



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

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

**Επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων σε
αντιδραστήρα SBR (Sequencing Batch Reactor
– αντιδραστήρας διαλείπουσας λειτουργίας)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΙΦΤΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΛΥΜΠΕΡΑΤΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2022

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών με μια πληθώρα ανθρώπων να συμβάλλουν σε αυτή. Για αυτόν το λόγο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθένα από αυτούς ξεχωριστά.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κο. Γεράσιμο Λυμπεράτο, που μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του αλλά και με τους συνεργάτες του στο πλαίσιο ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος. Συγχρόνως ευχαριστώ και την Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, μέλος ΕΔΙΠ του Εργαστηρίου για τη βοήθεια και στήριξή της καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Αχιλλέα Ζαρκαλίου, καθώς η καθημερινή στήριξη και οι συμβουλές του κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αποτέλεσαν καταλυτικά εφόδια για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους υποψήφιους διδάκτορες του Εργαστηρίου, Χάρη Παυλόπουλο, Κωνσταντίνα Φιλίππου, Γεράσιμο Κανέλλο και Θεόφιλο Καμπερίδη για τις χρήσιμες πληροφορίες που μου χάρισαν καθώς και σε όλα τα παιδιά του εργαστηρίου για το ευχάριστο κλίμα εργασίας που επικρατούσε όλο το διάστημα παραμονής μου.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς μου Σπύρο και Σοφία, το πιο αφοσιωμένο στήριγμά μου όλα αυτά τα χρόνια, που τους οφείλω ό,τι είμαι και όσα ελπίζω να γίνω, αλλά και στα αγαπημένα μου αδέρφια Κωνσταντίνα, Αγγελική, Παναγιώτα και Γιώργο που πάντα πιστεύουν σε εμένα. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες μου και όλους τους ανθρώπους που πέρασαν και υπήρξαν δίπλα μου τα χρόνια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η επεξεργασία και η ασφαλής διάθεση των λυμάτων είναι απαραίτητη για την αποφυγή της ρύπανσης στο σημείο διάθεσης. Με την συμβατική μέθοδο επεξεργασίας της αερόβιας διεργασίας ενεργούς ιλύος, απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας προς κατανάλωση, 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 περαιτέρω επεξεργασία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ο τρόπος λειτουργίας μιας τεχνολογίας που αποτελεί παραλλαγμένη μορφή της συμβατικής διεργασίας ενεργούς ιλύος που μόλις αναφέρθηκε. Πρόκειται για τον Αντιδραστήρα Διαλείποντος Έργου με περιοδική λειτουργία (Sequencing Batch Reactor, SBR) ο οποίος λειτουργεί σε επαναλαμβανόμενους κύκλους, που ο καθένας χωρίζεται χρονικά σε επιμέρους διεργασίες, μια εκ των οποίων η αερόβια ενεργούς ιλύος. Στον SBR αξιοποιούνται διαθέσιμες ποσότητες COD, με σκοπό την αφαίρεση θρεπτικών συστατικών, αζώτου (N) και φωσφόρου (P) από λύματα. Σκοπός, λοιπόν, της εργασίας αποτελεί η μελέτη αυτής της ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και θρεπτικών ουσιών, παράλληλα με ορισμένες αναπτυξιακές προσπάθειες στο σχεδιασμό, τη λειτουργία και την περιγραφή της κινητικής του.

Η διεργασία της αερόβιας επεξεργασίας μελετήθηκε σε τέσσερις (4) πειραματικές φάσεις, οι οποίες διαχωρίζονται ως προς τη χρονική διάρκεια της φάσης του αερισμού από τέσσερις (4) ώρες έως μία (1). Ως τροφοδοσία του συστήματος δεν χρησιμοποιούνται αστικά λύματα, αλλά μια συνθετική που παρασκευάζεται στο εργαστήριο με τρόπο ώστε να προσομοιάζει τα λύματα σε χημικά χαρακτηριστικά. Για την διεξαγωγή του κινητικού μοντέλου της αερόβιας διεργασίας χρησιμοποιείται το λογισμικό AQUASIM, ώστε να συγκρίνει τα πειραματικά αποτελέσματα με το ήδη υπάρχον θεωρητικό μοντέλο ενεργούς ιλύος κατά IAWPRC.

Η συνολική έρευνα του συστήματος SBR παρουσίασε σε όλες τις πειραματικές φάσεις ιδανικά αποτελέσματα, όσον αφορά την μείωση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων όπου ξεπέρασε το 94% και έφτασε έως και το 97%. Η απομάκρυνση του ολικού αζώτου (TN), αντιθέτως, δεν υπήρξε αποτελεσματική σε καμία από τις πειραματικές φάσεις, όπου το ποσοστό μετά βίας έφτασε το 60% στην 1^η και μόλις 37% στην 4^η. Ως προς την κινητική μελέτη του αντιδραστήρα προκύπτει ότι το συγκεκριμένο θεωρητικό μοντέλο καλύπτει τον SBR με μεγάλη επιτυχία για τους ρυθμούς κατανάλωσης του COD και σε αρκετά μεγάλο βαθμό και αυτούς του TN με μικρές προοπτικές βελτιστοποίησης.

Abstract

The treatment and safe disposal of wastewater is necessary for avoiding pollution at disposal end. The conventional method of the aerobic process of activated sludge, requires large amounts of energy consumption, mainly for the needs 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. In particular, the organic charge of the 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 a variant system of the conventional activated sludge process - just mentioned - is studied. This system is the Sequencing Batch Reactor (SBR) which operates in repetitive cycles, each of which is divided into individual processes, one of which is aerobic activated sludge. The SBR utilizes available quantities of COD, in order to remove nutrients, nitrogen (N) and phosphorus (P) from wastewater. The purpose of this study is to study the simultaneous removal of organic matter and nutrients, along with some developmental efforts in the design, operation and description of its kinetics.

The aerobic treatment process was studied in four (4) experimental phases, which are separated in terms of the duration of the aeration phase from four (4) hours to one (1) hour. The system is not fed with municipal wastewater, but with a synthetic one prepared in the laboratory in such a way as to simulate the wastewater in their chemical characteristics. The AQUASIM software is used to perform the kinetic model of the aerobic process, in order to compare the experimental results with the already existing theoretical model of activated sludge according to IAWPRC.

The overall research of the SBR system presented in all the experimental phases ideal results, in the reduction of the organic waste load where it exceeded 94% and reached up to 97%. Total nitrogen (TN) removal, in contrast, was not effective in any of the experimental phases, where the rate barely reached 60% in the 1st one and only 37% in the 4th one. As for the kinetic study of the reactor, it appears that this theoretical model covers the SBR with great success for the consumption rates of the COD and to a large extent also those of the TN, with small prospects for optimization.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή	7
1.1 Ιστορική αναδρομή.	7
1.2 Αστικά λύματα - Ορισμοί - Σύσταση.....	8
1.3 Χαρακτηριστικά αστικών λυμάτων.	9
1.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά.	9
1.3.2 Χημικά χαρακτηριστικά.	10
1.3.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά.	13
1.4 Ρύποι και επεξεργασία τους.	13
1.5 Νομοθετικό πλαίσιο.	15
2. Μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων – Συστήματα ενεργούς ιλύος.	17
2.1 Προεπεξεργασία.....	17
2.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία.	18
2.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία.	19
2.3.1 Συμβατική δευτεροβάθμια επεξεργασία ενεργούς ιλύος.....	19
2.3.2 Θεωρητικό μοντέλο κινητικής ενεργούς ιλύος (Activated Sludge Model). 21	
2.3.3 Μη συμβατικά συστήματα ενεργούς ιλύος.	24
2.3.4 Αντιδραστήρας διαλείποντος έργου με περιοδική λειτουργία.	25
3. Τριτοβάθμια επεξεργασία – Απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών: οργανικών, φωσφόρου, αζώτου.	26
3.1 Αφαίρεση αζώτου.....	27
3.1.1 Αμμωνιοποίηση / Νιτροποίηση / Απονιτροποίηση.	27
3.1.2 Απογύμνωση αμμωνίας.	29
3.2 Αφαίρεση φωσφόρου.	29
3.2.1 Διεργασία A/O.....	31
3.2.2 Διεργασία Phostrip.	31
3.3 Ταυτόχρονη αφαίρεση αζώτου – φωσφόρου.	32
3.3.1 Διεργασία A ² /O.	32
3.3.2 Σύστημα Bardenpho 5 σταδίων.	33
3.3.3 Διεργασία UCT.....	33
3.3.4 Διεργασία VIP.	34
3.3.5 Σύστημα Johannesburg.....	34

3.4 Αφαίρεση θρεπτικών συστατικών με Τεχνολογία τύπου Διαλείποντος Έργου με Περιοδική Λειτουργία (Sequencing Batch Reactor/ SBR).	35
4. Πειραματικό Μέρος	37
4.1 Αναλυτικές Μέθοδοι	37
4.1.1 Μέτρηση pH.	37
4.1.2 Μέτρηση Ολικής Αλκαλικότητας.	38
4.1.3 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών αιωρούμενων στερεών.	38
4.1.4 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών στερεών.	41
4.1.5 Προσδιορισμός χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD).	42
4.1.6 Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN).	43
4.2 Πειραματική Διάταξη.	43
4.3 Πειραματική Διεργασία.	45
5. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.	47
5.1 Χαρακτηρισμός Τροφοδοσίας.	47
5.2 Εκροή.	48
5.3 Συνθήκες SBR.	52
5.4 Προσομοίωση κινητικής θεωρητικού μοντέλου – AQUASIM.	53
5.5 Συμπεράσματα.	57
6. Βιβλιογραφία	58

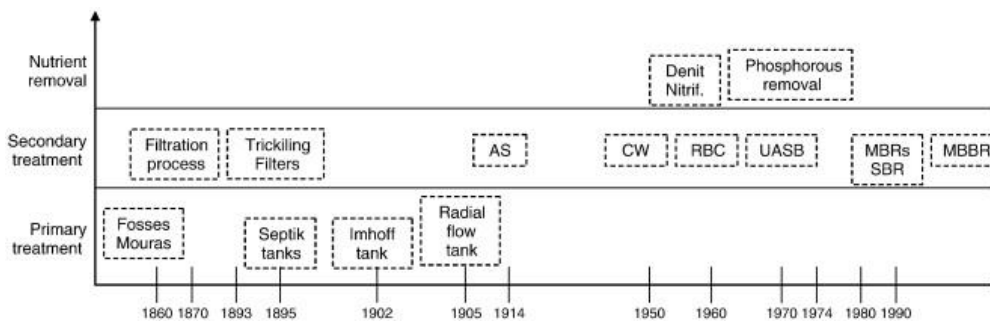
1.Εισαγωγή

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα στη σύγχρονη εποχή συνεχώς πληθαίνουν με την εμφάνιση πολλών φαινομένων άρρηκτα συνδεδεμένων με την μόλυνση του αέρα, των υδάτων και του εδάφους. Η διάθεση των αστικών λυμάτων αφορά υδάτινους αποδέκτες και άρα πρέπει να συμβαίνει εφόσον τα λύματα έχουν αποκτήσει ποιοτικά χαρακτηριστικά συμβατά με αυτά του περιβάλλοντος. Αντιθέτως, σε περίπτωση μη επεξεργασίας τους, φέρουν πληθώρα σωματιδίων, βαρέων μετάλλων και θρεπτικών ουσιών που ενδέχεται να είναι επιβλαβή για τον αποδέκτη, μειώνοντας την ποιότητα νερού και την αισθητική αξία του περιβάλλοντος, με επιπτώσεις σε χλωρίδα και πανίδα, καθώς τίθεται σε κίνδυνο και η ανθρώπινη υγεία. Έτσι, η βιώσιμη επεξεργασία και τελική διάθεση των λυμάτων και της ιλύος τους από τις εγκαταστάσεις χρήζει υψίστης σημασίας και άμεσης δράσης από την στιγμή που ο ρυθμός παραγωγής τους ολοένα και αυξάνεται. [1]

1.1 Ιστορική αναδρομή.

Από την αρχαιότητα η λέξη “λύμα” ερμηνευόταν ως “ξέπλυμα, ακαθαρσία”. Τόσο ο αρχαίος ελληνικός πολιτισμός, όσο και ο ρωμαϊκός, εισήγαγαν και εξέλιξαν τις σωλήνες αποχέτευσης και τα υδραγωγεία για την συλλογή των αστικών λυμάτων και των όμβριων υδάτων. Η λάθος διαχείριση και απόρριψη των λυμάτων του παρελθόντος είχε πολυάριθμες επιπτώσεις σε δημόσια υγεία και περιβάλλον, όπως το να αποτελεί κύριο λόγο της εμφάνισης επιδημιών σε όλη την Ευρώπη μέχρι τον 19^ο αιώνα. Ορισμένα βασικά γεγονότα καθόρισαν την ταχύτητα με την οποία εξελίχθηκε η περιβαλλοντική διαχείριση ανά τους αιώνες. Μερικά από αυτά τα γεγονότα ήταν επιστημονικά, όπως μοντέλα καθαρισμού ρεμάτων, ενώ άλλα ήταν κοινωνικο – οικονομικά, όπως οι δύο Παγκόσμιοι Πόλεμοι. [2]

Η τεχνολογική εξέλιξη της επεξεργασίας των λυμάτων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1, εισήχθη περίπου το 1860 με διαφόρων ειδών σηπτικές δεξαμενές να αποτελούν την πρωτογενή επεξεργασία τους. Παράλληλα, ως δευτερογενή επεξεργασία εκείνη την περίοδο αξιοποιούνταν διεργασίες φιλτραρίσματος. Η επιπλέον απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών, όπως του φωσφόρου, αναπτύσσεται μετά το 1950. Από το 1914 εμφανίζεται η μέθοδος της ενεργούς ιλύος στην δευτερογενή επεξεργασία και ακολουθούν τεχνητοί υγρότοποι (CW), περιστρεφόμενοι βιολογικοί αντιδραστήρες (RBC), ανοδικής ροής αναερόβια κουβέρτα λάσπης (UASB), βιολογικοί αντιδραστήρες μεμβράνης (MBRs). Η τεχνολογία των αντιδραστήρων διαδοχικής διαλείπουσας λειτουργίας (SBR) υιοθετείται από το 1980 και έπειτα. [2]



Εικόνα 1. Τεχνολογική εξέλιξη της επεξεργασίας των λυμάτων. [2]

1.2 Αστικά λύματα - Ορισμοί - Σύσταση.

Ο όρος “λύμα” σημαίνει το ακάθαρτο υγρό που περιέχει τα υπολείμματα μιας ανθρώπινης δραστηριότητας. Τα λύματα ή αλλιώς υγρά απόβλητα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η μια αποτελεί τα οικιακά λύματα που προέρχονται από την εξυπηρέτηση οικιακών αναγκών και η δεύτερη τα αστικά λύματα που αναφέρονται στα προκύπτοντα από δραστηριότητες πόλης υγρά απόβλητα. [1]

Τα αστικά απόβλητα βάσει της σύστασης των χαρακτηριστικών τους πριν από οποιαδήποτε επεξεργασία χωρίζονται σε ασθενή, ενδιάμεσα και ισχυρά, όπως φαίνεται στον πίνακα 1. Στόχος των επεξεργασιών που ακολουθούν είναι η μείωση των συγκεντρώσεων των χαρακτηριστικών αυτών προκειμένου να γίνουν κατάλληλα προς απόρριψη στο περιβάλλον.

