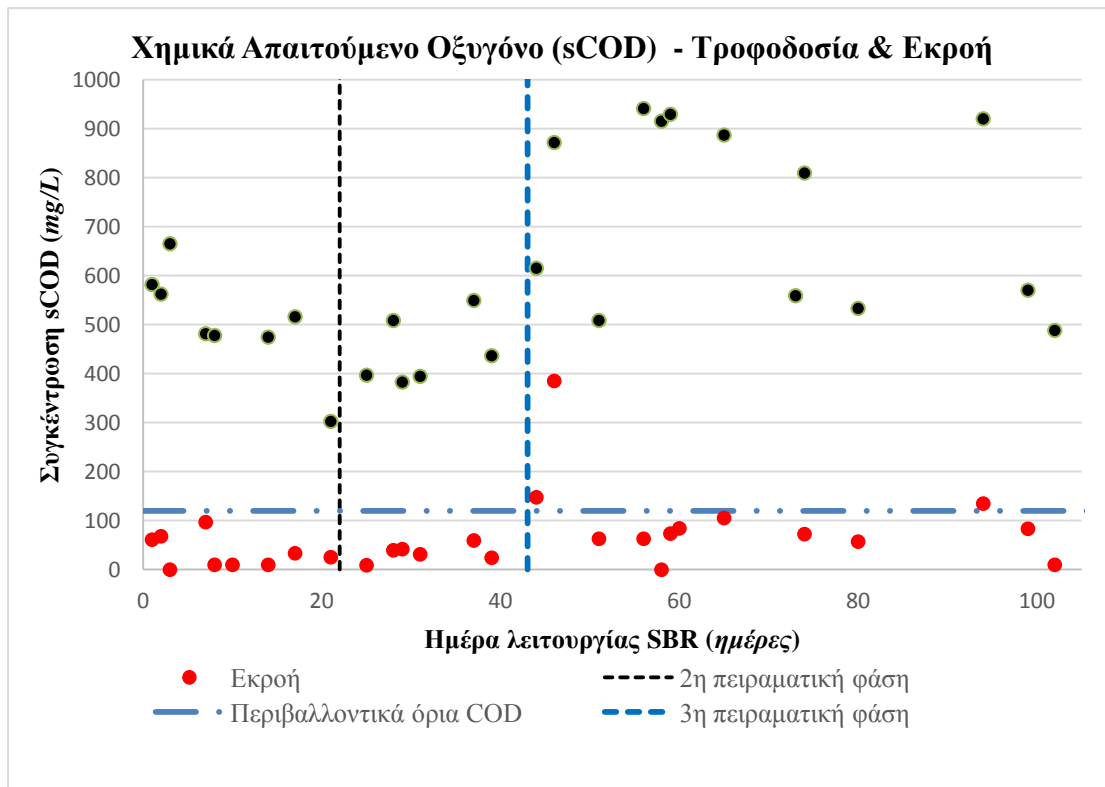
Στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 15), απεικονίζεται και σχηματικά η μείωση της συγκέντρωσης του (διαλυτού) COD (μέσες τιμές συγκεντρώσεων) από την τροφοδοσία έως και την εκροή του αντιδραστήρα. Σε γενικό πλαίσιο, η απομάκρυνση COD κρίνεται ικανοποιητική και, όπως ήδη αναφέρθηκε, βρίσκεται εντός ορίων που ορίζει περιβαλλοντικά η νομοθεσία. Σε αυτή την περίπτωση, επιλέχθηκε το περιβαλλοντικό όριο των 125mg/L , με βάση την αντίστοιχη νομοθεσία που παρατέθηκε παραπάνω σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. Κεφάλαιο 1, Παράγραφο 2.3).

Κάτι επιπλέον που μπορεί να παρατηρηθεί στο ίδιο διάγραμμα, είναι η αύξηση του COD εισόδου στην τροφοδοσία του SBR κατά την 3^η πειραματική φάση, συγκριτικά με την 1^η και τη 2^η.

Περνώντας στο Σχήμα 16, όπου και απεικονίζονται πιο αναλυτικά οι τιμές του COD ανά πειραματική φάση και ημέρα λειτουργίας SBR – σημείο-σημείο σε εκροή και μέσες τιμές σε τροφοδοσία–, παρουσιάζουν μια ελαφρά διακύμανση, ωστόσο, είναι όλες εντός αποδεκτών περιβαλλοντικών ορίων – πλην ελάχιστων εξαιρέσεων.



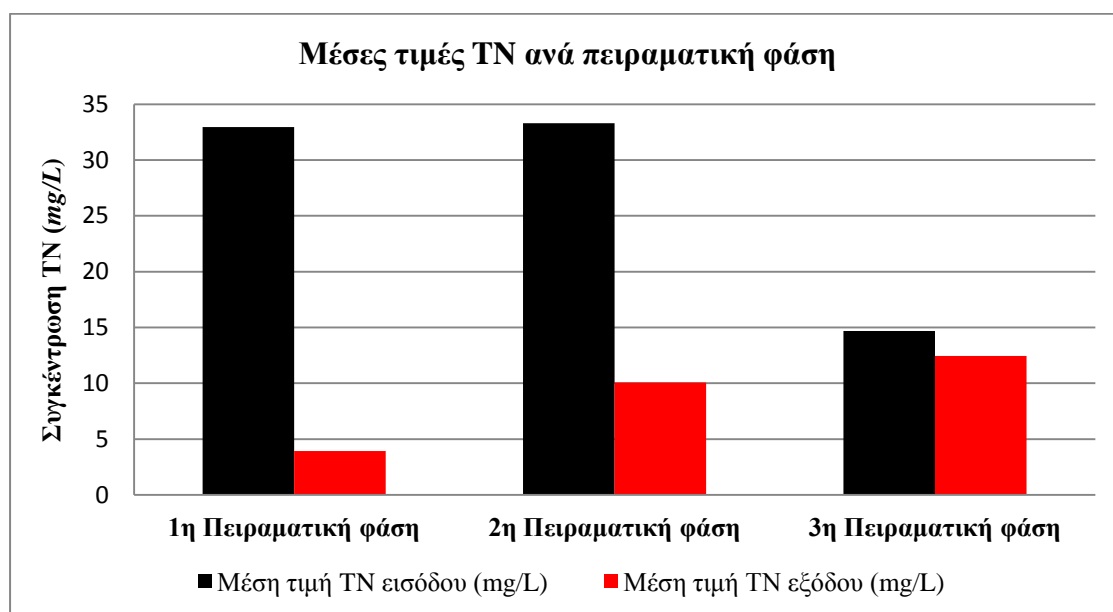
Σχήμα 16: Διάγραμμα για το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, COD (mg/L) συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του SBR (ημέρες) για την Τροφοδοσία και την Εκροή για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις.