Πίνακας 1. Σύσταση και κατάταξη ανεπεξεργαστων αστικών λυμάτων. [1]

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 στερεά (SS)		100	220	350
~Σταθεροποιημένα		20	55	75
~Πτητικά		80	165	275
Καθιζάνοντα στερεά		5	10	20
BOD ₅		110	220	400
TOC		80	160	290
COD		250	500	1000
Άζωτο (ολικό σαν N)		20	40	85
~Οργανικό		8	15	35
~Αμμωνία		12	25	50
~Νιτρώδη		0	0	0
~Νιτρικά		0	0	0
Φώσφορος (ολικός σαν P)		4	8	15

~Οργανικός		1	3	5
~Ανόργανος		3	5	10
Χλώριο		30	50	100
Θειικά		20	30	50
Αλκαλικότητα (σαν CaCO ₃)		50	100	200
Λίπος		50	100	150
Ολικά κολοβακτηρίδια	no./100 mL	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
VOCs	μg/L	<100	100-400	>400

1.3 Χαρακτηριστικά αστικών λυμάτων.

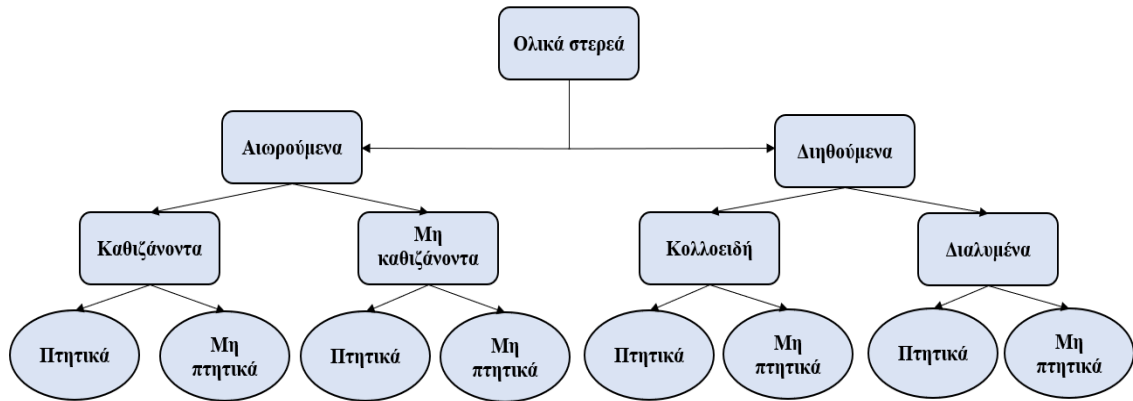
Ο πλήρης χαρακτηρισμός των αστικών λυμάτων αποδίδεται έπειτα από την συλλογή όλων των χαρακτηριστικών τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά πρόκειται για φυσικά, χημικά και βιολογικά. Τα πρώτα αν και πιο αντιληπτά από το ευρύ κοινό δεν έχουν την ισχύ των άλλων δύο κατηγοριών σε περιβάλλον και δημόσια υγεία.

1.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά.

Στα φυσικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων ανήκουν τα στερεά, η οσμή, η θερμοκρασία και το χρώμα. Η θερμοκρασία αποτελεί φυσική ιδιότητα που επηρεάζει την βιολογική δραστηριότητα και την απελευθέρωση αερίων στο απόβλητο. Τα στερεά είναι ένα από τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων και των νερών γενικά, τα οποία μελετήθηκαν πειραματικά στην παρούσα εργασία. Διαχωρίζονται σε:

- Αιωρούμενα στερεά που καθιζάνουν ή επιπλέουν με την πάροδο του χρόνου,
- Στερεά σε κολλοειδή διασπορά που απαιτούν κροκίδωση για να επέλθει καθίζηση ή επίπλευσή τους,
- Διαλυμένα στερεά. [3]

Πιο αναλυτικά, ολικά στερεά (Total Solids, TS) είναι το στερεό υπόλειμμα που παραμένει μετά από εξάτμιση σε θερμοκρασία 103 – 105°C. Κύριες κατηγορίες τους είναι τα αιωρούμενα στερεά (SS), που δεν διηθούνται και τα διηθούμενα (FS), που δύνανται να διηθηθούν. Η κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες χωρίζεται σε υποομάδες όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Όλες οι τελικές χαρακτηριστικές υποομάδες στερεών που δημιουργούνται μπορούν να διακριθούν σε πτητικά (VS) και μη πτητικά στερεά. Στα πτητικά συγκαταλέγεται το οργανικό μέρος των στερεών που διαφεύγει ως αέριο κατά την καύση τους στους 500 – 600°C, ενώ τα μη, παραμένουν ως στάχτη και αναφέρονται στο ανόργανο περιεχόμενο. [1],[3]



Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση ολικών στερεών.

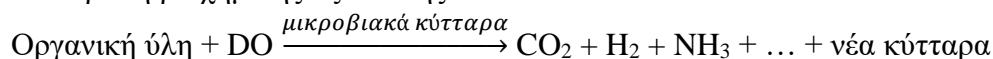
1.3.2 Χημικά χαρακτηριστικά.

Υπάρχει μια πελώρια ποικιλία τόσο οργανικών όσο και ανόργανων μορίων στα αστικά λύματα. Στο οργανικό περιεχόμενο των αποβλήτων ανήκουν από τα πιο απλά μέχρι τα πιο σύνθετα οργανικά μόρια. Στα χαρακτηριστικά αυτού του περιεχομένου ανήκει η ευκολία και η δυνατότητά τους να οξειδώνονται βιολογικά, η οποία εκφράζεται μέσω του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD), χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), ολικά απαιτούμενου οξυγόνου (TOD) και του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC). Όσον αφορά το ανόργανο περιεχόμενο των λυμάτων, προσδιορίζεται με χημικούς δείκτες όπως είναι το pH, η αλκαλικότητα, το άζωτο, ο φώσφορος και άλλα. [1],[3]

1.3.2.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Biochemical Oxygen Demand (BOD).

Ως βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο, ορίζεται η ποσότητα καταναλισκόμενου οξυγόνου από τους αερόβιους μικροοργανισμούς του περιβάλλοντος για την βιοοξείδωση ενός λίτρου αποβλήτου σε θερμοκρασία 20°C. Το BOD είναι η συχνότερη παράμετρος για τον καθορισμό του οργανικού ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων. Υπολογίζεται συνήθως για χρόνο διάρκειας του πειράματος τις 5 ημέρες (BOD₅). Η επιλογή αυτού του χρόνου δεν είναι τυχαία καθώς στον χρόνο αυτόν έχει επιτευχθεί το 60 – 70% της οξείδωσης, αποφεύγοντας παρεμβολές βακτηρίων νιτροποίησης, η οποία ξεκινά την 6^η – 7^η μέρα. [1],[3]

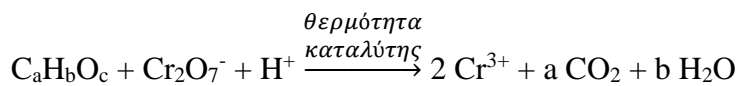
Αντίδραση βιοχημικής οξείδωσης:



Από τα αποτελέσματα του BOD πέρα από τον προσδιορισμό του οξυγόνου ώστε να σταθεροποιηθεί η υφιστάμενη οργανική ύλη, δίνεται η δυνατότητα διαστασιολόγησης της εγκατάστασης επεξεργασίας και μέτρησης της αποτελεσματικότητας μερικών διεργασιών της. Επίσης, χρησιμοποιείται ως δείκτης σύγκρισης των ορίων συγκεντρώσεων με αυτές τις ισχύουσες νομοθεσίας. [1]

1.3.2.2 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – Chemical Oxygen Demand (COD).

Με τον όρο χημικά απαιτούμενο οξυγόνο εννοείται η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη χημική οξείδωση της οργανικής ύλης σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Αποτελεί ένα χαρακτηριστικό του οργανικού φορτίου των λυμάτων εναλλακτικό του BOD. Η οξείδωση αυτή γίνεται με ένα ισχυρό χημικό οξειδωτικό μέσο (όπως το διχρωμικό κάλιο), σε συνθήκες όξινης και υψηλή θερμοκρασία παρουσία καταλύτη (όπως ο θειικός άργυρος). [1],[3]



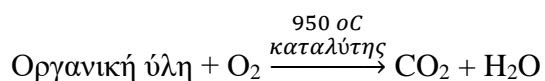
Η τιμή του COD είναι πάντοτε υψηλότερη απ' αυτή του BOD αφού περισσότερες ενώσεις μπορούν να οξειδωθούν χημικά παρά βιολογικά. [3]

1.3.2.3 Ολικά απαιτούμενο οξυγόνο – Total Oxygen Demand (TOD).

Μία άλλη χαρακτηριστική μέθοδος για το οργανικό φορτίο των αποβλήτων είναι η χρήση του ολικά απαιτούμενου οξυγόνου. Κατά τη μέθοδο αυτή το δείγμα καίγεται στους 900°C μέσα σε ειδικούς καυστήρες και σε ρεύμα αζώτου, όπου περιέχεται γνωστή ποσότητα οξυγόνου πάνω από έναν καταλύτη πλατίνας. Έτσι οργανικές ενώσεις και σε μικρότερο ποσοστό ανόργανες, μετατρέπονται σε σταθερά τελικά προϊόντα με την καύση τους. Υπάρχουν πειραματικές ενδείξεις για πολύ στενό συσχετισμό μεταξύ του TOD και του COD, αυτό εξαρτάται από τη φύση των συστατικών που περιέχονται στα απόβλητα. [3]

1.3.2.4 Ολικός οργανικός άνθρακας – Total Organic Carbon (TOC).

Ο ολικός οργανικός άνθρακας αποτελεί ακόμη ένα χημικό χαρακτηριστικό για το οργανικό περιεχόμενο των λυμάτων. Προσδιορίζεται με οξείδωση με οξυγόνο στους 950°C σε ειδικό κλίβανο, με καταλύτη, αφού πρώτα αεριστεί και γίνει όξινο. Αυτή η προεπεξεργασία χρειάζεται για την απομάκρυνση του ανόργανου περιεχομένου. [1]



Η ανάλυση TOC μπορεί να εκτελεστεί πολύ γρήγορα με τις ειδικές συσκευές που υπάρχουν και για αυτό το λόγο έχει γίνει πολύ δημοφιλές. Οι μετρήσεις του TOC θεωρούνται σαν μια πρόσθετη παράμετρος στην εκτίμηση της ποιότητας των αποβλήτων μαζί με τις μετρήσεις του BOD και COD τις οποίες δεν αντικαθιστά. [3]

1.3.2.5 pH = -log₁₀[H⁺] & Αλκαλικότητα.

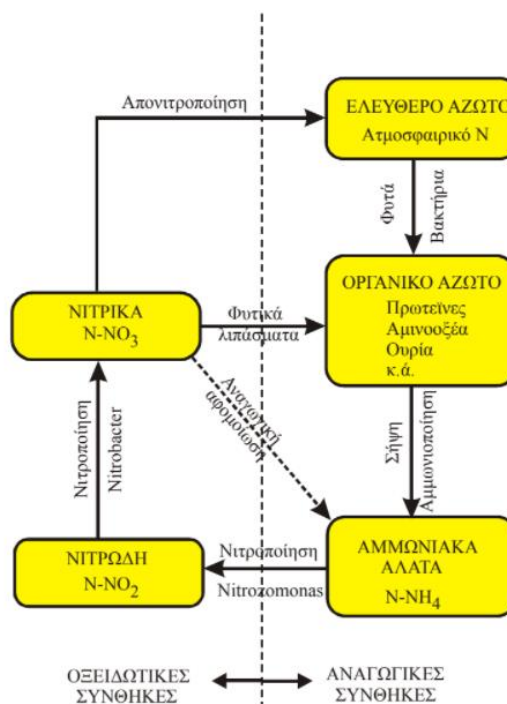
Το pH είναι μια χημική παράμετρος στενά συνδεδεμένη με την βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών στα λύματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι πλειοψηφία των μικροοργανισμών αυτών είναι ουδετερόφιλοι, με αποτελεσματική δράση σε pH εύρους 6 – 9. Εντός του εύρους αυτού, σχεδόν εξισώνονται τα pH που

έχουν βάση την αλκαλικότητα (alkalinity – based pHs) και αυτά που έχουν βάση τα όξινα ανθρακικά (bicarbonate – based pHs). Επίσης, αρκετοί ρύποι, για να καθιστούν βιοεπεξεργάσιμοι, χρειάζονται εξουδετέρωση με κάποια βάση ή οξύ. [4]

Όσον αφορά την (ολική) αλκαλικότητα πρόκειται για την αντοχή και αντίσταση του δείγματος σε επιδράσεις που μεταβάλλουν το pH, όπως η προσθήκη οξέων ή βάσεων και προσδιορίζεται με τιτλοδότηση, όπως περιγράφεται και στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Στα υγρά απόβλητα αυτή οφείλεται σε ενώσεις όπως τα υδροξείδια, ανθρακικά (ανθρακική αλκαλικότητα) και διττανθρακικά (διττανθρακική αλκαλικότητα) πολλών στοιχείων (ασβεστίου, μαγνησίου, νατρίου), με τα πιο διαδεδομένα να είναι αυτά του ασβεστίου και του μαγνησίου. Επίσης το νερό τροφοδοσίας, το υπόγειο νερό, καθώς και τα υλικά που προστίθενται κατά την οικιακή χρήση, συμβάλλουν και αυτά στην διαμόρφωση της αλκαλικότητας του αποβλήτου. [4]

1.3.2.6 Άζωτο.

Το άζωτο είναι σημαντικό συστατικό του ανόργανου περιεχομένου των αστικών λυμάτων. Έχει βασικό ρόλο γιατί χρησιμοποιείται από τους μικροοργανισμούς για την ανάπτυξή τους. Στα λύματα βρίσκεται υπό μορφή αμμωνίας ή αμμωνιακών ιόντων σε ισορροπία και κατά την επεξεργασία των λυμάτων δημιουργούν την έναρξη του κύκλου του αζώτου (εικόνα 2) δημιουργώντας και καταναλώνοντας συνεχώς διάφορες μορφές αζώτου, όπως νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά, ανάλογα τις συνθήκες που επικρατούν. [1]



Εικόνα 2. Κύκλος αζώτου σε υδάτινο περιβάλλον. [5]

1.3.2.7 Φώσφορος.

Ο φώσφορος αποτελεί και αυτός κυρίως ανόργανη ουσία των λυμάτων. Οι οργανικές ενώσεις του φωσφόρου στα αστικά λύματα είναι μηδαμινές. Διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη μικροοργανισμών σε έναν βιολογικό καθαρισμό, αφού ενσωματώνονται στην κυτταρική μάζα ως κύριο συστατικό της δομής της. Στα λύματα βρίσκεται υπό μορφή ορθοφωσφορικών (PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , H_2PO_4^- , H_3PO_4) και πολυφωσφορικών, με τα δεύτερα να υδρολύονται προς παραγωγή των πρώτων. [1],[5]

1.3.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά.