Σχήμα 17: Διάγραμμα για το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, COD (mg/L) συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του SBR (ημέρες) για την Τροφοδοσία και την Εκροή για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις.

Οι εξαιρέσεις αυτές, όπως για παράδειγμα, ορισμένες τιμές στην αρχή της 3^{ης} πειραματικής φάσης, φαίνεται να είναι άνω του ορίου αυτού. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στη μετάβαση από τη μια πειραματική φάση στην επόμενη και η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται ως προβλεπόμενη.

Όσον αφορά τις διακυμάνσεις στις τιμές του COD τροφοδοσίας, κατά την 1^η και 2^η πειραματική φάση, αυτό οφείλεται στις διεργασίες που συμβαίνουν εντός της παγολεκάνης (δοχείου τροφοδοσίας), όπως, για παράδειγμα, όξυνση. Αντίθετα, κατά την 3^η πειραματική φάση, η διακύμανση είναι προβλεπόμενη, καθώς το απόβλητο τροφοδοσίας κάθε φορά είναι διαφορετικό, εφόσον προέρχεται από την εκροή του PABR και συγχρόνως διαθέτει διαφορετικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τη φορά.



Σχήμα 18: Μέσες τιμές TN εισόδου και εξόδου στην τροφοδοσία και εκροή του SBR, αντίστοιχα, για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις.

Ερχόμενοι στον σχολιασμό των αποτελεσμάτων του ολικού αζώτου, παραπάνω (βλ. Σχήμα 18) παρουσιάζονται οι μέσες τιμές TN εισόδου και εξόδου στην τροφοδοσία και εκροή του SBR, αντίστοιχα, για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις. Αρχικά, όπως μελετάται, η απομάκρυνση αζώτου έχει μειωθεί αισθητά από την 1^η στην 3^η πειραματική φάση.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την 1^η φάση, το ποσοστό απομάκρυνσης υπολογίζεται, με βοήθεια μέσων τιμών συγκεντρώσεων TN εισόδου-εξόδου (σε τροφοδοσία και εκροή, αντίστοιχα), στα 88%, κατά την 2^η φάση στα 70%, ενώ κατά την 3^η φάση, μόλις στα 15% – ποσοστό που υποδηλώνει ότι δεν πραγματοποιείται απομάκρυνση TN. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται πιθανώς στο ότι στις δύο (2) πρώτες πειραματικές φάσεις, τα βακτήρια προέρχονταν απευθείας από βιολογικό καθαρισμό και η δράση τους ήταν πιο άμεση και αποδοτικά ορατή.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε και ανάλυση ιόντων για ανίχνευση νιτρικών και φωσφορικών σε δείγματα τροφοδοσίας, αντιδραστήρα κατά την φάση του

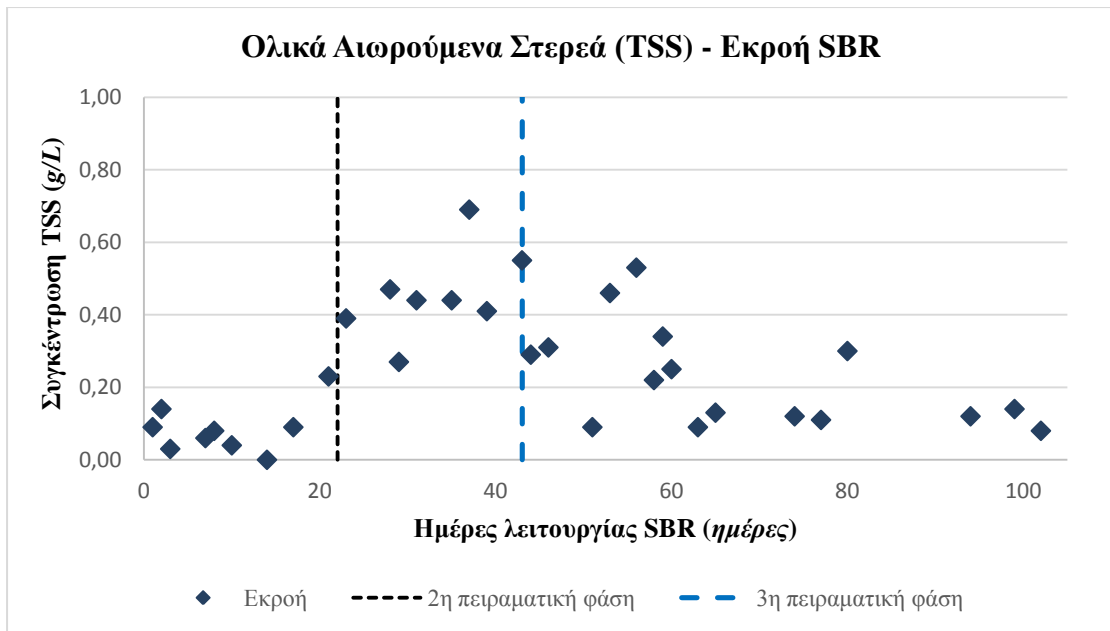
αερισμού και υπό ανάδευση καθώς και εκροής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10) και οι αναλύσεις αφορούν την 3^η πειραματική φάση όπου παρουσιάζεται η μειωμένη απομάκρυνση αζώτου:

Πίνακας 10: Αποτελέσματα ανάλυσης ιόντων (φθορίου, χλωρίου, βρωμίου, νιτρωδών, νιτρικών, φωσφορικών και θεικών) για τροφοδοσία και εκροή SBR.