Η ποσότητα και το είδος των μικροσκοπικών και μακροσκοπικών φυτών και ζώων σε ένα υδάτινο σώμα υποδοχής θα πρέπει να θεωρούνται ως η τελική δοκιμή αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας των λυμάτων. Τα λύματα παρέχουν το τέλει μέσο για καλή μικροβιακή ανάπτυξη, είτε είναι αερόβια είτε αναερόβια, εντός της εγκατάστασης επεξεργασίας τους. Τα βακτήρια και τα πρωτόζωα είναι τα κλειδιά για την κανονική μονάδα επεξεργασίας, τη διαδικασία της βιολογικής μονάδας και του φυσικού βιολογικού κύκλου στα νερά υποδοχής. Όσο η ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου είναι επαρκής, τα βακτήρια μετατρέπουν τη διαλυτή οργανική ύλη σε νέα κύτταρα και ανόργανα στοιχεία. Τα προϊόντα αυτά με τη σειρά τους, αποτελούν υποστρώματα για υψηλότερων τάξεων ζωντανά όντα, προκαλώντας έτσι μείωση της οργανικής φόρτισης. Συνεπώς, η επεξεργασία των λυμάτων στοχεύει στη χρήση και την απομάκρυνση των κοινών βακτηρίων μαζί με οργανικά και ανόργανα συστατικά. [6]

1.4 Ρύποι και επεξεργασία τους.

Με την επεξεργασία των λυμάτων επισφραγίζεται η ασφαλής διάθεσή τους στον τελικό αποδέκτη και άρα η αποφυγή περιβαλλοντικής ρύπανσης. Συγκεκριμένα, οι σημαντικότεροι ρύποι που περιέχονται στα λύματα είναι τα αιωρούμενα στερεά, βιοαποδομήσιμα και μη αποδομήσιμα οργανικά, παθογόνοι μικροοργανισμοί, θρεπτικά συστατικά, επιλεκτικοί ρύποι, βαρέα μέταλλα και ορισμένα διαλυτοποιημένα ανόργανα.

• Αιωρούμενα στερεά.

Με την διάθεσή τους στο περιβάλλον, απουσία επεξεργασίας τους, δημιουργούν αναερόβιες συνθήκες στον δέκτη και αναπτύσσουν λάσπη. Αυτό έχει ως συνέπεια την θολότητα στον υγρό αποδέκτη, υποβαθμίζοντάς τον αισθητικά και εμποδίζοντας την διέλευση του ηλιακού φωτός, το οποίο είναι χρήσιμο για ορισμένες μορφές ζωής και φύκη. [1]

• Βιοαποδομήσιμα οργανικά.

Είναι μια υποκατηγορία της οργανικής ύλης (βιομάζα) στα λύματα, η οποία διαχωρίζεται περαιτέρω στα ευκόλως βιοαποδομήσιμα και μη. Πρόκειται για ρύπους αποτελούμενους από πρωτεΐνες, λιπαρά και υδατάνθρακες. Οι ουσίες αυτές

συμμετέχουν σε βιολογικές διεργασίες προκειμένου να σταθεροποιηθεί η συγκέντρωσή τους στο περιβάλλον. Συνεπώς, όταν αυτή υπερβαίνει ορισμένα όρια, οι βιολογικές λειτουργίες εξαντλούν το οξυγόνο και δημιουργούν σηπτικές συνθήκες. [1],[7]

- Μη αποδομήσιμα οργανικά.

Αποτελούν ιδιαίτερης σημασίας ρύποι, καθώς σε αντίθεση με τα βιοαποδομήσιμα, δεν επιτυγχάνεται η επεξεργασία τους με τις συμβατικές μεθόδους, οι οποίες αναλύονται εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο. Σε αυτήν την κατηγορία συγκαταλέγονται οι φαινόλες, οι χρωστικές, οι επιφανειοδραστικές ενώσεις, τα αγροτικά φυτοφάρμακα. [1]

- Παθογόνοι μικροοργανισμοί.

Η σημασία τους έγκειται στο γεγονός της μετάδοσης και πρόκλησης πληθώρας ασθeneιών.

- Θρεπτικά συστατικά.

Ο φώσφορος, το άζωτο και ο άνθρακας είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη και τη ζωτικότητα των έμβιων όντων, ως εκ τούτου ονομάζονται θρεπτικά συστατικά. Ωστόσο, η απόρριψη ροών αποβλήτων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά στα υδάτινα οικοσυστήματα έχει ως αποτέλεσμα τον ευτροφισμό ανεπιθύμητης υδατικής ζωής. Οι τεχνολογίες βιολογικής αφαίρεσης θρεπτικών συστατικών (Biological Nutrient Removal, BNR) τόσο με συμβατικές μεθόδους όσο και με μη ολοένα και κερδίζουν έδαφος. [8]

- Επιλεκτικοί ρύποι.

Βρίσκονται στην κορυφή της λίστας προτεραιότητας απομάκρυνσης των ρύπων στα αστικά λύματα. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτήν την οικογένεια ρύπων ανήκουν υψηλού κινδύνου οργανικές και ανόργανες ενώσεις άκρως τοξικές, όπως καρκινογόνες, μεταλλαξιογόνες, τερατογόνες. [1]

- Βαρέα μέταλλα.

Αποτελούν συστατικό προς απομάκρυνση κυρίως των βιομηχανικών αποβλήτων, ιδίως όταν υπάρχει σκοπός επαναχρησιμοποίησής του. Στα αστικά λύματα βρίσκονται σε πολύ ελάχιστες συγκεντρώσεις.

- Διαλυτοποιημένα ανόργανα.

Πρόκειται για ανόργανες ουσίες όπως νάτριο, ασβέστιο τα οποία είναι μέρος του αρχικού οικιακού νερού και απαιτείται η αφαίρεσή τους πριν επαναχρησιμοποιηθεί το νερό.

Οι μεμονωμένες μέθοδοι επεξεργασίας των ρύπων ταξινομούνται συνήθως ως:

- Διεργασίες φυσικών μονάδων.

Στις μεθόδους αυτές κυριαρχεί η εφαρμογή φυσικών δυνάμεων και είναι γνωστές ως λειτουργίες φυσικής μονάδας. Η πλειοψηφία των μεθόδων βασίζονται σε φυσικές

παρατηρήσεις όπως διαλογή, ανάμειξη, κροκίδωση, καθίζηση, επίπλευση και διήθηση. [9]

- Διεργασίες χημικών μονάδων.

Οι χημικές διεργασίες επεξεργασίας έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση ή μετατροπή του ρύπου σε άλλες πιο ασφαλείς ουσίες. Αυτό επιτυγχάνεται με προσθήκη διαφόρων χημικών ή με την συμμετοχή τους σε άλλη χημική αντίδραση, όπως είναι για παράδειγμα, αντιδράσεις καθίζησης, όπου ο ρύπος κατακρημνίζεται για την απομάκρυνσή του, μεταφοράς αερίου και απολύμανσης. [9]

- Διεργασίες βιολογικών μονάδων.

Πρόκειται για τις μεθόδους όπου η απομάκρυνση των ρύπων πραγματοποιείται με βιολογικές δραστηριότητες. Οι δραστηριότητες αυτές παρουσιάζουν επιτυχή απομάκρυνση κυρίως των βιοαποδομήσιμων οργανικών ουσιών που εμφανίζονται στα λύματα σε κολλοειδή ή διαλυμένη μορφή. Τα είδη των διεργασιών ανάλογα με τις συνθήκες συγκέντρωσης οξυγόνου είναι οι αερόβιες (παρουσία οξυγόνου ως δέκτη ηλεκτρονίων), οι ανοξικές (παρουσία δέκτη ηλεκτρονίων εναλλακτικού του οξυγόνου) και οι αναερόβιες (ζύμωση απουσίας οξυγόνου ή ανόργανου αποδέκτη ηλεκτρονίων). Σε μια βιολογική μονάδα μέρος της οργανικής ύλης μετατρέπεται σε διαφεύγοντα στην ατμόσφαιρα αέρια και νέα βακτηριακά κύτταρα. Άλλοι ρύποι που μπορούν να μειωθούν σε έναν βιολογικό καθαρισμό είναι το άζωτο, ο φώσφορος, τα θειικά άλατα. [9]

1.5 Νομοθετικό πλαίσιο.

Η διάθεση των αστικών λυμάτων σε υδάτινο αποδέκτη, καθορίζεται σύμφωνα με την εκάστοτε ισχύουσα νομοθεσία. Αυτό εξαρτάται από τα επιτρεπτά όρια του ρυπαντικού φορτίου των λυμάτων, όπως επίσης και από τη χρήση του αποδέκτη, τη γενικότερη τοπική πολιτική που ασκείται σε περιφερειακό επίπεδο και στόχο έχει την οικονομική ανάπτυξη της αντίστοιχης περιοχής και την προστασία της Δημόσιας Υγείας.

Στην Ευρώπη, από το 2007 πλήττεται από λειψυδρία τουλάχιστον το 11% του πληθυσμού και το 17% της επικράτειάς του, ποσοστά που αναμένεται να αυξηθούν λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι κύριες προκλήσεις για την αποτελεσματική διαχείριση των υδάτων είναι: η παλαιότητα των μέσων διαχείρισης, η έλλειψη υποδομής, το εκάστοτε θεσμικό πλαίσιο, τα ακραία καιρικά φαινόμενα, η κλιματική αλλαγή, η ρύπανση των υδάτων και η έλλειψη προστασίας των υδάτων στην πολιτική ατζέντα. [10]

Το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο, συγκεκριμένα, περιλαμβάνει την Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) Αριθ. ΟΙΚ. 5673/400/1997, ΦΕΚ 192/Β/14-3-1997, «Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων». Αυτή η απόφαση έχει σκοπό την εφαρμογή των διατάξεων του άρθρου 10 του Ν. 1650/1986 και συγχρόνως την εναρμόνιση με τις διατάξεις της οδηγίας 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1991 των

Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων «για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων» που έχει δημοσιευθεί στην Ελληνική γλώσσα στην Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (ΕΕ L 135 σελ. 40/30.5.1991). [11]

Πιο αναλυτικά, για την δημιουργία αποχετευτικών δικτύων καθορίζονται τα εξής [11]:

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

Επιπλέον, όσον αφορά την κατάλληλη επεξεργασία (δευτεροβάθμια) των αστικών υγρών αποβλήτων προς αποχέτευση η απόφαση προβλέπει [11]:

- 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.

Σχετικά με τις περιοχές διάθεσης λυμάτων η ΚΥΑ 5673/400 κάνει αναφορά για δύο (2) τύπους περιοχών διάθεσης, άλλες λιγότερο και άλλες περισσότερο ευαίσθητες, με κίνδυνο το φαινόμενο του ευτροφισμού. Όπως αναμένεται στις περισσότερο ευαίσθητες, υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις από αυτές των λιγότερο και συνήθως επιτυγχάνονται με επιπλέον (τριτοβάθμια) επεξεργασία, για απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου. Σε κάθε περίπτωση, κριτήρια διάθεσης αποτελούν είτε οι τελικές συγκεντρώσεις, είτε η ελάχιστη ποσοστιαία μείωση (%) που οφείλει να επιτευχθεί κατά την επεξεργασία σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και συστατικά των λυμάτων (βλ. Πίνακα 2). [11]

Πίνακας 2. Απαιτήσεις για τελική διάθεση από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων.[1]

Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/L)	Τυπικές συγκεντρώσεις ΑΥΑ (mg/L)	Ελάχιστη ποσοστιαία μείωση (%)
BOD ₅	25	110-400	70-90
COD	125	250-1000	75
Ολικά αιωρούμενα στερεά	35	100-350	90
Ολικός φώσφορος	2 (10000-100000 ι.κ.) 1 (άνω των 100000 ι.κ.)	4-15	80
Ολικό άζωτο (TKN)	15 (1000-100000 ι.κ.) 10 (άνω των 100000 ι.κ.)	20-85	70-80

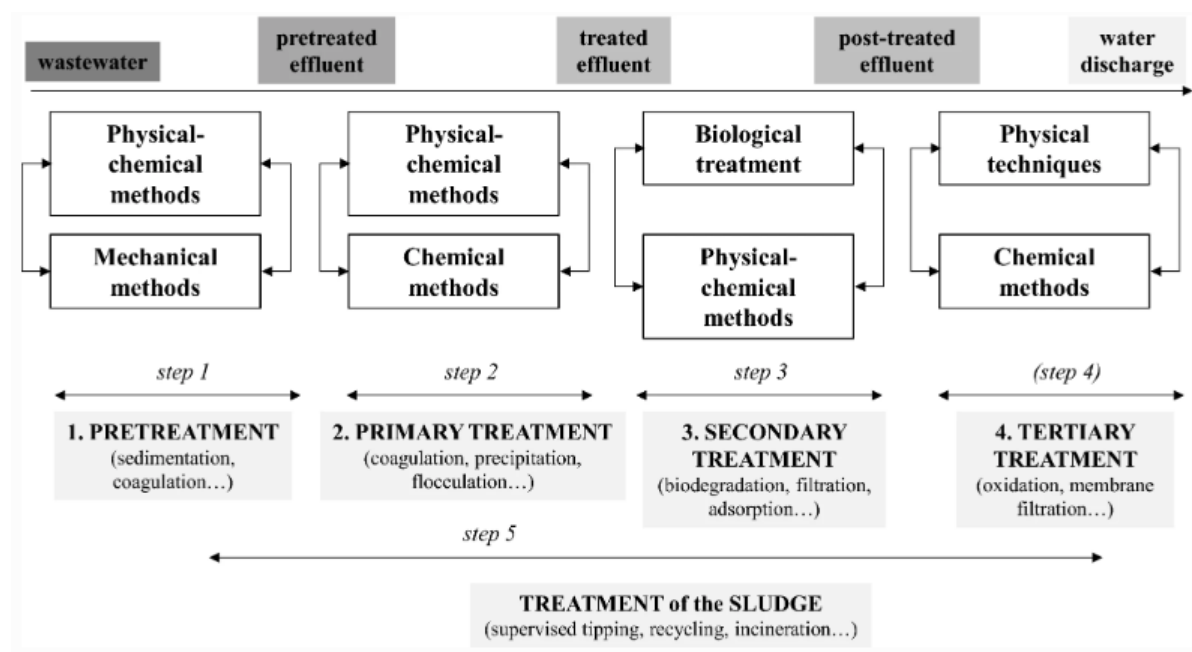
2. Μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων – Συστήματα ενεργούς ιλύος.

Η συμβατική επεξεργασία λυμάτων αποτελείται από έναν συνδυασμό φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών και εργασιών για την απομάκρυνση στερεών, οργανικής ύλης και, μερικές φορές, θρεπτικών ουσιών από τα λύματα. Οι γενικοί όροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή διαφορετικών βαθμών επεξεργασίας – με σειρά αυξανόμενου επιπέδου επεξεργασίας – είναι η προεπεξεργασία, η πρωτοβάθμια, η δευτεροβάθμια και η τριτοβάθμια και/ή η προηγμένη επεξεργασία λυμάτων. [12]

•**Πρωτοβάθμια επεξεργασία:** Αναφέρεται σε λειτουργίες φυσικών μονάδων που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση αιωρούμενων ανόργανων και οργανικών στερεών που επιπλέουν και καθιζάνουν.