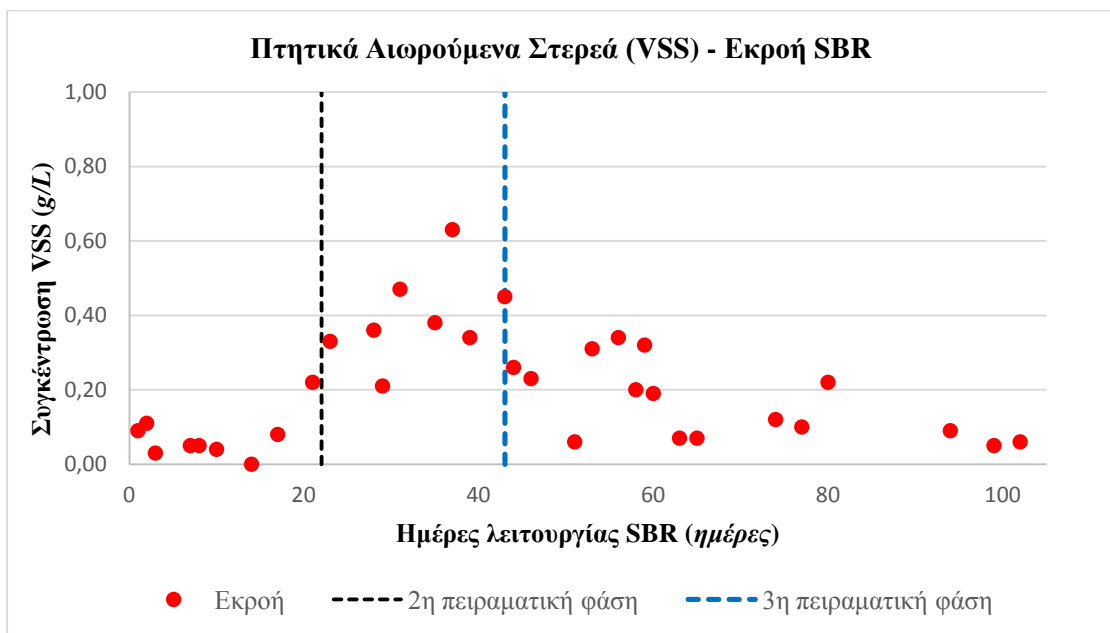
Ιόντα	Τροφοδοσία (mg/L)	SBR (mg/L)	Εκροή (mg/L)
Φθορίου	0,09	0,321	0,248
Χλωρίου	111	118	117
Νιτρώδη	< 0,15	< 0,15	< 0,15
Νιτρικά	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Βρωμίου	0,799	0,729	0,699
Φωσφορικά	3,22	7,87	3,65
Θειικά	2,28	7,63	9,21

Από τα παραπάνω στοιχεία του πίνακα, αυτά που μας απασχολούν κυριότερα είναι τα ιόντα νιτρωδών, νιτρικών και φωσφορικών. Από τα ανωτέρω αποτελέσματα, συμπεραίνεται λοιπόν ότι δεν ανιχνεύθηκαν σημαντικές ποσότητες από νιτρώδη και νιτρικά σε δείγματα τροφοδοσίας και εκροής, καθώς οι συγκεντρώσεις τους αποδείχτηκαν χαμηλές – κάτω των 0,15mg/L και 0,5mg/L, αντίστοιχα. Όσον αφορά τα φωσφορικά ιόντα (PO_4^{3-}), επειδή δεν πρόκειται για ατομικό φώσφορο (P, μικρότερη μοριακή μάζα από τον ιόν του), οι παραπάνω συγκεντρώσεις μπορούν να θεωρηθούν εντός αποδεκτών περιβαλλοντικών ορίων και σύμφωνες με τις περιβαλλοντικές οδηγίες. Η απουσία νιτρώδους αζώτου υποδηλώνει ότι παρά τις ευνοϊκές για αυτήν συνθήκες (pH, θερμοκρασία, συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου), η διαδικασία της νιτροποίησης δεν συντελείται στον αντιδραστήρα. Η νιτροποίηση συντελείται από αυτότροφους μικροοργανισμούς (Nitrosomas, Nitrobacter). Η απουσία, λοιπόν, των συγκεκριμένων ιόντων οφείλεται σε έκπλυση των συγκεκριμένων μικροοργανισμών από τον αντιδραστήρα είτε σε αδρανοποίηση τους. Όσον αφορά την απουσία νιτρικών ιόντων, οφείλεται ξεκάθαρα στην έλλειψη ανοξικών συνθηκών και κατά συνέπεια στην μη παρουσία απονιτροποιητικών βακτηρίων. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά του SBR μελετάται περαιτέρω στην συνέχεια.

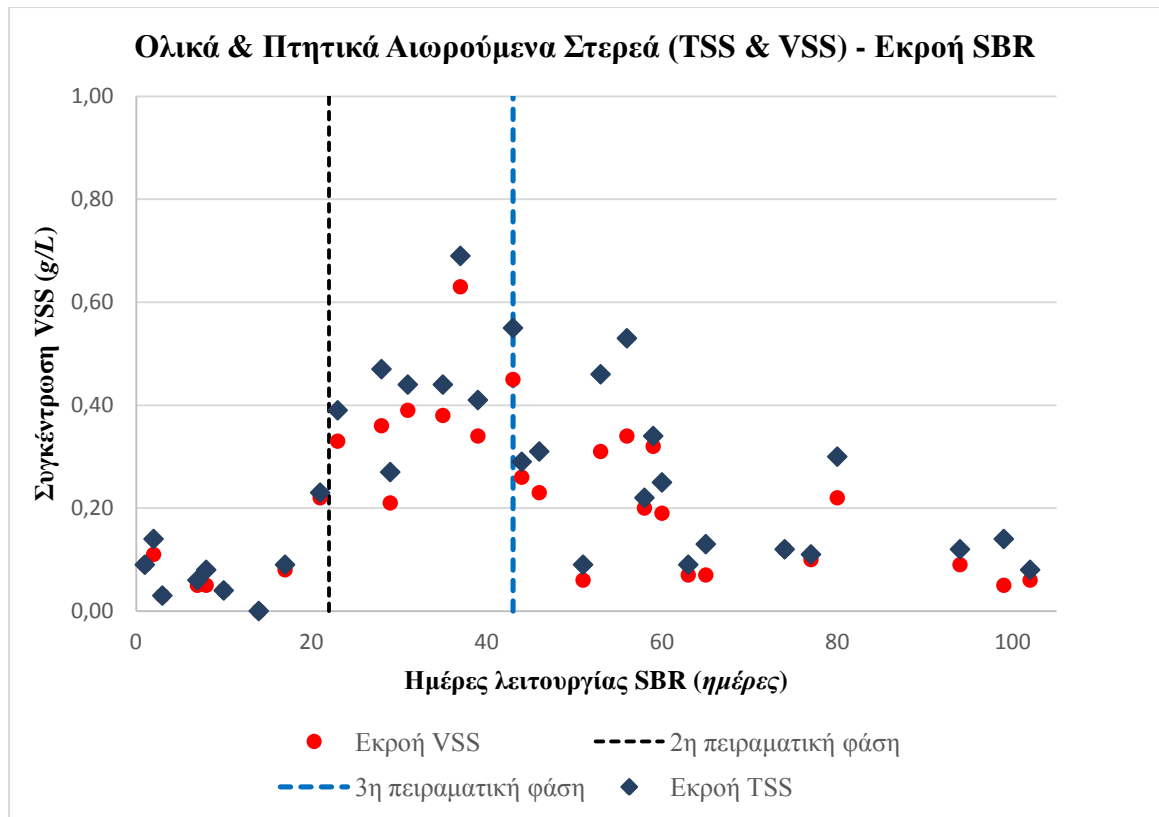
Περνώντας στο σχολιασμό των στερεών, τα αποτελέσματα των οποίων απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα (βλ. Σχήμα 19, 20), η πορεία των TSS και VSS παρατηρείται ότι δεν παραμένει σταθερή. Εν αντιθέσει, παρουσιάζουν μια ανοδική πορεία κατά τη 2^η πειραματική φάση, καθώς και στην αρχή της 3^{ης}. Στη συνέχεια, η πορεία τους φαίνεται να δείχνει μια τάση προς μείωση και, τελικώς, σταθεροποίηση. Αυτό οφείλεται στο ότι ο SBR χρειάζεται μια περίοδο προσαρμογής ανάμεσα στις πειραματικές φάσεις για να προβεί σε μια σταθερή λειτουργία.