•**Δευτεροβάθμια επεξεργασία:** Αναφέρεται σε διεργασίες χημικών και βιολογικών μονάδων.

•**Τριτοβάθμια επεξεργασία:** Αναφέρεται σε συνδυασμό και των τριών, δηλαδή, λειτουργίες φυσικής μονάδας και διεργασίες χημικών ή βιολογικών μονάδων που χρησιμοποιούνται μετά τη δευτερογενή επεξεργασία.



Εικόνα 3. Κόριες διαδικασίες επεξεργασίας λυμάτων. [13]

2.1 Προεπεξεργασία.

Ανάμεσα στην συλλογή των υγρών αποβλήτων και το στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας παρεμβάλλεται μια προκαταρκτική διαδικασία απομάκρυνσης ογκωδών αντικειμένων (πλαστικά ή ξύλινα), άμμου, λιπών και ελαίων. Η προεπεξεργασία αυτή είναι σημαντική για την προστασία του μηχανολογικού εξοπλισμού, που

χρησιμοποιείται στα επόμενα στάδια, από τυχόν βλάβες. Ταυτόχρονα, εξισορροπεί την παροχή και επιφέρει μικρή αλλαγή στην ποιότητα των λυμάτων. [1],[12]

Η προεπεξεργασία αποτελείται από διεργασίες όπως:

- **Εσχάρρωση:** στοχεύει στην κατακράτηση των στερεών που εμπεριέχουν τα αστικά απόβλητα με απομάκρυνση ή συγκράτηση των ογκωδών αντικειμένων ή σωματιδίων μεγάλης διαμέτρου. Οι σχάρες αποτελούνται από παράλληλες μεταλλικές ράβδους με διάκενα μεταξύ τους. Διακρίνονται σε: χοντρές (40-50 mm διάκενο), μέσες (20-40 mm διάκενο) και λεπτές (5-20 mm διάκενο). Επίσης, ανάλογα την λειτουργία τους υπάρχουν οι χειροκίνητες και οι μηχανικές ή αυτόματες σχάρες. [1],[14]
- **Εξάμμωση / Αμμοσυλλογή:** είναι η διαδικασία κατά την οποία αφαιρείται η άμμος από τα υγρά απόβλητα. Επίσης, πραγματοποιείται απομάκρυνση και των χαλικιών, αμμοχάλικου και άλλων σωματιδίων, όπως βαριά ανόργανα στερεά που μοιάζουν με άμμο. Όλα αυτά χωρίς την εξάμμωση θα καθιζάνουν στα κανάλια και θα παρεμβαίνουν στις διαδικασίες επεξεργασίας. Συνήθως διαδέχεται την εσχάρρωση, ενώ προηγείται της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας στην δεξαμενή καθίζησης. [1],[14]
- **Λιποσυλλογή:** πρόκειται για την συλλογή λιπών και ελαίων με διαύγαση βαρύτητας. Συνήθως γίνεται χρήση επίπλευσης με αέρα ή/και χημικής κροκίδωσης σε ορθογώνιες ή κυκλικές δεξαμενές. [12]
- **Εξισορρόπηση παροχής:** είναι το τελικό στάδιο από όλα της προκαταρκτικής επεξεργασίας. Αποσκοπεί στην εξουδετέρωση των ημερήσιων διακυμάνσεων στις ποσότητες λυμάτων, προκειμένου να επιτευχθεί μια σταθερή παροχή στις επόμενες βαθμίδες επεξεργασίας. Πραγματοποιείται εντός δεξαμενής εξισορρόπησης. [1]

2.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία.

Η πρωτοβάθμια ή πρωτογενής επεξεργασία έπεται της προεπεξεργασίας του υγρού αστικού αποβλήτου. Έχει σχεδιαστεί για την αφαίρεση οργανικών και ανόργανων στερεών με τις φυσικές διαδικασίες καθίζησης και επίπλευσης. Περίπου το 25-50% της εισερχόμενης βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (BODs), το 50-70% των συνολικών αιωρούμενων στερεών (SS) και το 65% του λαδιού και του λίπους αφαιρούνται κατά την αρχική επεξεργασία. Ορισμένο οργανικό άζωτο, οργανικός φώσφορος και βαρέα μέταλλα που σχετίζονται με στερεά αφαιρούνται επίσης κατά την πρωτογενή καθίζηση, αλλά τα κολλοειδή και τα διαλυμένα συστατικά δεν επηρεάζονται. Τα λύματα από μονάδες πρωτογενούς καθίζησης αναφέρονται ως πρωτογενή απόβλητα. [12]

Η πρωτογενής επεξεργασία χρησιμοποιεί διαυγαστές ή δεξαμενές καθίζησης, οι οποίες απομακρύνουν τα καθιζήσιμα οργανικά και τα καθιζήσιμα ανόργανα στερεά από τα λύματα. Πλέον, χρησιμοποιείται ως οικονομικό μέσο για την απομάκρυνση ορισμένων ρύπων πριν από τη δευτερογενή επεξεργασία. Το υπόλειμμα από την πρωτογενή

επεξεργασία είναι ένα συμπυκνωμένο εναιώρημα σωματιδίων στο νερό που ονομάζεται "πρωτογενής λάσπη". [12],[14]

2.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Ο στόχος της δευτεροβάθμιας ή δευτερογενούς επεξεργασίας είναι η περαιτέρω επεξεργασία των λυμάτων από την πρωτογενή, για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων οργανικών και αιωρούμενων στερεών. Όσον αφορά το μέγεθος των στερεών, η κατανομή είναι περίπου 30% αιωρούμενα, 6% κολλοειδή και περίπου 65% διαλυμένα στερεά. Τα λύματα από την πρωτογενή επεξεργασία, περιέχουν κυρίως κολλοειδή, διαλυμένα οργανικά και ανόργανα στερεά. Τα πρόσφατα πρότυπα εκροής και τα πρότυπα ποιότητας του νερού απαιτούν μεγαλύτερο βαθμό απομάκρυνσης των οργανικών ουσιών από τα λύματα από ό,τι μπορεί να επιτευχθεί μόνο με πρωτογενή επεξεργασία. Αυτή η επιπρόσθετη αφαίρεση οργανικών ουσιών μπορεί να επιτευχθεί με δευτερογενή επεξεργασία. [12]

Η διαδικασία δευτερογενούς επεξεργασίας συνίσταται στη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων με τη χρήση πολλών διαφορετικών τύπων μικροοργανισμών σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Πολλές αερόβιες βιολογικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για δευτερογενή επεξεργασία που διαφέρουν κυρίως ως προς τον τρόπο με τον οποίο παρέχεται οξυγόνο στους μικροοργανισμούς και στον ρυθμό με τον οποίο οι οργανισμοί μεταβολίζουν την οργανική ύλη. [12]

Οι δύο πιο κοινές διαδικασίες επεξεργασίας αστικών λυμάτων είναι:

- 1) Ενεργή λάσπη (Activated Sludge Process / ASP)
- 2) Φίλτρο στάλαξης

Η διαδικασία ενεργού ιλύος είναι συνήθως η προτιμώμενη μέθοδος. Η ενεργοποιημένη ιλύς χρησιμοποιεί μικροβιακή αποικοδόμηση για την πέψη των διαλυτών οργανικών συστατικών εντός των κυρίως επεξεργασμένων λυμάτων. Το φίλτρο στάλαξης χρησιμοποιεί επίσης μικροβιακή αποικοδόμηση για τους ίδιους σκοπούς. Ωστόσο, σε αυτή τη διαδικασία τα αρχικά επεξεργασμένα λύματα ψεκάζονται σε μια κλίνη φίλτρου που αποτελείται φυσικά από χαλίκι ή θρυμματισμένη πέτρα. Μια βακτηριακή κοινότητα αναπτύσσεται στο υπόστρωμα για να σχηματίσει ένα βιοφίλμ. Αυτά τα φίλτρα απαιτούν γενική συντήρηση γιατί μπορεί να φράξουν καθώς πυκνώνουν τα βιοφίλμ.

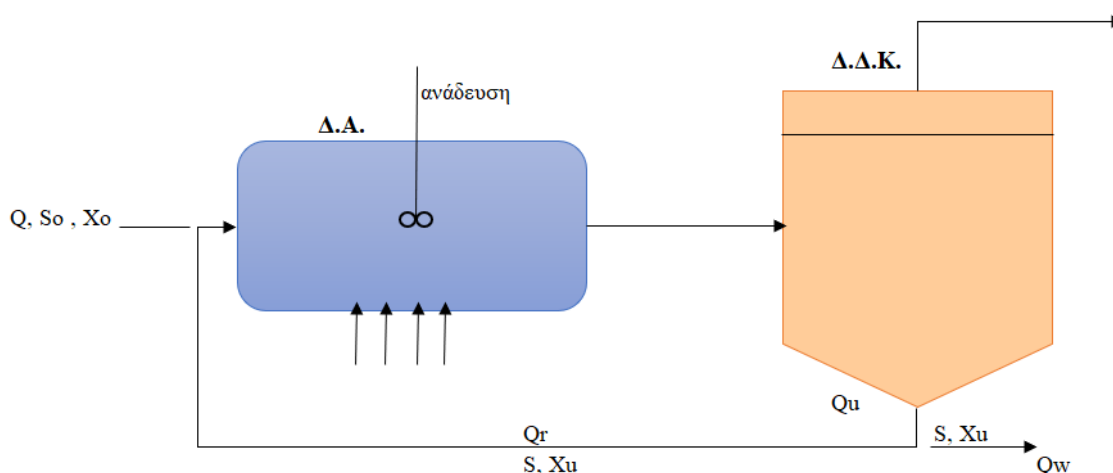
2.3.1 Συμβατική δευτεροβάθμια επεξεργασία ενεργούς ιλύος.

Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο συμβατική διεργασία ενεργούς ιλύος, αναφερόμαστε σε μια δεξαμενή αερισμού (ΔΑ) ακολουθούμενη από μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΔΚ). Στη δεξαμενή αερισμού μέρος του οργανικού υλικού οξειδώνεται από τους μικροοργανισμούς για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων τελικών προϊόντων, τα αμμωνιακά (NH_4^+) οξειδώνονται σε νιτρώδη (NO_2^-) και στην συνέχεια σε νιτρικά (NO_3^-), και το υπόλοιπο παρέχει την ενέργεια και τα υλικά

που απαιτούνται για την υποστήριξη της κοινότητας των μικροοργανισμών. Το οξυγόνο στην αερόβια αυτή διεργασία παρέχεται είτε με διαχύτες είτε με επιφανειακούς αεριστήρες, υπό ανάδευση για την ομοιόμορφη κατανομή του στο υγρό (μικτό υγρό). [1],[12]

Οι μικροοργανισμοί κροκιδώνονται βιολογικά για να σχηματίσουν καθιζήσιμα σωματίδια και, μετά από βιολογική επεξεργασία, αυτή η περίσσεια βιομάζας διαχωρίζεται στην δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης ως συμπυκνωμένο εναιώρημα που ονομάζεται "δευτερογενής λάσπη" ή "βιολογική λάσπη" ή "ενεργοποιημένη ιλύς από απόβλητα". Ένα μέρος της ιλύος ανακυκλοφορείται, ενώ το υπόλοιπο απομακρύνεται (περίσσεια ιλύος) για να μην συσσωρευτούν μικροοργανισμοί. Η ανακυκλοφορία αυτή προσδίδει στο σύστημα τον απαιτούμενο χρόνο παραμονής των στερεών (solid retention time / SRT), ο οποίος εκτιμάται στις 4 ημέρες, σε σχέση με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (hydraulic retention time / HRT), χωρίς όμως να προκύπτει μεγάλη συσσώρευση των στερεών και άρα μεγάλος απαιτούμενος όγκος συστήματος. [1],[12]

Τα συστατικά των λυμάτων μπορούν να συσχετιστούν με δευτερογενή λάσπη ως αποτέλεσμα μικροβιακής αφομοίωσης, με ρόφηση σε καθιζήσιμα στερεά ή με ενσωμάτωση σε σωματίδια συσσωματώματος, που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της βιοκροκίδωσης. Μερικά από τα συστατικά των λυμάτων που συνδέονται παρεμπιπτόντως με τη βιομάζα από τις διαδικασίες δευτερογενούς επεξεργασίας περιλαμβάνουν παθογόνα, ιχνοστοιχεία και οργανικές ενώσεις. [12]



Σχήμα 2: Απεικόνιση συμβατικής διεργασίας ενεργούς ιλύος με δεξαμενή αερισμού (Δ.Α), δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Δ.Δ.Κ) και ανακυκλοφορία ιλύος.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος επεξεργασίας ενεργοποιημένης λάσπης. Αυτά περιλαμβάνουν:

- θερμοκρασία,
- ποσοστά επιστροφής,
- ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου,

- ποσότητα της διαθέσιμης οργανικής ουσίας,
- pH,
- ποσοστά απορριμμάτων,
- χρόνος αερισμού,
- τοξικότητα των λυμάτων.

2.3.2 Θεωρητικό μοντέλο κινητικής ενεργούς ιλύος (Activated Sludge Model).

Το παρόν μοντέλο κινητικής ενεργούς ιλύος έχει καθοριστεί από την διεθνή ένωση για την έρευνα και τον έλεγχο της ρύπανσης των υδάτων (International Association on Water Pollution Research and Control / IAWPRC). Περιλαμβάνει τις πιο ουσιώδεις διεργασίες για ρεαλιστικές λύσεις, με εκφράσεις ρυθμού που να επιλύονται με απλές τεχνικές χωρίς να χάνεται η δυνατότητα εφαρμογής των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα οι διεργασίες μοντέλου με τους ρυθμούς κινητικής που περιγράφουν την καθεμία, αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα 3. [15]

Πίνακας 3. Διεργασίες και ρυθμοί κινητικού μοντέλου κατά IAWPRC. [15]

Διεργασίες κινητικού μοντέλου	Ρυθμοί ανάπτυξης
Αερόβια ανάπτυξη ετερότροφων	$\widehat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$
Ανοξική ανάπτυξη ετερότροφων	$\widehat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) n_g X_{B,H}$
Αερόβια ανάπτυξη αυτότροφων	$\widehat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$
Φάση θανάτου ετερότροφων	$b_H X_{B,H}$
Φάση θανάτου αυτότροφων	$b_A X_{B,A}$
Αμμωνιοποίηση διαλυτού οργανικού αζώτου	$k_a S_{ND} X_{B,H}$
Υδρόλυση οργανικού φορτίου	$k_h \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + (X_S / X_{B,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + n_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H}$
Υδρόλυση οργανικού αζώτου	$\rho_7 (X_{ND} / X_S)$

Μια ακόμη πιο αναλυτική εικόνα των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε σύστημα ενεργούς λάσπης και πως εξάγεται ο τελικός ρυθμός της εκάστοτε διαδικασίας, δίνεται στην εικόνα 4. Στην εικόνα αυτήν φαίνεται λεπτομερώς η μείωση και παράγωγη του κάθε συστατικού που περιέχεται στο μίκτο υγρό της μεθόδου. Το κάθε συστατικό

καθώς και οι διάφορες σταθερές του μοντέλου αναγράφονται με συγκεκριμένο όρο στις κινητικές εκφράσεις.

- S_O : Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου. Καταναλώνεται μόνο στις αερόβιες συνθήκες. Κανονικά σχετίζεται και με την αποσύνθεση καθώς γίνεται μια ανακύκλωση βιομάζας, αλλά δεν φαίνεται στο μοντέλο εφόσον η νέα βιομάζα είναι πολύ μικρότερη από την χαμένη βιομάζα.
- S_{NO} : Συγκέντρωση διαλυτού νιτρικού αζώτου. Παράγεται από αερόβια ανάπτυξη αυτότροφων βακτηρίων, ενώ καταναλώνεται από την ανοξική των ετερότροφων. Ουσιαστικά καταναλώνεται και από την αποσύνθεση γιατί ανακυκλώνεται οργανική ύλη διαθέσιμη για ανοξική ανάπτυξη ετερότροφων.
- S_{NH} : Συγκέντρωση διαλυτού αμμωνιακού αζώτου. Πρόκειται για το άθροισμα ειδών NH_4^+ και NH_3 . Στην εικόνα 4 το $-i_{XB}$ δηλώνει την ενσωμάτωση στην βιομάζα, ενώ το $-1/Y_A$ υποδηλώνει μέρος ενέργειας.
- S_{ND} : Συγκέντρωση διαλυτού οργανικού αζώτου.
- S_{alk} : Ολική αλκαλικότητα. Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι χρήσιμη για πρόβλεψη σε αλλαγές του pH λόγω προσθήκης ή αφαίρεσης πρωτονίων. Προσθήκη H^+ γίνεται κατά την σύνθεση αυτότροφης και ετερότροφης βιομάζας, ενώ αφαίρεση κατά την αμμωνιοποίηση.
- S_I : Συγκέντρωση διαλυτών αδρανών οργανικών. Ίδια σε εισροή και εκροή.
- S_S : Συγκέντρωση άμεσα βιοαποικοδομήσιμου υποστρώματος. Απλά μόρια που προσλαμβάνονται από ετερότροφους για βιομάζα.
- X_I : Συγκέντρωση αδιάλυτων αδρανών σωματιδίων. Αυτά αναμιγνύονται στην λάσπη και εξέρχονται ως απώλεια λάσπης. Η ποσότητά τους στο σύστημα είναι μεγαλύτερη από της εισροής.
- $X_{B,H}$: Συγκέντρωση ετερότροφης βιομάζας.
- $X_{B,A}$: Συγκέντρωση αυτότροφης βιομάζας.
- X_{ND} : Συγκέντρωση αδιάλυτου βιοαποικοδομήσιμου οργανικού αζώτου.
- X_S : Συγκέντρωση αδιάλυτου αργά βιοαποικοδομήσιμου υποστρώματος. Σύνθετα μόρια που πρέπει να μετατραπούν σε άμεσα βιοαποικοδομήσιμα για να χρησιμοποιηθούν.
- X_P : Συγκέντρωση αδιάλυτων προϊόντων από τον θάνατο της βιομάζας. Δεν καταναλώνονται γιατί είναι αδρανή στην βιολογική επίθεση. Αποτελούν παράδειγμα μη ενεργούς ιλύος.

Στην εικόνα 5 αναφέρονται οι σταθερές του θεωρητικού μοντέλου με τις μονάδες μέτρησής τους και τις τυπικές τιμές τους.

Component →	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Process Rate, ρ_i [$ML^{-3}T^{-1}$]
j	Process ↓	S_I	S_S	X_I	X_S	$X_{R,H}$	$X_{B,A}$	X_P	S_O	S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}	
1	Aerobic growth of heterotrophs		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$				$\hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{R,H}$
2	Anoxic growth of heterotrophs		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2.86 Y_H}$		$-i_{XB}$				$\hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \times \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{R,H}$
3	Aerobic growth of autotrophs						1		$\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$				$\hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$
4	'Decay' of heterotrophs				$1 - f_P$	-1		f_P							$b_H X_{R,H}$
5	'Decay' of autotrophs				$1 - f_P$		-1	f_P							$b_A X_{B,A}$
6	Ammonification of soluble organic nitrogen										1	-1		$\frac{1}{14}$	$k_a S_{ND} X_{R,H}$
7	'Hydrolysis' of entrapped organics		1		-1										$k_h \frac{X_B/X_{R,H}}{K_X + (X_B/X_{R,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H}$
8	'Hydrolysis' of entrapped organic nitrogen											1	-1		$\rho_i (X_{ND}/X_a)$

Εικόνα 4: Αναλυτική έκφραση ρυθμού διεργασιών μοντέλου. [15]

Symbol	Unit	Value at 20 °C	Value at 10 °C
Stoichiometric parameters			
Y_A	g cell COD formed (g N oxidized) ⁻¹	0.24	0.24
Y_H	g cell COD formed (g COD oxidized) ⁻¹	0.67	0.67
f_P	dimensionless	0.08	0.08
i_{XB}	g N(g COD) ⁻¹ in biomass	0.086	0.086
i_{XE}	g N(g COD) ⁻¹ in endogenous mass	0.06	0.06
Kinetic parameters			
$\hat{\mu}_H$	day ⁻¹	6.0	3.0
K_S	g COD m ⁻³	20.0	20.0
$K_{O,H}$	g O ₂ m ⁻³	0.20	0.20
K_{NO}	g NO ₃ -N m ⁻³	0.50	0.50
b_H	day ⁻¹	0.62	0.20
η_g	dimensionless	0.8	0.8
η_h		0.4	0.4
k_h	g slowly biodegradable COD (g cell COD · day) ⁻¹	3.0	1.0
K_X	g slowly biodegradable COD (g cell COD) ⁻¹	0.03	0.01
$\hat{\mu}_A$	day ⁻¹	0.80	0.3
K_{NH}	g NH ₃ -N m ⁻³	1.0	1.0
$K_{O,A}$	g O ₂ m ⁻³	0.4	0.4
k_a	m ³ · COD (g · day) ⁻¹	0.08	0.04

Εικόνα 5: Όροι σταθερών κινητικού μοντέλου: μονάδες μέτρησης και τυπικές τιμές. [15]

Αξίζει να σημειωθεί ότι το θεωρητικό αυτό μοντέλου κατά IAWPRC αποτελείται από ορισμένες υποθέσεις και παραδοχές. Αναλυτικότερα, το μοντέλο κάνει την παραδοχή σταθερής θερμοκρασίας και σταθερού pH κατά την διάρκεια της μεθόδου. Επίσης, δεν διακρίνει την φύση της οργανικής ύλης και υποθέτει πως δεν υπάρχουν περιορισμοί από άλλα ανόργανα θρεπτικά συστατικά, όπως είναι ο φώσφορος. Μη μεταβαλλόμενοι ως προς τις τιμές τους θεωρούνται και οι συντελεστές η_g , η_h και νιτροποίησης. Επιπλέον, η ετερότροφη βιομάζα θεωρείται όλη ομοιογενής και οι ενσωματώσεις σε εκείνην στιγμιαίες χρονικά. Τέλος, υπάρχει η παραδοχή πως πραγματοποιούνται

ταυτόχρονα η υδρόλυση της οργανικής ύλης με την υδρόλυση του αζώτου και πως η αποσύνθεση της βιομάζας είναι ανεξάρτητη του είδους του παρόντος δέκτη ηλεκτρονίων. [15]

Σημαντική είναι και η αναφορά στους περιορισμούς που διέπουν το εν λόγω κινητικό μοντέλο και αποτελούν προϋποθέσεις για την χρήση του. Αρχικά, ο καθαρός ρυθμός ανάπτυξης και ο χρόνος παραμονής στερεών οφείλουν να έχουν τιμές εντός ορίων που επιτρέπουν την κατάλληλη ανάπτυξη βιομάζας. Η καθίζηση πρέπει να καθορίζεται από την συγκέντρωση των στερεών στην τελική κατάσταση γιατί είναι εξαρτώμενη της. Επιπροσθέτως, αποτελεί περιορισμό η οριοθέτηση του μη αεριζόμενου χώρου στο σύστημα σε λιγότερο από το 50%, διότι αλλιώς χειροτερεύουν τα χαρακτηριστικά καθίζησης της λάσπης. Τέλος, το σύστημα οφείλει να λειτουργεί με ένταση ανάδευσης ανάλογη της δύναμης μεταφοράς του οξυγόνου. [15]

2.3.3 Μη συμβατικά συστήματα ενεργούς ιλύος.

Πέρα από την συμβατική μέθοδο δευτεροβάθμιας επεξεργασίας με την ενεργό ιλύ, υπάρχουν και άλλα συστήματα που αποτελούν παραλλαγές της. Οι παραλλαγές αυτές χρησιμοποιούνται ανάλογα την καταλληλότητά τους στην εκάστοτε περίπτωση επεξεργασίας και χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες.

Κωνικός αερισμός -Tapered Aeration:

Το κωνικό σύστημα αερισμού είναι παρόμοιο με τη συμβατική διαδικασία ενεργού ιλύος. Η κύρια διαφορά είναι στη διάταξη των διαχυτών. Οι διαχυτές βρίσκονται κοντά μεταξύ τους στο άκρο εισροής όπου χρειάζεται περισσότερο οξυγόνο. Προς το άλλο άκρο της λεκάνης αερισμού, η απόσταση των διαχυτών αυξάνεται.

Βηματικός αερισμός – Step Aeration:

Στον σταδιακό αερισμό, η επιστρεφόμενη λάσπη εφαρμόζεται σε πολλά σημεία της λεκάνης αερισμού. Γενικά, η δεξαμενή υποδιαιρείται σε τρία ή περισσότερα παράλληλα κανάλια με διαφράγματα γύρω από το άκρο και η λάσπη εφαρμόζεται σε ξεχωριστά κανάλια ή βαθμίδες. Η ζήτηση οξυγόνου κατανέμεται ομοιόμορφα.

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. [1]

Πλήρης Αερισμός Μίξης:

Στον πλήρη αερισμό του μίγματος η εισροή και η επιστρεφόμενη λάσπη αναμειγνύονται και εφαρμόζονται σε πολλά σημεία κατά μήκος και πλάτος της λεκάνης. Τα περιεχόμενα αναμειγνύονται και τα αιωρούμενα στερεά μικτού υγρού ρέουν κατά μήκος της δεξαμενής προς το κανάλι εκροής. Η ζήτηση οξυγόνου και η οργανική φόρτιση είναι ομοιόμορφες σε όλο το μήκος της λεκάνης.

Σταθεροποίηση επαφής:

Στη σταθεροποίηση επαφής δεν απαιτείται πρωτογενής θεραπεία. Η ενεργοποιημένη ιλύς αναμιγνύεται με εισροή στη δεξαμενή επαφής όπου τα οργανικά απορροφώνται από μικροοργανισμούς. Η επιστρεφόμενη ιλύς αερίζεται στη λεκάνη αερισμού για να σταθεροποιηθούν τα οργανικά. Η διαδικασία απαιτεί περίπου 50% λιγότερο όγκο δεξαμενής και μπορεί να προκατασκευαστεί ως μονάδα συσκευασίας για ροές από 0,05 έως 1,0 MGD. Από την άλλη πλευρά, αυτό το σύστημα είναι πιο περίπλοκο στον έλεγχο επειδή πολλοί συνήθεις υπολογισμοί ελέγχου δεν λειτουργούν.

Ενεργοποιημένη λάσπη εκτεταμένου αερισμού:

Ο εκτεταμένος αερισμός επίσης δεν απαιτεί πρωτογενή επεξεργασία. Χρησιμοποιεί μια μεγάλη λεκάνη αερισμού όπου διατηρείται μεγάλος πληθυσμός μικροοργανισμών. Χρησιμοποιείται για μικρές ροές από υποδιαιρέσεις, σχολεία κ.λπ. Τα εργοστάσια προκατασκευασμένων συσκευασιών χρησιμοποιούν αυτή τη διαδικασία εκτενώς. Έχει ένα κανάλι σε σχήμα πίστας αγώνων, με ρότορες που χρησιμοποιούνται για την παροχή οξυγόνου και τη διατήρηση της κυκλοφορίας. Τυπικά η διαδικασία παράγει υψηλής ποιότητας λύματα και λιγότερο ενεργοποιημένη ιλύ.

Τάφρος οξείδωσης:

Η τάφρος οξείδωσης είναι μια παραλλαγή της διαδικασίας εκτεταμένου αερισμού, όπου το απόβλητο ρέει κυκλικά με ταχύτητα 0,3 έως 0,6m/s, ενώ ο αερισμός πραγματοποιείται σε συγκεκριμένο σημείο. [1]

Συστήματα καθαρού οξυγόνου:

Το καθαρό οξυγόνο – αντί για αέρα- διαχέεται σε καλυμμένες δεξαμενές αερισμού. Ένα μέρος του αερίου σπαταλά από τη δεξαμενή για να μειωθεί η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα. Η διαδικασία είναι κατάλληλη για απόβλητα υψηλής αντοχής όπου ο χώρος μπορεί να είναι περιορισμένος. Απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την παραγωγή οξυγόνου.

Λειτουργία Kraus:

Η ενεργός ιλύς από την ανακυκλοφορία αναμιγνύεται με το υπερκείμενο υγρό από τη χώνευση λάσπης και πριν τη δεξαμενή αερισμού, αερίζεται προκειμένου να νιτροποιηθεί η αμμωνία. Κατάλληλο για απόβλητα πτωχά σε άζωτο. [1]

2.3.4 Αντιδραστήρας διαλείποντος έργου με περιοδική λειτουργία.

Ο αντιδραστήρας διαλείποντος έργου είναι μια διάταξη απομάκρυνσης φωσφόρου των τελευταίων χρόνων με περιοδική λειτουργία ή διαλείπουσας λειτουργίας (Sequencing Batch Reactor, SBR). Η διαφοροποίηση του SBR από τα συμβατικά συστήματα είναι ότι οι εκάστοτε συνθήκες επεξεργασίας – αερόβιες, αναερόβιες, ανοξικές – δεν διακρίνονται χωρικά, αλλά υπάρχει χρονική μεταβολή τους στον ίδιο χώρο. Πιο επεξηγηματικά, οι συνθήκες επεξεργασίας δεν συμβαίνουν σε διαφορετικές δεξαμενές, αλλά σε έναν κοινό αντιδραστήρα σε διαφορετικούς χρόνους που διαδέχονται ο ένας

τον άλλον, δημιουργώντας έναν ολόκληρο κύκλο λειτουργίας του αντιδραστήρα. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται συνεχώς προσδίδοντας τον περιοδικό χαρακτήρα στον αντιδραστήρα. Η περιοδική του λειτουργία περιλαμβάνει κύκλους διεργασιών που ποικίλλουν από 3-24h. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται εντός ενός κύκλου ξεκινούν από την τροφοδοσία του αντιδραστήρα με τα προς επεξεργασία απόβλητα. Ακολουθούν το αερόβιο στάδιο επεξεργασίας, η καθίζηση των βιοστερεών και τέλος η 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, αναλύεται περαιτέρω η λειτουργία του συγκεκριμένου αντιδραστήρα που αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. [1]

3. Τριτοβάθμια επεξεργασία – Απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών: οργανικών, φωσφόρου, αζώτου.