Σχήμα 19: Διάγραμμα συγκέντρωσης Ολικών Αιωρούμενων Στερεών, TSS (g/L) ανά ημέρα λειτουργίας SBR (ημέρες) στην εκροή του.



Σχήμα 20: Διάγραμμα συγκέντρωσης Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών, VSS (g/L) ανά ημέρα λειτουργίας SBR (ημέρες) στην εκροή του.



Σχήμα 21: Συνολικό διάγραμμα συγκέντρωσης Ολικών Αιωρούμενων Στερεών, TSS (g/L) ανά ημέρα λειτουργίας SBR (ημέρες) στην εκροή του.

Στο παραπάνω Σχήμα 21, παρουσιάζονται συνδυαστικά τα δεδομένα των Σχημάτων 19 και 20, με σκοπό τη μεταξύ τους σύγκριση TSS-VSS από σημείο σε σημείο. Παρατηρώντας συνολικά τα δεδομένα της κάθε σειράς, αξίζει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει διακύμανση ανάμεσα σε ολικά αιωρούμενα και πτητικά αιωρούμενα στερεά. Αντίθετα, υπάρχει μια «ταύτιση» μετρήσεων με κάθε σχεδόν μέτρηση, που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ημέρα λειτουργίας, τα ολικά αιωρούμενα ταυτίζονται με τα πτητικά αιωρούμενα στερεά. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο κατά τις δύο (2) πρώτες φάσεις λειτουργίας, όπου το υπό επεξεργασία απόβλητο ήταν συνθετικό.

5.3 Συνθήκες SBR

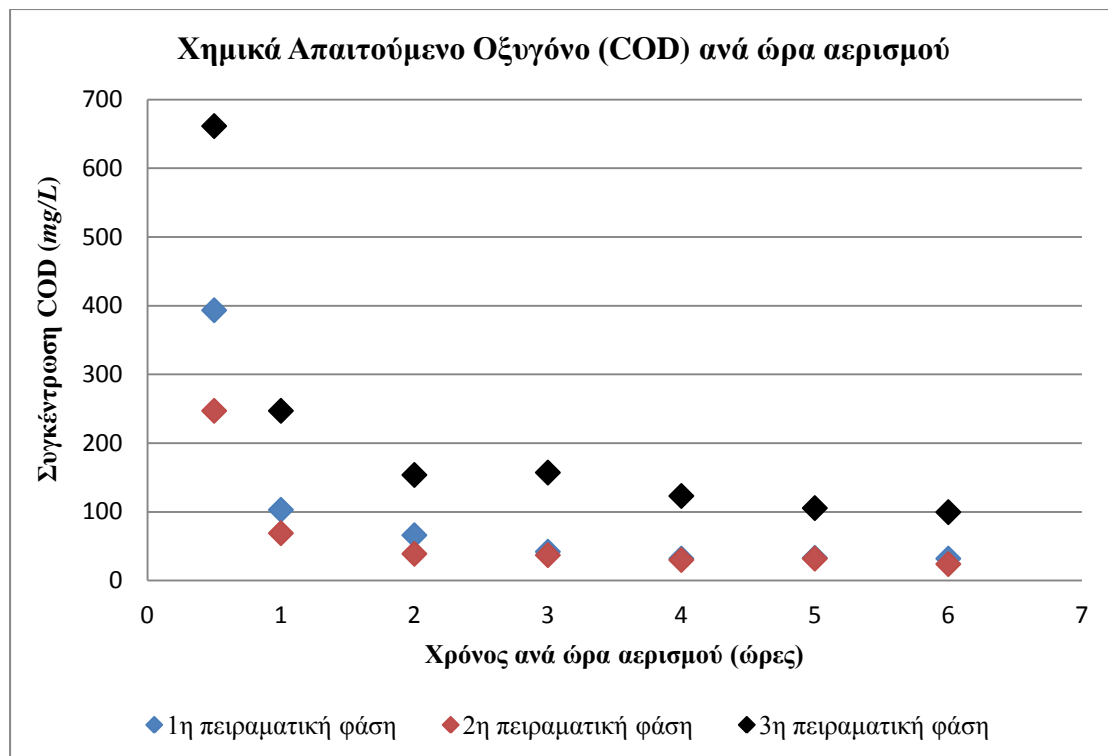
Στον παρακάτω Πίνακα 11, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές για τον χαρακτηρισμό του αντιδραστήρα SBR και, πιο συγκεκριμένα, για τα Ολικά Στερεά (TS), Ολικά Πτητικά Στερεά (VS), τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), τα Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS), το pH και την Ολική Αλκαλικότητα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις.

Πίνακας 11: Μέσες τιμές για Ολικά Στερεά (TS), Ολικά Πτητικά Στερεά (VS), Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS), pH και Ολική Αλκαλικότητα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις, όσον αφορά τον αντιδραστήρα του SBR.

Πειραματική φάση	Ολικά Στερεά, TS (mg/L)	Ολικά Πτητικά Στερεά, VS (mg/L)	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά, TSS (mg/L)	Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά, VSS (mg/L)	pH	Ολική Αλκαλικότητα, Total Alkalinity (mg _{CaCO₃} /L)
1	4,9	2,9	2,9	2,5	8,0	383
2	4,0	2,4	2,2	2,1	7,9	533
3	9,7	5,0	8,6	5,0	8,3	1361

Για τον χαρακτηρισμό του αντιδραστήρα, πραγματοποιείται δειγματοληψία κατά τη διάρκεια του αερισμού από την ανακυκλοφορία. Παρατηρείται, επίσης, ότι κατά την 3^η πειραματική φάση, τα Ολικά Στερεά (TS) στον αντιδραστήρα παρουσίασαν σημαντική αύξηση. Ωστόσο, το pH στον αντιδραστήρα φαίνεται να παραμένει σταθερό και κοντά στο 8, δείχνοντας ότι επικρατούν βασικές συνθήκες.