Αν και η δευτερογενής επεξεργασία μπορεί να αφαιρέσει πάνω από 85% του BOD, ορισμένα συστατικά, τα αιωρούμενα στερεά και σχεδόν όλα τα παθογόνα, μερικές φορές απαιτούν πρόσθετη θεραπεία, διότι δεν έχει επιτευχθεί η κατάλληλη συγκέντρωσή τους βάσει των περιβαλλοντικών προδιαγραφών. Συνεπώς είναι επιθυμητή η τριτοβάθμια επεξεργασία, όπου τα πρωτογενή λύματα υποβάλλονται σε πρόσθετες επεξεργασίες που έχουν σχεδιαστεί για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων για την εγκατάσταση. Αυτές οι επιλογές τριτοβάθμιας επεξεργασίας περιλαμβάνουν κυρίως μεθόδους για μείωση του φωσφόρου και του αζώτου και την ενίσχυση της απομάκρυνσης των συστατικών οργανικών αποβλήτων.

Ο φώσφορος και το άζωτο είναι δύο ενώσεις που γενικά αυξάνονται στα δευτερεύοντα απόβλητα των αστικών λυμάτων. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούν και οι δύο αυτές ενώσεις θρεπτικά συστατικά σημαντικά για την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Ειδικά ο φώσφορος μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ευτροφισμού στα ύδατα υποδοχής και ως εκ τούτου να υποβαθμίσει το περιβάλλον οικοσύστημα. Η ποσότητα φωσφόρου που μπορεί να απελευθερωθεί από τα λύματα ρυθμίζεται σε 4 – 15 mg/L.

Νεότερες διαδικασίες επεξεργασίας αρχίζουν τώρα να εμφανίζονται για να παρέχουν αποτελεσματική θεραπεία για αναδυόμενους μολυντές που προκαλούν ανησυχία. Αυτές οι προσμείξεις είναι ευρέως φάσματος και περιλαμβάνουν φυσικές τοξίνες μικροκυστίνης που παράγονται από κυανοβακτήρια, φαρμακευτικά προϊόντα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας και άλλους οργανικούς ρυπαντές ίχνους. Μερικές από αυτές τις ενώσεις δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά με τις συμβατικές διεργασίες επεξεργασίας λόγω των φυσικοχημικών δομικών ιδιοτήτων και της αντοχής τους στην αποικοδόμηση και της χαμηλής συγγένειας για απορρόφηση σε σωματίδια (συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με τριτογενή επεξεργασία). Μερικές από τις νεότερες διαδικασίες επεξεργασίας περιλαμβάνουν τη χρήση ισχυρών

οξειδωτικών όπως το όζον, το υπεροξείδιο, την υπεριώδη ακτινοβολία και το φιλτράρισμα μεμβράνης.

Ωστόσο οι παλαιότερες και πιο κοινές διαδικασίες επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται από τις περισσότερες συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

Διήθηση: Στις διαδικασίες δευτερογενούς επεξεργασίας παρά την αποτελεσματικότητά τους στην μείωση του BOD, κάποιο αιωρούμενο υλικό μπορεί να παραμείνει στα απόβλητα ακόμη και μετά την καθίζηση των στερεών. Μερικά από τα αιωρούμενα υλικά είναι μικροοργανισμοί που μπορούν να ασκήσουν ένα BOD από την κανονική αναπνοή και την αποσύνθεση. Συνεπώς, γίνεται διήθηση χρησιμοποιώντας φίλτρα άμμου, για το φιλτράρισμα αυτού του υπολειπόμενου υλικού. Τα φίλτρα άμμου είναι παρόμοια σχεδιαστικά με αυτά της επεξεργασίας πόσιμου νερού, όμως το υλικό βαρύτερο από τα φίλτρα πόσιμου νερού, καθώς τα φίλτρα λυμάτων απαιτούν συχνή αντίστροφη πλύση για την απομάκρυνση των στερεών που φιλτράρονται από την εκροή λυμάτων.

Προσρόφηση άνθρακα: Οι διαλυτές οργανικές ουσίες συχνά παραμένουν στα δευτερεύοντα απόβλητα, ακόμη και μετά τη διήθηση με άμμο. Πολλές από αυτές τις ενώσεις είναι «πυρίμαχες» ή ανθεκτικές στην αποικοδόμηση. Η προσρόφηση αυτών των ενώσεων σε ενεργό άνθρακα είναι μία από τις κοινές μεθόδους απομάκρυνσης. Ο άνθρακας ενεργοποιείται με θέρμανση απουσία οξυγόνου. Αυτό προορίζεται να δημιουργήσει πολλαπλά κατάγματα και πόρους και έτσι να αυξήσει την επιφάνεια και συνεπώς τις θέσεις προσρόφησης στον άνθρακα. Αφού εξαντληθεί η ικανότητα απορρόφησης του άνθρακα, μπορεί να αποκατασταθεί με επαναθέρμανση απουσία οξυγόνου. Αυτή η διαδικασία απομακρύνει τα προσροφημένα οργανικά, τα οποία μπορούν να καταναλωθούν σε μετακαυστήρα.

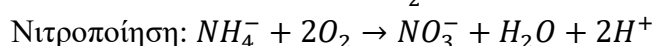
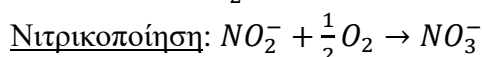
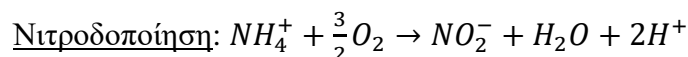
3.1 Αφαίρεση αζώτου.

Το άζωτο σε οποιαδήποτε διαλυτή μορφή είναι ένα θρεπτικό συστατικό των φυτών και μπορεί να χρειαστεί να αφαιρεθεί από τα λύματα για να ελεγχθεί η ανάπτυξη των φυκιών. Επιπλέον, το άζωτο με τη μορφή αμμωνίας ασκεί ζήτηση οξυγόνου και μπορεί να είναι τοξικό για τα ψάρια. Το άζωτο μπορεί να αφαιρεθεί από τα λύματα τόσο με βιολογικά όσο και με χημικά μέσα. Η βιολογική διεργασία ονομάζεται αμμωνιοποίηση / νιτροποίηση / απονιτροποίηση και η χημική διαδικασία ονομάζεται απογύμνωση αμμωνίας.

3.1.1 Αμμωνιοποίηση / Νιτροποίηση / Απονιτροποίηση.

Η φυσική διαδικασία νιτροποίησης μπορεί να εξαναγκαστεί να συμβεί στη διαδικασία ενεργοποιημένης ιλύος διατηρώντας ένα χρόνο κράτησης κυττάρων τουλάχιστον δεκαπέντε ημερών. Τα βακτήρια μπορούν να μετατρέψουν το οργανικό άζωτο (πρωτεΐνες, πεπτίδια κ.λπ.) σε αμμωνία, με την αργή βιολογική διεργασία της

αμμωνιοποίησης. Η οξείδωση της αμμωνίας είναι η ονομαζόμενη διαδικασία νιτροποίησης, που αρχικά γίνεται οξείδωση σε νιτρώδη (νιτροδοποίηση) με την ομάδα βακτηρίων Nitrosomonas και μετά σε νιτρικά (νιτρικοποίηση) με την ομάδα Nitrobacter. [16]



Σύμφωνα την αντίδραση της νιτροποίησης η απαίτηση οξυγόνου σε g για την πλήρη οξείδωση αμμωνίας (νιτρογενής απαίτηση οξυγόνου, NAO) είναι 4,57 g O₂ ανά g αμμωνιακού αζώτου. Επιπλέον, βάσει του κινητικού μοντέλου IAWPRC που περιγράφεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο η νιτροποίηση, εφόσον πραγματοποιείται από αυτότροφες ομάδες βακτηρίων προκύπτει από την αφαίρεση του ρυθμού της φάσης θανάτου τους από αυτόν της αερόβιας ανάπτυξής τους. Συνεπώς, ο ρυθμός εκφράζεται από την σχέση:

$$\widehat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A} - b_A X_{B,A}$$

Όπου:

$X_{B,A}$: συγκέντρωση αυτότροφων (νιτροποιητικών) οργανισμών,

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

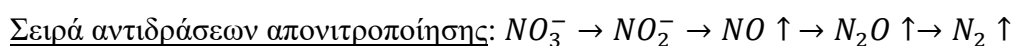
S_{NH} : συγκέντρωση αμμωνίου,

S_O : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου,

b_A : ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής αυτότροφων οργανισμών,

$K_{NH}, K_{O,A}$: συντελεστές κορεσμού.

Όταν τα νιτρικά μετατρέπονται σε αέρια οξείδια του αζώτου και άρα σε αέριο άζωτο στην πορεία μέσω βιολογικής αναγωγής, τότε πραγματοποιείται η απονιτροποίηση. Αυτή είναι απαραίτητη σε περίπτωση ανεπαρκούς νιτροποίησης, ώστε να γίνει η απομάκρυνση των απαιτούμενων νιτρικών και νιτρωδών ιόντων. Η διεργασία αυτή διεξάγεται κάτω από ανοξικές συνθήκες από ετερότροφα, προαιρετικά αερόβια, βακτήρια. Μικρές ποσότητες οργανικών υλικών (όπως μεθανόλη ή ακατέργαστα ή καθιζάνοντα λύματα) θα μπορούσαν να προστεθούν για να παρέχουν μια πηγή τροφής για τα βακτήρια για αυτή τη διαδικασία απονιτροποίησης, εάν δεν υπάρχουν ήδη επαρκή θρεπτικά συστατικά στη λεκάνη αερισμού. Η θερμοκρασία στις συγκεντρώσεις αυτών των ποσοτήτων οργανικών υλικών έχει αποδειχθεί ότι δεν έχουν επιρροή στην παραγωγή των οξειδίων αζώτου. Στον αντίποδα οι μεταβολές στο pH του συστήματος είναι αυτές που επιδρούν στα παραγόμενα NO και NO₂. [1]



Στην εξαγωγή της έκφρασης του ρυθμού της απονιτροποίησης, η μετατροπή απλουστεύεται σε ένα στάδιο, $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2\uparrow$. Ακολουθείται η κινητική Monod για δύο τα υποστρώματα ανάπτυξης των μικροοργανισμών, δηλαδή τα νιτρικά και τον οργανικό άνθρακα, με ειδικό ρυθμό ίσο με: $\mu_H = \mu'_H \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot \frac{S}{K_S + S}$.

Συνεπώς ο συνολικός ρυθμός ανάπτυξης των απονιτροποιητικών βακτηρίων δίνεται από την σχέση: $r_H = \mu_H \cdot x_{BH} - b_H \cdot x_{BH} = \mu'_H \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot \frac{S}{K_S + S} \cdot x_{BH} - b_H \cdot x_{BH}$

Όπου:

x_{BH} : συγκέντρωση ετερότροφων (απονιτροποιητικών) οργανισμών,
 μ'_H : μέγιστος ειδικός ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης (τυπικά $\sim 4,2 \text{ d}^{-1}$),
 K_{NO}, K_S : συντελεστές κορεσμού (20 mg COD/L και 0,5 mg N/L, αντίστοιχα),
 b_H : ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής ετερότροφων οργανισμών,
 S_{NO} : συγκέντρωση νιτρικών (mg-N/L).

3.1.2 Απογύμνωση αμμωνίας.

Το άζωτο με τη μορφή αμμωνίας μπορεί επίσης να αφαιρεθεί χημικά αυξάνοντας το pH. Η απογύμνωση αμμωνίας είναι μια φυσικοχημική διαδικασία κατά την οποία η αμμωνία απομακρύνεται από την υγρή φάση ενός χωνεμένου υπολείμματος μέσω της εφαρμογής ροής αερίου, με το χωνεμένο υπόλειμμα συνήθως να ρέει σε αντίστροφη κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, συχνά προστίθεται ασβέστης για να μετατραπεί το ιόν αμμωνίου σε αμμωνία, η οποία μπορεί να απομακρυνθεί από το νερό, διοχετεύοντας μεγάλες ποσότητες αέρα μέσω του νερού. Η μέθοδος αυτή είναι αποδεδειγμένα η πιο εφαρμόσιμη μεταξύ των τεχνικών αφαίρεσης αμμωνίας και τώρα εφαρμόζεται εκτενώς σε εμπορική κλίμακα σε αστικά λύματα. Αυτό συμβαίνει επειδή είναι σχετικά εύκολη στη λειτουργία του, επιτρέπει ένα ορισμένο επίπεδο αιωρούμενων στερεών, δεν δημιουργεί επιπλέον λάσπη ή δευτερογενή ρύπο και έχει σχετικά χαμηλή ζήτηση ενέργειας και κόστος κεφαλαίου. [17]

3.2 Αφαίρεση φωσφόρου.

Ο φώσφορος στα λύματα είναι ρύπος γιατί ενθαρρύνει την ανάπτυξη φυκιών. Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο οι τυπικές μορφές φωσφόρου που υπάρχουν στα αστικά λύματα είναι τα ορθοφωσφορικά (PO_4^{3-}) και τα πολυφωσφορικά που μετατρέπονται σε PO_4^{3-} μετά από αργή υδρόλυση. Η δευτεροβάθμια επεξεργασία που περιλαμβάνει μόνο αερόβια βιολογική επεξεργασία εμφανίζει απόδοση αφαίρεσης φωσφόρου που κυμαίνεται από 20% έως 30%, με αποτέλεσμα συγκεντρώσεις λυμάτων υψηλότερες από το τυπικό περιβαλλοντικό πρότυπο. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω απομάκρυνσή του, η οποία συνήθως περιλαμβάνει την προσθήκη μεταλλικών αλάτων όπως ο χλωριούχος σίδηρος στα λύματα, την ανάμειξή του σε μια λεκάνη αντίδρασης και στη συνέχεια την αποστολή του μείγματος σε έναν διαυγαστή για να επιτραπεί στο ίζημα που περιέχει φώσφορο να καθιζάνει. [18]

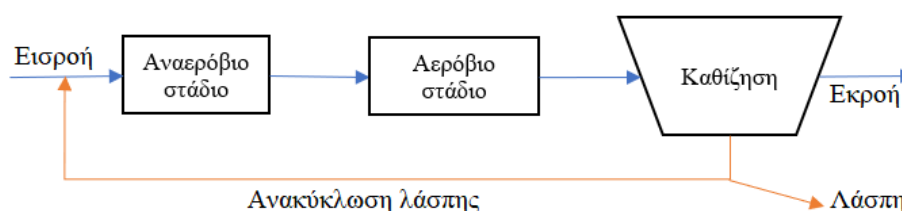
Η χημική κατακρήμνιση με τον χλωριούχο σίδηρο παραμένει μια καθιερωμένη και εξαιρετικά αποτελεσματική λύση για την απομάκρυνση του φωσφόρου και εφαρμόζεται σε πολλές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Ωστόσο καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια για την ενίσχυση της βιολογικής απομάκρυνσης του φωσφόρου με στόχο τον περιορισμό της κατανάλωσης χημικών, τη μείωση του κόστους επεξεργασίας και την εξασφάλιση υψηλότερης βιωσιμότητας της διαδικασίας. Η βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου βασίζεται στη συσσώρευσή του σε μικροβιακά κύτταρα που σχηματίζουν δευτερογενή λάσπη, η οποία στη συνέχεια απομακρύνεται από το νερό. [18]