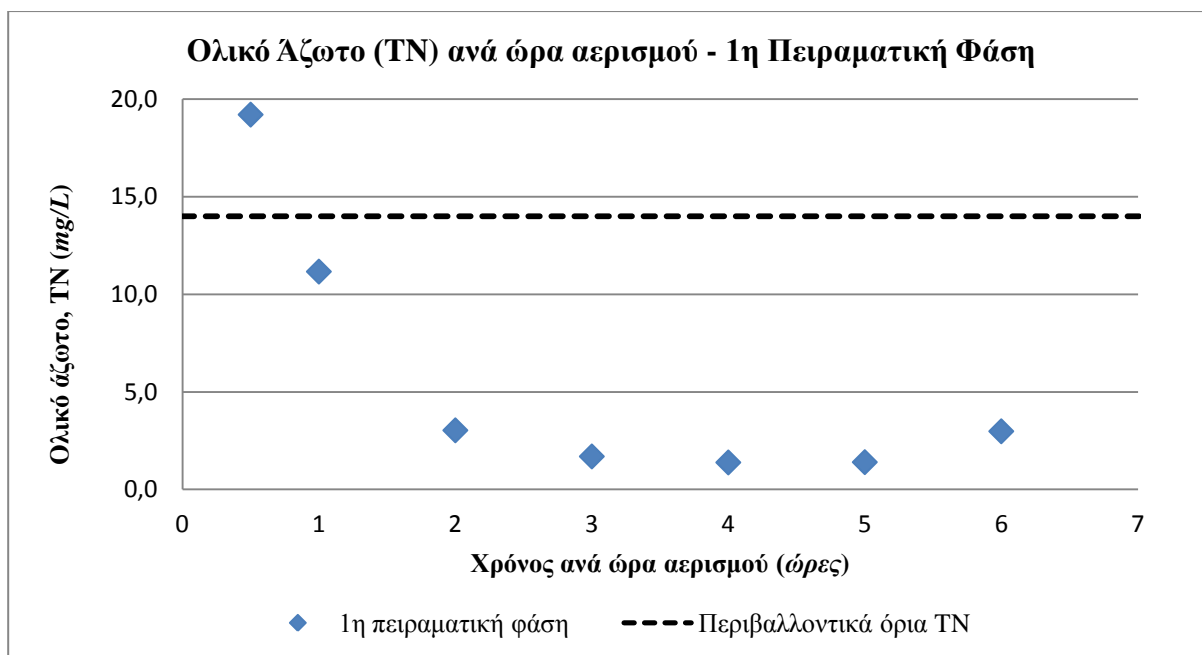
Επιπλέον, στα παρακάτω διαγράμματα (βλ. Σχήμα 22, 23) παρουσιάζεται η μείωση του οργανικού φορτίου στον αντιδραστήρα μέσα στον SBR κατά την διάρκεια του αερισμού, καθώς και η μείωση του ολικού αζώτου κατά τον ίδιο χρόνο. Οι παρακάτω αναλύσεις οδηγούν σε σημαντικά συμπεράσματα για τις συνθήκες που επικρατούν στον αντιδραστήρα καθώς και για το είδος των βιολογικών διεργασιών που επιτελούνται.



Σχήμα 22: Διάγραμμα για το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, COD (mg/L) συναρτήσεως του χρόνου ανά ώρα αερισμού (ώρες) μέσα στον αντιδραστήρα για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις.

Πιο αναλυτικά, στο Σχήμα 22, έχουμε εμφανή μείωση του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD) κατά τη διάρκεια του αερισμού μέσα στον αντιδραστήρα. Συγκεκριμένα, κατά την 1^η και 2^η πειραματική φάση, το COD μέσα στις δύο (2) πρώτες κιόλας ώρες αερισμού έχει καταφέρει να μειωθεί κάτω από το περιβαλλοντικό αποδεκτό όριο απόρριψης. Από την 3^η ώρα αερισμού κι έπειτα, ωστόσο, παραμένει σταθερό σε χαμηλά επίπεδα.

Παρόμοια ικανοποιητική συμπεριφορά παρουσιάζεται και κατά την 3^η πειραματική φάση, όπου το COD μειώνεται κάτω αυτής της τιμής κατά την 4^η ώρα αερισμού, ενώ έπειτα συνεχίζει να μειώνεται για ακόμα λίγο και τελικά καταλήγει και αυτό να παραμένει σταθερό σε χαμηλά επίπεδα. Σε όλες τις πειραματικές φάσεις, η μείωση αυτή του COD διακατέχει ρόλο σημαντικό στην βακτηριακή ανάπτυξη (bacteria growth) των μικροοργανισμών, κάτι που πρόκειται να σχολιαστεί στα διαγράμματα του Ολικού Αζώτου (TN) αμέσως στη συνέχεια.

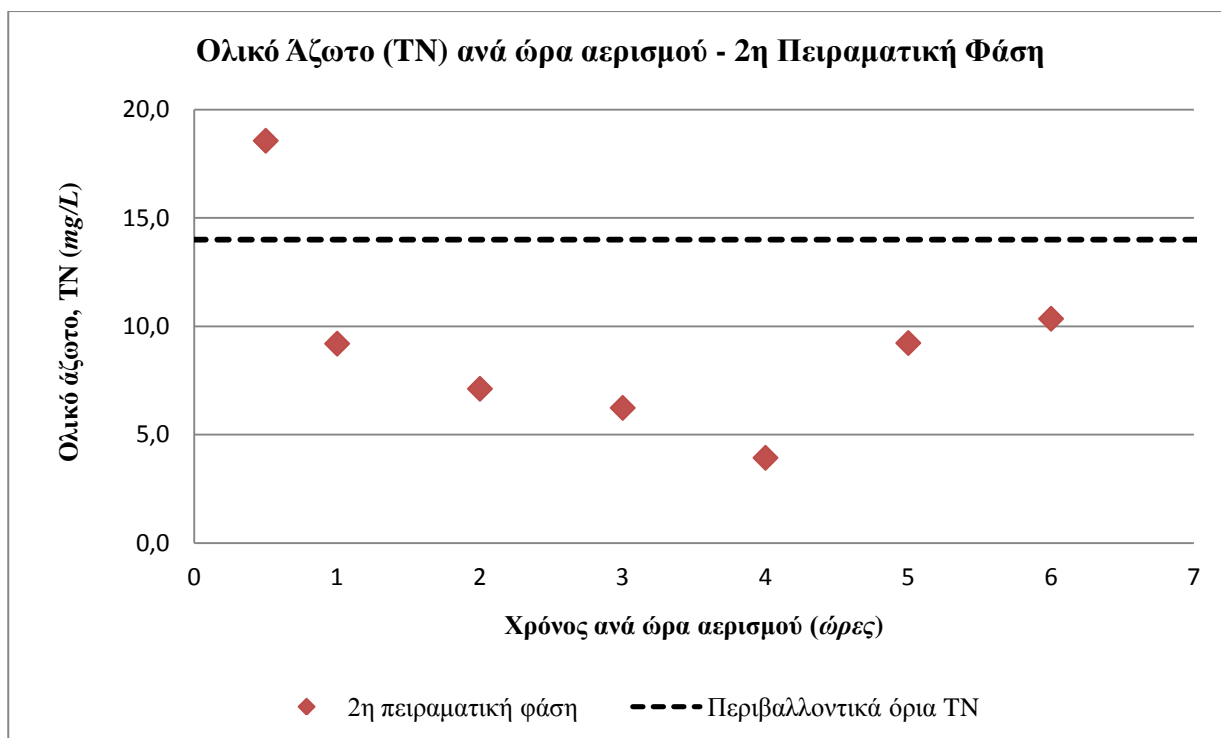


Σχήμα 23: Διάγραμμα Ολικού Αζώτου, TN (mg/L) συναρτήσει του χρόνου ανά ώρα αερισμού (ώρες) κατά την 1^η πειραματική φάση μέσα στον αντιδραστήρα.

Παρατηρώντας προσεκτικά το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 23), της 1^{ης} πειραματικής φάσης, διαπιστώνεται πρώτα ότι κατά την ολοκλήρωση της φάσης του αερισμού, η τιμή του εξερχόμενου ολικού αζώτου από τον αντιδραστήρα είναι κάτω του επιτρεπόμενου περιβαλλοντικού ορίου. Με βάση την αντίστοιχη νομοθεσία που παρατέθηκε παραπάνω σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. Κεφάλαιο 1, Παράγραφο 2.3), ως περιβαλλοντικό όριο ολικού αζώτου επιλέχθηκαν τα $14mg/L$ (βλ. διακεκομμένη γραμμή), κάτι που χαρακτηρίζει μερικώς αποδεκτό το επεξεργασμένο απόβλητο προς περιβαλλοντική διάθεση.

Όσον αφορά την πορεία της καμπύλης, διαπιστώνεται μια αρχική μείωση του ολικού αζώτου, κατά τις πρώτες ώρες του αερισμού, φτάνοντας μια ελάχιστη τιμή, ενώ κατά τις τελευταίες ώρες (από την 5^η ώρα και έπειτα), παρουσιάζεται τάση προς μια αυξανόμενη, ανοδική πορεία. Η συνολική αυτή συμπεριφορά μπορεί να αιτιολογηθεί με βάση την βακτηριακή ανάπτυξη και λειτουργία, καθώς και τον θάνατο των μικροοργανισμών εντός του αντιδραστήρα.

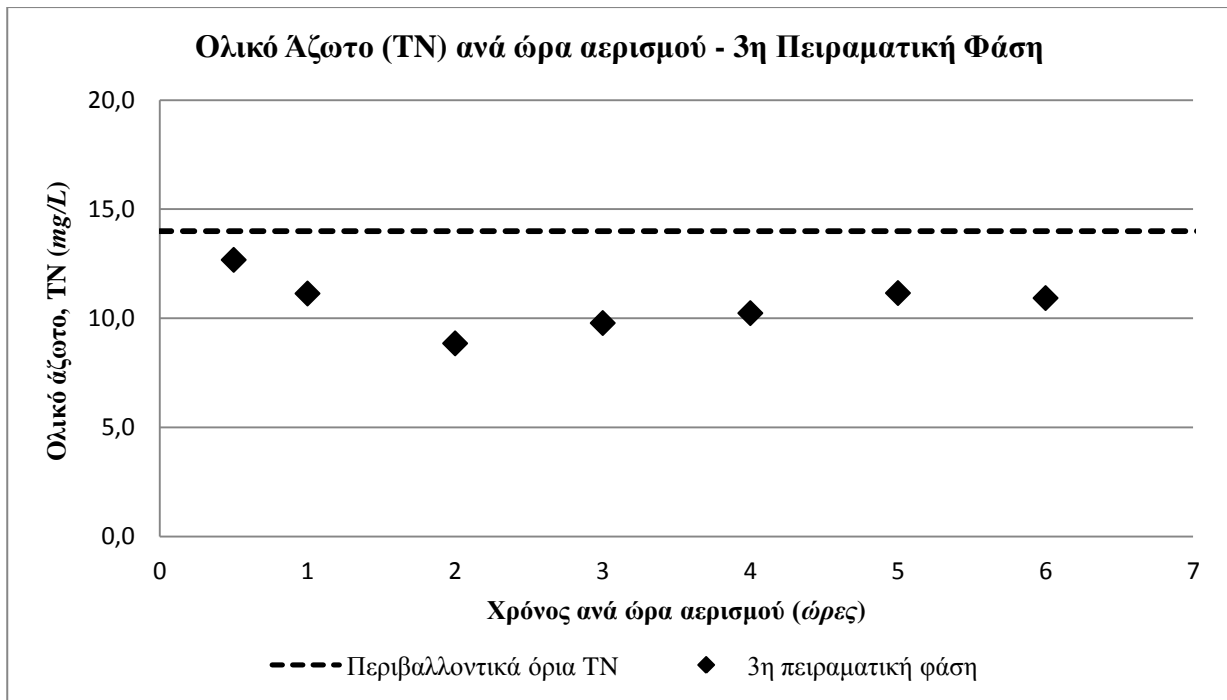
Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και κατά τη 2^η πειραματική φάση στο παρακάτω Σχήμα 24.



Σχήμα 24: Διάγραμμα Ολικού Αζώτου, TN (mg/L) συναρτήσει του χρόνου ανά ώρα αερισμού (ώρες) κατά την 2^η πειραματική φάση μέσα στον αντιδραστήρα.

Πιο συγκεκριμένα, στο παραπάνω διάγραμμα, η καμπύλη του ολικού αζώτου παρουσιάζει μια καθοδική πορεία, ομαλότερη ωστόσο από εκείνη στην 1^η πειραματική φάση, φτάνει σε ένα ελάχιστο σημείο την 4^η ώρα αερισμού και, από την 5^η ώρα και έπειτα, ακολουθεί πάλι μια ανοδική πορεία, αντίστοιχα με πριν.