Αναλυτικότερα, ο φώσφορος προσλαμβάνεται από τους μικροοργανισμούς για τις μεταβολικές τους αντιδράσεις. Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης αυτής, έχουν αναπτυχθεί διάφορες βιολογικές διεργασίες που χαρακτηρίζονται από την παρουσία αιωρούμενης ή συνδεδεμένης βιομάζας (χημειο- ή φωτοσυνθετική). Ωστόσο, οι βιοχημικές αντιδράσεις που φαίνεται να αναγνωρίζονται από ολόκληρη την επιστημονική κοινότητα αναφέρονται τόσο σε αναερόβιες, ανοξικές και αερόβιες συνθήκες. Υπό αναερόβιες συνθήκες, οι μικροοργανισμοί μπορούν να αφομοιώσουν ορισμένα ταχέως βιοαποδομήσιμα υποστρώματα, όπως γλυκόζη, γλουταμινικό, ασπαρτικό και γλυκίνη, προς ζύμωση και σύνθεση γλυκογόνου και νέων κυττάρων. Η απαιτούμενη ενέργεια λαμβάνεται τόσο από τη ζύμωση ταχέως βιοαποδομήσιμων υποστρωμάτων όσο και από την αποικοδόμηση του πολυφωσφορικών, με επακόλουθη απελευθέρωση φωσφορικών αλάτων και οργανικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους όπως γαλακτικό, οξικό οξύ. Εν τω μεταξύ, οι οργανικές ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους, προσλαμβάνονται και αποθηκεύονται ως πολυυδροξυαλκανοϊκά (PHA) στα κύτταρα των βακτηρίων. Κατά τη διάρκεια της επόμενης αερόβιας ή/και ανοξικής φάσης, λόγω της σπανιότητας της εξωγενούς ενέργειας και των πηγών άνθρακα που έχουν ήδη εξαντληθεί κατά την αναερόβια φάση, το αποθηκευμένο γλυκογόνο και το PHA οξειδώνονται αερόβια ή/και ανοξικά για την παροχή άνθρακα και ενέργειας που απαιτούνται για την παραγωγή νέα κύτταρα καθώς και για την αφομοίωση φωσφορικών και την επακόλουθη αποκατάσταση του αποθέματος πολυφωσφορικών. Η πρόσληψη φωσφορικών σε αερόβιες συνθήκες υπερβαίνει την ποσότητα που απελευθερώνεται κατά την αναερόβια φάση, με αποτέλεσμα μια καθαρή πρόσληψη P που ορίζεται επίσης ως πρόσληψη πολυτελείας. [18]

Οι διαφορετικοί τρόποι συνδυασμού αερόβιων, ανοξικών και αναερόβιων σταδίων στην συνολική βιολογική διάταξη για την απομάκρυνση φωσφόρου, έχουν ως αποτέλεσμα μια ποικιλία συστημάτων επεξεργασίας. Στην παρούσα εργασία αναλύονται οι διατάξεις A/O και Phostrip.

3.2.1 Διεργασία A/O.

Η συγκεκριμένη διεργασία, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 3, συνδυάζει ένα αναερόβιο και ένα αερόβιο στάδιο σε σειρά. Ο συνδυασμός αυτών των σταδίων επιτυγχάνει την ταυτόχρονη οξείδωση άνθρακα και την αφαίρεση αζώτου, ακόμη και την νιτροποίηση ενός μέρος αζώτου σε περίπτωση που εφαρμοστεί ο κατάλληλος χρόνος παραμονής στον αερόβιο χώρο. Αρχικά, στην αναερόβια δεξαμενή ξεκινά η μείωση του BOD παράλληλα με την διαλυτοποίηση και απελευθέρωση του ενδοκυτταρικού φωσφόρου P στο υγρό. Έτσι, ο φώσφορος εφόσον βρίσκεται διαλυτός στο επόμενο στάδιο του αερισμού προσλαμβάνεται από τα φωσφοροβακτήρια. Καταφέρνει τελικά να αφαιρεθεί με την απομάκρυνση της πλούσιας σε φωσφορικά ιλύος μετά την δεξαμενή καθίζησης. Αξίζει να σημειωθεί πως ένα μέρος της ιλύος αυτής ανακυκλώνεται στην ροή εισόδου, ώστε να επιτευχθεί ο κατάλληλος χρόνος παραμονής φωσφοροβακτηρίων στο σύστημα.



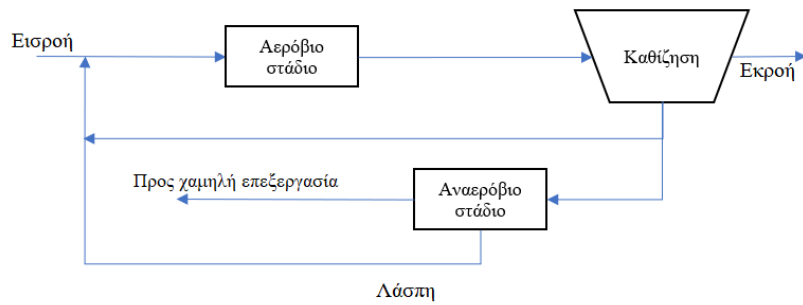
Σχήμα 3: Διεργασία A/O.

Καθοριστικός παράγοντας στην ποσότητα του φωσφόρου της εκροής αποτελεί ο λόγος BOD/P των λυμάτων της τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα:

- Αν $BOD/P > 10$, τότε συγκέντρωση P εκροής ≤ 1 mg/L.
- Αν $BOD/P < 10$, τότε η συγκέντρωση P εκροής είναι μεγαλύτερη από το επιθυμητό και χρειάζεται και χημική μέθοδος απομάκρυνσής του πέρα από βιολογική.

3.2.2 Διεργασία Phostrip.

Η Phostrip διάταξη αποτελείται από ένα αναερόβιο στάδιο στο οποίο οδηγείται ένα μέρος της ανακυκλοφορίας ιλύος με συνήθη υδραυλικό χρόνο παραμονής 8-12h. Αυτό το στάδιο προκαλεί την απελευθέρωση των φωσφορικών, 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 χημική μέθοδο – ασβέστη ή άλλο κροκιδωτικό μέσο. Τελικά, ο φώσφορος απομακρύνεται στο χημικό ίζημα. Στην διεργασία αυτήν επιτυγχάνεται συγκέντρωση φωσφόρου στην εκροή ίση ή μικρότερη από 1,5mg/L.



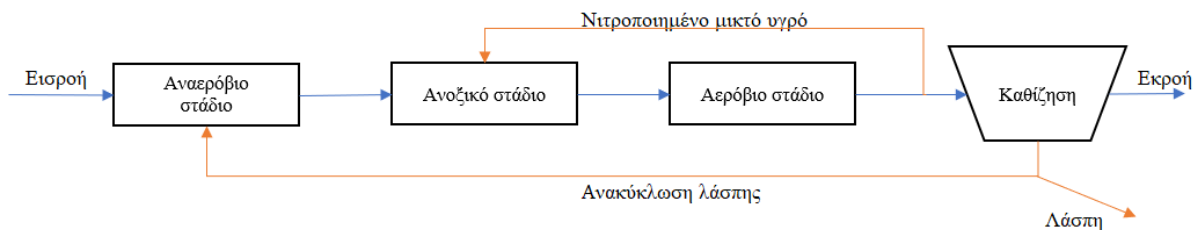
Σχήμα 4: Διεργασία Phostrip.

3.3 Ταυτόχρονη αφαίρεση αζώτου – φωσφόρου.

Αντιστοίχως με τις διατάξεις αφαίρεσης φωσφόρου, υπάρχουν συνδυασμοί αερόβιων, ανοξικών και αναερόβιων σταδίων για απομάκρυνση και αζώτου στην ίδια διεργασία. Παράδειγμα τέτοιων διεργασιών αποτελούν η διεργασία A²/O, Bardenpho 5 σταδίων, UCT, VIP, Johannesburg.

3.3.1 Διεργασία A²/O.

Σε σχέση με αυτές που ακολουθούν, η διάταξη A²/O είναι η πιο εύκολη, καθώς είναι μια ελαφρά τροποποιημένη μορφή της κλασικής διεργασίας A/O. Η διαφορά έγκειται στην προσθήκη απλώς μιας ανοξικής δεξαμενής (υδραυλικός χρόνος παραμονής 1h), η οποία δέχεται την ανακυκλωμένη λάσπη από τον δευτερεύοντα καθιζητή, για απονιτροποίηση. [1], [18]



Σχήμα 5: Διεργασία A2/O.

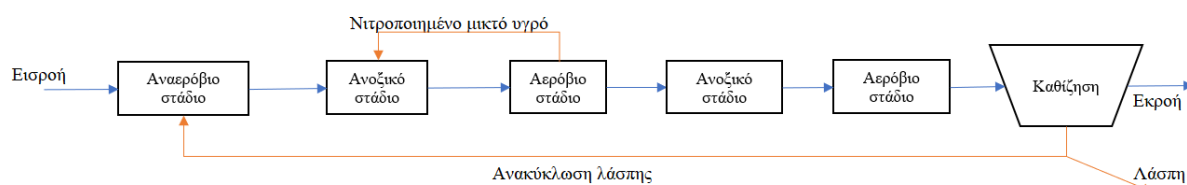
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα 5, δεν υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο στην δεξαμενή ανοξικών συνθηκών, αλλά μόνο νιτρικά ή και νιτρώδη, τα οποία εισέρχονται σε αυτή από την ανακυκλοφορία ανάμικτου υγρού με αφετηρία την έξοδο της αερόβιας δεξαμενής. Το σύστημα αυτό πετυχαίνει συγκέντρωση φωσφόρου στην έξοδο μικρότερη από 2mg/L. Ωστόσο, θεωρείται ανέφικτη η πλήρης απομάκρυνση του αζώτου. Βελτίωση της απομάκρυνσης του αζώτου αποτελεί η αύξηση του ρυθμού ανακυκλοφορίας μίκτου υγρού (νιτρικών). Μια τέτοια ενέργεια όμως θα απαιτούσε μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση και μεγάλη ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου που θα πρέπει να επιστρέψει από το αερόβιο στάδιο, γι' αυτό και αποφεύγεται. [19]

Ένα μειονέκτημα της διαμόρφωσης A²/O είναι ο περιορισμός της αερόβιας πρόσληψης P. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να επέλθει με το NO₃⁻ που περιέχεται στη λάσπη

ανακύκλωσης και χρησιμοποιείται απονιτροποιώντας βακτήρια για να οξειδώσει μέρος του COD που προορίζεται για τη σύνθεση ΡΗΑ και γλυκογόνου. Επομένως, θα πρέπει να προτιμάται μια εναλλακτική διαμόρφωση που να αποφεύγει τη μόλυνση με NO_3^- της αναερόβιας διεργασίας. [18]

3.3.2 Σύστημα Bardenpho 5 σταδίων.

Το σύστημα Bardenpho μπορεί και ξεπερνά το μειονέκτημα της διεργασίας A^2/O που αναφέρθηκε προηγουμένως. Αυτό επιτυγχάνεται, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6 με την προσθήκη δύο περαιτέρω σταδίων (ανοξικό και αερόβιο, αντίστοιχα) κατάντη του αερόβιου σταδίου. Συγκεκριμένα, το νέο ανοξικό στάδιο στοχεύει στην περαιτέρω μείωση της συγκέντρωσης NO_3^- από την προηγούμενη αερόβια δεξαμενή χρησιμοποιώντας ενδογενή άνθρακα. Στη συνέχεια, το τελικό αερόβιο στάδιο είναι χρήσιμο για την ελαχιστοποίηση της απελευθέρωσης φωσφορικών αλάτων στους δευτερεύοντες διαυγαστές και για την απομάκρυνση του παγιδευμένου στις βιοκροκίδες αερίου αζώτου. Συγκεντρώσεις εκροής $\text{PO}_4^{3-}\text{-P} < 0,5 \text{ mg/L}$ και αποδόσεις απομάκρυνσης $\text{P} > 95\%$ έχουν αναφερθεί σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων πλήρους κλίμακας που έχει διαμορφωθεί με διαδικασία Bardenpho 5 σταδίων και επεξεργασία λυμάτων που περιέχει 240–360 mg BOD5/L και 10 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P/L}$. [18], [1]

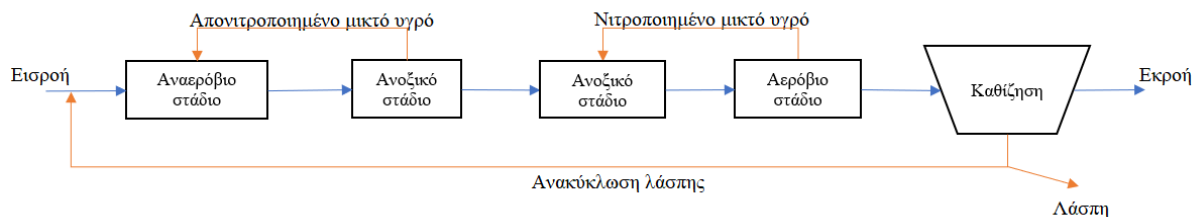


Σχήμα 6: Σύστημα Bardenpho 5 σταδίων.

3.3.3 Διεργασία UCT.

Το σχέδιο που προτείνεται από το Πανεπιστήμιο του Cape Town, δηλαδή η διαδικασία UCT, είναι μια άλλη στρατηγική για να ξεπεραστούν οι υψηλές συγκεντρώσεις NO_3^- στην αναερόβια δεξαμενή με ανακύκλωση ιλύος στο ανοξικό στάδιο και μικτό υγρό από την ανοξική στην αναερόβια λεκάνη. Με αυτόν τον τρόπο, το NO_3^- μειώνεται κυρίως υπό ανοξικές συνθήκες πριν εισέλθει στην αναερόβια λεκάνη. (Σχήμα 7)

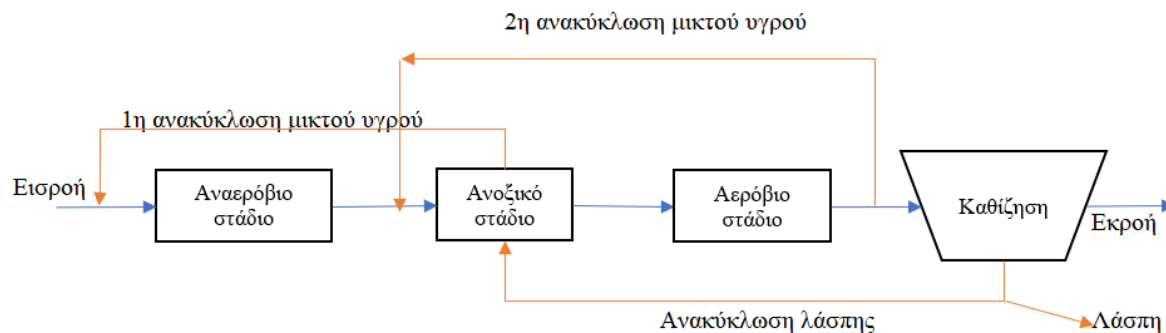
Αξίζει να αναφερθεί και μια τροποποιημένη μορφή της διεργασίας UCT για περαιτέρω βελτιστοποίησή της. Σε αυτήν την τροποποιημένη διεργασία διαιρείται η ανοξική λεκάνη σε δύο διαμερίσματα: το πρώτο, το οποίο ανακυκλώνει το υγρό στην αναερόβια λεκάνη, δέχεται μόνο λάσπη ανακύκλωσης (η οποία έχει περιορισμένα επίπεδα NO_3^-), περιορίζοντας περαιτέρω τη συγκέντρωση NO_3^- στο ρεύμα που τροφοδοτεί το αναερόβια βακτήρια, ενώ το άλλο λαμβάνει το νιτροποιημένο υγρό από την αερόβια φάση. [18]



Σχήμα 7: Διεργασία UCT.