Προκειμένου να εξηγηθεί αυτή η γενική συμπεριφορά της καμπύλης του ολικού αζώτου, η αρχική μείωση του οφείλεται στην βακτηριακή ανάπτυξη (**bacteria growth**), κατά την οποία καταναλώνεται άζωτο για την ικανοποίηση των αναγκών του κυττάρου του μικροοργανισμού. Δηλαδή, μέσω κατανάλωσης αμμωνιακού αζώτου, τα βακτήρια λαμβάνουν την απαιτούμενη ενέργεια για την κυτταρική τους δραστηριότητα, συμπεριλαμβανομένης της αναπαραγωγής τους. Αντίθετα, η ανοδική πορεία, από την 4^η ώρα αερισμού και έπειτα, οφείλεται στο θάνατο εκείνων των μικροοργανισμών (**bacteria decay**), όπου υπερισχύει της βακτηριακής ανάπτυξης λόγω μη επαρκούς COD κατά τις τελευταίες ώρες, όπως ήδη αναφέρθηκε και προηγουμένως κατά τον σχολιασμό στο Σχήμα 22.



Σχήμα 25: Διάγραμμα Ολικού Αζώτου, TN (mg/L) συναρτήσει του χρόνου ανά ώρα αερισμού (ώρες) κατά την 2^η πειραματική φάση μέσα στον αντιδραστήρα.

Τέλος, στο Σχήμα 25 της 3^{ης} πειραματικής φάσης, η καμπύλη του ολικού αζώτου παρουσιάζει μια καθοδική πορεία, αρκετά ομαλότερη από εκείνες στις δύο (2) πρώτες πειραματικές φάσεις, φτάνει μόλις σε ελάχιστο την 2^η ώρα αερισμού και, από την 3^η ώρα και έπειτα, ακολουθεί πάλι μια ανοδική πορεία, αντίστοιχα με πριν.

Είναι αρκετά εμφανές ότι στην 3^η πειραματική φάση, δεν καταναλώνεται τόσο άζωτο για την ανάπτυξη των βακτηρίων και την ικανοποίηση των αναγκών του κυττάρου τους. Εάν παρατηρηθεί ταυτόχρονα και η καμπύλη κατανάλωσης του COD για την συγκεκριμένη πειραματική φάση παρατηρείται επίσης μείωση του ρυθμού κατανάλωσης. Η μείωση αυτή ερμηνεύεται, ως μείωση βακτηριακής ανάπτυξης όσον αφορά τους ετερότροφούς μικροοργανισμούς και κατά συνέπεια μείωση των βακτηριακών απαιτήσεων σε άζωτο.

5.4 Συμπεράσματα

Η μελέτη του Αντιδραστήρα Διαλείποντος Έργου με Περιοδική Λειτουργία SBR με τη χρήση συνθετικού αστικού αποβλήτου, αλλά και αποβλήτου εκροής αναερόβιου ταχύρυθμου αντιδραστήρα PABR, ως τροφοδοσία αποτελεί πηγή πολλών συμπερασμάτων, τόσο σχετικά με την λειτουργία του συγκεκριμένου αντιδραστήρα, όσο και με τη γενικότερη χρήση αστικών αποβλήτων ως τροφοδοσία στην αερόβια επεξεργασία.

Αρχικά, ο αντιδραστήρας επέδειξε ικανοποιητική ευελιξία ως προς την μείωση του χρόνου αερισμού από την 1^η πειραματική φάση (με διάρκεια αερισμού 8 ώρες και συνολική διάρκεια κύκλου 12 ώρες) στη 2^η (με διάρκεια αερισμού 6 ώρες και συνολική διάρκεια κύκλου 10 ώρες). Ακόμα, στις δύο (2) πρώτες πειραματικές φάσεις, ο SBR παρουσίασε ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την κατανάλωση οργανικού φορτίου, αλλά και απομάκρυνση ολικού αζώτου, ενώ τέλος κατά την 3^η πειραματική φάση με τροφοδοσία αποβλήτου εκροής PABR (με διάρκεια αερισμού 6 ώρες και συνολική διάρκεια κύκλου 10 ώρες), η συμπεριφορά ήταν ικανοποιητική ως προς την απομάκρυνση COD, αλλά όχι ως προς αυτή του TN.

Πιο αναλυτικά, και στις τρεις (3) πειραματικές φάσεις, το COD στην εκροή μειώθηκε κάτω των 125mg/L (περιβαλλοντικό όριο COD που ορίζει η νομοθεσία), ενώ τα ποσοστά απομάκρυνσής του φάνηκαν να κυμαίνονται και στις τρεις περιπτώσεις άνω του 87% – ποσοστιαίο εύρος απομάκρυνσης 87-94%.

Η απομάκρυνση του ολικού αζώτου αποδείχθηκε αποτελεσματική για τις δύο (2) πρώτες πειραματικές φάσεις, με ποσοστά να κυμαίνονται μεταξύ 70-88%, όχι όμως και για την 3^η που η απομάκρυνση ήταν αμυδρή λόγω μειωμένου αριθμού ενεργής βιομάζας ή/και μειωμένης δραστηριότητας αυτής, καθώς και λόγω φαινομένου πιθανής έκπλυσης βακτηρίων, όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα στο συνολικό διάγραμμα των ολικών αιωρούμενων και πτητικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή του SBR.

Ειδικότερα, αυτή η ταύτιση ολικών αιωρούμενων-πτητικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή σε κάθε μέτρηση, σηματοδοτεί ότι αυτό που συναντάται στην εκροή πρόκειται για την ίδια τη βιομάζα που έχει εκπλυθεί.

Ακόμα, δεν ανιχνεύτηκαν νιτρικά, γεγονός που σηματοδοτεί μειωμένη απόδοση του φαινομένου της νιτροποίησης. Ορισμένοι πιθανοί παράγοντες που επηρέασαν την απόδοση της νιτροποίησης στο πείραμα και απέτρεψαν την παραγωγή και ανίχνευση νιτρικών στην διεργασία είναι: α) η χαμηλή συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στην τρίτη φάση, β) ανεπαρκής πληθυσμός νιτροποιητικών βακτηρίων – που ενδεχομένως οφείλεται σε φαινόμενο έκπλυσης αυτών–, γ) ύπαρξη διαλυτού cBOD που παράγεται από διεργασίες ζύμωσης και αποτρέπει τη δράση των νιτροποιητικών βακτηρίων. Διευκρινίζεται ότι το cBOD (Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο των ανθρακούχων ενώσεων, Carbonaceous Biological Oxygen Demand, cBOD) πρόκειται

για το οξυγόνο που απαιτείται για τη βιολογική αποικοδόμηση αποκλειστικά των ανθρακικών οργανικών ενώσεων των υγρών αποβλήτων.

Από τα παραπάνω, το β) αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα και μπορεί να γενικευθεί ως: ο ανεπαρκής πληθυσμός ενεργών βακτηρίων και η μείωση της βακτηριακής δραστηριότητας (κυτταρική αποσύνθεση, **cell decay**). Το cell decay μπορεί να αποδοθεί, αρχικά, στον κυτταρικό θάνατο (μείωση της ποσότητας των ενεργών βακτηρίων, **cell death**), αλλά και στην μείωση της δραστηριότητας των βακτηρίων (δηλαδή, μείωση μιας συγκεκριμένης δραστηριότητας-ιδιότητας που διαθέτουν τα ενεργά βακτήρια, **activity decay**).

Συνοψίζοντας, λόγω έλλειψης κατάλληλων μεθόδων μέτρησης, ο κυτταρικός θάνατος, αλλά και η μείωση της βακτηριακής δραστηριότητας δεν μπορούν να διακριθούν με εύκολο τρόπο. Η μείωση της ενεργού βιομάζας (active biomass reduction) έχει σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση των διεργασιών ενεργής ύλης. Ως εκ τούτου, η μέτρηση των ποσοστών ανάπτυξης και αποσύνθεσης της βιομάζας έχει ήδη προκαλέσει εκτεταμένο ενδιαφέρον, ειδικά για το κομμάτι των νιτροποιητικών βακτηρίων, καθώς αναπτύσσονται αργά και είναι αρκετά ευάλωτα σε εξωτερικούς παράγοντες του περιβάλλοντος.^{5,24,25}

7. Βιβλιογραφία

1. Λυμπεράτος Γ, Βαγενάς Δ. *ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ*. 2016th ed.
2. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ-ΠΛΑΙΣΙΟ-ΚΥΑ-2.pdf.
3. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ-ΠΛΑΙΣΙΟ-ΚΥΑ-1.pdf.
4. Standard Methods for Examination of Water & Wastewater, 20th Edition.pdf.
5. Gerardi MH. *Wastewater Bacteria*.
6. Henze M, van Loosdrecht M, Mino T. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2D, ASM3. In: *Water Intelligence Online*. ; 2000.
7. Metcalf, Eddy. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. 3rd ed. McGraw Hill Education (I) Private Ltd.; 2012.
8. Li B, Irvin S, Baker K. The variation of nitrifying bacterial population sizes in a sequencing batch reactor (SBR) treating low, mid, high concentrated synthetic wastewater. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2007;6(6):651-663. doi:10.1139/S07-008
9. Liu G, Xu X, Zhu L, Xing S, Chen J. Biological nutrient removal in a continuous anaerobic–aerobic–anoxic process treating synthetic domestic wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2013;225:223-229. doi:10.1016/j.cej.2013.01.098
10. Shi L, Ma B, Li X, Zhang Q, Peng Y. Advanced nitrogen removal without addition of external carbon source in an anaerobic/aerobic/anoxic sequencing batch reactor. *Bioprocess Biosyst Eng*. 2019;42(9):1507-1515. doi:10.1007/s00449-019-02148-z
11. Yoo B-H, Lee S. Feasible monitoring of the inhibitory effects of free NH_3 on NO_2^- oxidation. *Geosystem Engineering*. 2018;21(5):243-250. doi:10.1080/12269328.2018.1492463
12. Vives Fabregas MT, Balaguer i Condom MD, Colprim Galceran J, Universitat de Girona, Departament d'Enginyeria Química A i TA. *SBR Technology for Wastewater Treatment Suitable Operational Conditions for a Nutrient Removal*. Universitat de Girona; 2005. Accessed September 10, 2021. <http://www.tdx.cat/TDX-0201105-182136/>
13. Li H, Yao M, Lv M. Experimental Study on SBMBR Process in Urban Sewage Treatment. In: *2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. IEEE; 2011:1-4. doi:10.1109/icbbe.2011.5781038
14. Zhang H-M, Xiao J-N, Cheng Y-J, Liu L-F, Zhang X-W, Yang F-L. Comparison between a sequencing batch membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor. *Process Biochemistry*. 2006;41(1):87-95. doi:10.1016/j.procbio.2005.03.072

15. Fazal S, Zhang B, Zhong Z, Gao L, Chen X. Industrial Wastewater Treatment by Using MBR (Membrane Bioreactor): A Review Study. Published online 2021.
16. Sofia A, Ng WJ, Ong SL. Engineering design approaches for minimum fouling in submerged MBR. *Desalination*. 2004;160(1):67-74. doi:10.1016/S0011-9164(04)90018-5
17. Valderrama C, Ribera G, Bahí N, et al. Winery wastewater treatment for water reuse purpose: Conventional activated sludge versus membrane bioreactor (MBR). *Desalination*. 2012;306:1-7. doi:10.1016/j.desal.2012.08.016
18. Xiao JN, Zhang L, Zheng LN, Wang L, Wei HF, Zhang M. Study on the Characteristics of Biological Phosphorus Removal Sludge in Different Operation Mode of Reactor. *AMR*. 2014;1073-1076:860-865. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1073-1076.860
19. Krampe J. Cycle-time determination and process control of sequencing batch membrane bioreactors. *Water Science and Technology*. 2013;67(9):2083-2090. doi:10.2166/wst.2013.096
20. Yu Z, Lv M, Li H. Research about Microbial Growth Dynamics Model in SBMBR Wastewater Treatment Process. :5.
21. Di Iaconi I, Lopez A, Ramadori R, Di Pinto R, Passino R. Combined chemical and biological degradation of tannery wastewater by a periodic submerged filter (SBBR). (*Water Research*, 36(9)):pp.2205-2214.
22. Jucherski A, Walczowski A, Bugajski P, Józwiakowski K. Technological reliability of domestic wastewater purification in a small Sequencing Batch Biofilm Reactor (SBBR). *Separation and Purification Technology*. 2019;224:340-347. doi:10.1016/j.seppur.2019.05.024
23. Ντοκούτση Ε., Αξιολόγηση εναλλακτικών αποκεντρωμένων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων μικρής κλίμακας. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αθήνα, Ιούνιος 2011.
24. Hao X, Wang Q, Zhang X, Cao Y, Mark Loosdrecht CM van. Experimental evaluation of decrease in bacterial activity due to cell death and activity decay in activated sludge. *Water Research*. 2009;43(14):3604-3612. doi:10.1016/j.watres.2009.05.019
25. Moussa MS, Hooijmans CM, Lubberding HJ, Gijzen HJ, van Loosdrecht MCM. Modelling nitrification, heterotrophic growth and predation in activated sludge. *Water Research*. 2005;39(20):5080-5098. doi:10.1016/j.watres.2005.09.038