3.3.4 Διεργασία VIP.

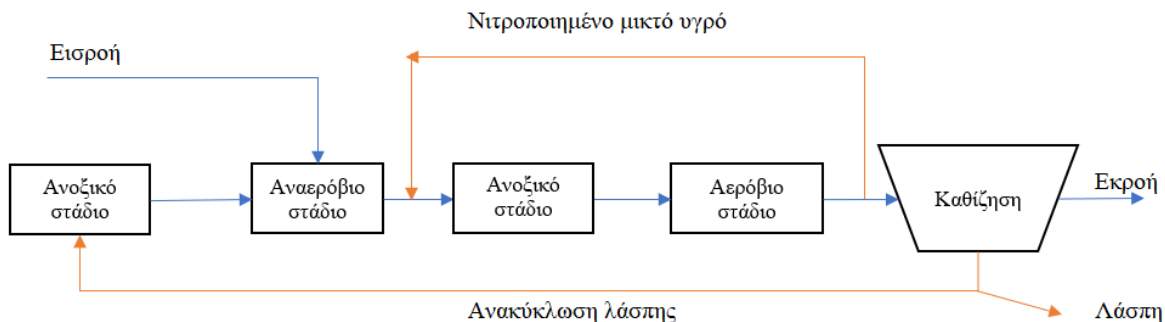
Στη διεργασία VIP, υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις από τις A^2/O και UCT, όπως είναι ορατό και στο σχήμα 8. Οι διαφορές αυτές είναι στην ανακυκλοφορία λύσος η οποία επιστρέφει στο (πρώτο και μοναδικό) ανοξικό στάδιο. Μαζί με αυτή διαφέρει και η δεύτερη ανακυκλοφορία μικτού υγρού από την έξοδο του αερόβιου σταδίου. Επίσης, υπάρχει και μια πρώτη ανακυκλοφορία μικτού υγρού που ξεκινά από το ανοξικό στάδιο και καταλήγει στην είσοδο της διεργασίας. [1]



Σχήμα 8: Διεργασία VIP.

3.3.5 Σύστημα Johannesburg.

Μια εναλλακτική λύση είναι η διαδικασία του Johannesburg, κατά την οποία συναντάται απονιτροποίηση σε μια ανοξική δεξαμενή πριν ανακυκλωθεί στην αναερόβια λεκάνη.



Σχήμα 9: Σύστημα Johannesburg. [18]

3.4 Αφαίρεση θρεπτικών συστατικών με Τεχνολογία τύπου Διαλείποντος Έργου με Περιοδική Λειτουργία (Sequencing Batch Reactor/ SBR).

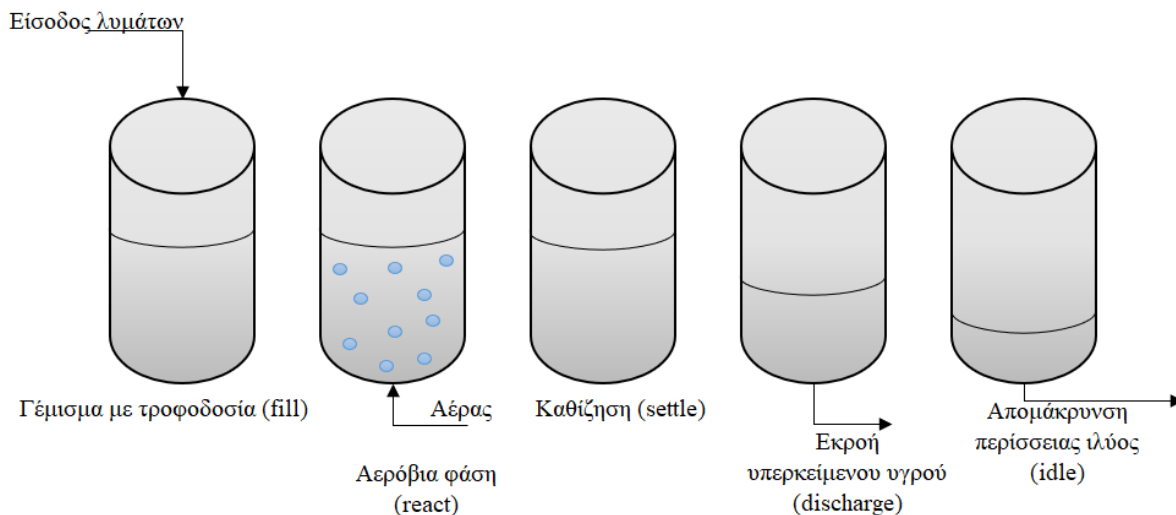
Ο όρος SBR αναφέρεται στα συστήματα με βάση την ενεργό ιλύ τα οποία επεξεργάζονται υγρά απόβλητα και λειτουργούν σε κύκλους γεμίσματος – αδειάσματος (fill – draw cycles). Η ενεργός ιλύς απορροφά τα διαλυμένα και αιωρούμενα οργανικά (και ανόργανα) στερεά, τα οποία υπόκεινται βιολογική οξείδωση. Με τον αντιδραστήρα SBR και τον κατάλληλο τρόπο λειτουργίας, με ή χωρίς την προσθήκη χημικών του, επιτυγχάνεται η επιθυμητή αφαίρεση θρεπτικών συστατικών οργανικών, φωσφόρου και αζώτου. Η λειτουργία βασίζεται σε διεργασία που επεξηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο 3.3.

Σύμφωνα και με την παραπάνω παράγραφο 2.3.4, η διαφορά του SBR με τα συμβατικά συστήματα ενεργούς ιλύος είναι ότι όλες οι διεργασίες (αερισμός και καθίζηση) λαμβάνουν χώρα σε έναν ενιαίο αντιδραστήρα η μια μετά την άλλη σε διαδοχικούς κύκλους, ενώ στα συμβατικά σε γίνονται σε ξεχωριστές δεξαμενές. Περιληπτικά, το απόβλητο που πρόκειται να επεξεργαστεί τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα, υφίσταται διάφορες επεξεργασίες στον ίδιο αντιδραστήρα, ενώ διαφορετικά στάδια λειτουργίας διαδέχονται η μία την άλλη σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, με τον ρύπο να απομακρύνεται βαθμιαία.

Ειδικότερα, το σύστημα του SBR απαρτίζεται από πέντε (5) βασικά στάδια. Αρχικά, πραγματοποιείται η πλήρωση (γεμίσμα – fill) του δοχείου, όπου τροφοδοτείται ο αντιδραστήρας με υγρό απόβλητο. Το γέμισμα αυτό μπορεί να συμβαίνει σε σύντομο χρονικό διάστημα, αυτό προσδίδει υψηλό (στιγμιαίο) συντελεστή οργανικής φόρτισης στο σύστημα καθιστώντας το ανάλογο με ένα συνεχές σύστημα με δοχεία εν σειρά. Πιο αναλυτικά, η βιομάζα εκτίθεται αρχικά σε υψηλή συγκέντρωση οργανικής ύλης, αλλά η συγκέντρωση αυτή μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Αντιστρόφως, σε περίπτωση μεγάλης φάσης γεμίσματος, ο στιγμιαίος συντελεστής οργανικής φόρτισης της διεργασίας είναι μικρός και το σύστημα παρομοιάζεται με αυτό της 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, ακολουθούν, ανάλογα την εκάστοτε λειτουργία, δύο ή περισσότερα εναλλασσόμενα αναερόβια /ανοξικά /αερόβια στάδια. Με την ακολουθία του σταδίου αερισμού (aeration – react), 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). Στην καθίζηση η λάσπη, αποτελούμενη κυρίως από τους μικροοργανισμούς που έχουν τραφεί με τις οργανικές ουσίες των λυμάτων, αρχίζει να κατακάθεται. Έπειτα, τελευταία ακολουθούν τα στάδια του αδειάσματος (discharge), δηλαδή η απόρριψη όλων των επεξεργασμένων λυμάτων και αυτού όπου ένα μικρό μέρος της λάσπης, η οποία είναι πλούσια σε μικροοργανισμούς, απομακρύνεται από τον

αντιδραστήρα (idle). Η διαδικασία αυτή της απόρριψης, συμβάλλει 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. [20]



Σχήμα 10: Φάσεις λειτουργίας του αντιδραστήρα SBR.

Πέρα από το ότι ο SBR αποτελεί μια εναλλακτική, βελτιωμένη τεχνολογία συμβατικής βιολογικής επεξεργασίας, 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.

Προς βελτίωση αυτών των ελλειμμάτων και της απόδοσης 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 (Membrane Bioreactor), εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για σχηματισμό κροκίδων (bioflocs). Μέχρι σήμερα, η τεχνολογία αυτή έχει αξιοποιηθεί για την επεξεργασία διαφόρων τύπων λυμάτων και επιδεικνύει καλή απόδοση ως προς την απομάκρυνση της οργανικής ύλης και τον βιολογικό διαχωρισμό της λάσπης. [20]

4. Πειραματικό Μέρος

4.1 Αναλυτικές Μέθοδοι.

Κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μια σειρά αναλυτικών τεχνικών. Σκοπός τους ήταν ο πλήρης χαρακτηρισμός της τροφοδοσίας, ο έλεγχος της λειτουργίας και της αποδοτικότητας του αντιδραστήρα SBR, σε δείγματα από διαφορετικές φάσεις και χρόνους λειτουργίας του αντιδραστήρα. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται 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 διαφόρων δειγμάτων πραγματοποιείται με την χρήση συσκευής pH-μέτρου. Συγκεκριμένα το ηλεκτρόδιο της συσκευής εμβαπτίζεται στο δείγμα και καταγράφεται η ένδειξη τιμής στην οποία σταθεροποιείται το όργανο μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα.

Της διαδικασίας αυτής προηγείται η βαθμονόμηση της συσκευής, με πρότυπα διαλύματα που έχουν pH όξινο ($\text{pH} = 4$), ουδέτερο ($\text{pH} = 7$) και βασικό ($\text{pH} = 10$). Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είναι ένα φορητό βαθμονομημένο ηλεκτρονικό pH-μετρο τύπου inoLab WTWseriesPHS - 3DMeter.



Εικόνα 6: Εργαστηριακό pH-μετρο.

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 αναφέρεται 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. Πιθανή συνεισφορά σε αυτό έχουν και ενώσεις όπως τα βορικά, πυριτικά και φωσφορικά άλατα.

Η μέτρηση της αλκαλικότητας, γίνεται με τιτλοδότηση γνωστής ποσότητας δείγματος με όγκο 10mL, με πρότυπο διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4) 0,1N, υπό συνεχή ανάδευση pH-μέτρου, το οποίο παραμένει εμβαπτισμένο στο δείγμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Η προσθήκη προτύπου γίνεται μέχρι το ισοδύναμο σημείο λάβει την τιμή 4,5. Έτσι, καταγράφεται η ποσότητα του πρότυπου διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε σε mL. Η τιμή της ολικής αλκαλικότητας (εκφρασμένη σε mg CaCO_3/L) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\text{Ολική αλκαλικότητα} = \frac{A}{V} \cdot N \cdot 5000$$

Όπου:

A: τα mL του προτύπου διαλύματος οξέος που χρησιμοποιήθηκαν στην τιτλοδότηση,

V: ο όγκος του δείγματος σε mL,

N: η κανονικότητα (Normality) του προτύπου διαλύματος του οξέος.

Πέρα από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να ακολουθηθεί και ο τύπος:

$$\text{Ολική αλκαλικότητα} = \frac{A}{V} \cdot t \cdot 1000$$

Όπου A, V όμοια με πριν και t είναι η συγκέντρωση του οξέος που προκύπτει από την τιτλοδότηση σε mg CaCO_3/L .

Τέλος, το pH του τελικού σημείου που προκύπτει αναγράφεται ως εξής: «Η αλκαλικότητα σε pH _____ = _____ mg CaCO_3/L ». Με τον υπολογισμό του 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) είναι τα μη διηθούμενα στερεά. Ο προσδιορισμός τους γίνεται με την λήψη γνωστής ποσότητας όγκου δείγματος (10mL), αφού έχει αναμειχθεί επαρκώς. Τα 10 mL δείγματος διηθούνται σε προζυγισμένο φίλτρο που είχε τοποθετηθεί σε πυραντήριο για διάρκεια περίπου 15min και παρέμεινε 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.

Συγκεκριμένα ο υπολογισμός γίνεται βάσει του τύπου:

$$\text{TSS (mg/mL ή g/L)} = \frac{A-B}{V} \cdot 1000$$

Όπου:

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

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

V: ο όγκος του δείγματος (σε mL).



Εικόνα 7: Πυραντήριο 105 οC.



Εικόνα 8: Ξηραντήρας για την παραμονή των φίλτρων προς ζύγιση.



Εικόνα 9: Αναλυτικός ζυγός ακριβείας τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων (g) για ζύγιση των φίλτρων.

Τα Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (Volatile Suspended Solids, VSS) αποτελούν το κλάσμα των ολικών αιωρούμενων στερεών, το οποίο αναφλέγεται στους 550 °C. Ο προσδιορισμός τους ακολουθεί την προηγούμενη διαδικασία. Πιο αναλυτικά, το φίλτρο στο οποίο έχουν κατακρατηθεί προηγουμένως τα TSS, πυρακτώνεται μέχρι σταθερού βάρους για 15min περίπου σε φούρνο στους 550°C και όπως πριν παραμένει στον ξηραντήρα μέχρι να κρυώσει. Έτσι, το βάρος του φίλτρου μειώνεται εν αντιστοιχία με τα υπάρχοντα VSS.

Ο υπολογισμός ακολουθεί την εξίσωση:

$$\text{VSS (g/L)} = \frac{A-C}{V} \cdot 1000$$

Όπου A, V όμοια με πριν και C τα mg του αρχικού / προζυγισμένου φίλτρου μαζί με το υπόλειμμα από τους 550°C.



Εικόνα 10: Πυραντήριο 550 οC.

4.1.4 Προσδιορισμός ολικών και πτητικών στερεών.

Για τα Ολικά Στερεά (Total Solids, TS) λαμβάνεται καλά αναμειγμένη ποσότητα δείγματος όγκου 20mL και μεταφέρεται σε προζυγισμένη κάψα. Η κάψα ξηραίνεται και εξατμίζεται μέχρι σταθερού βάρους σε φούρνο στους 103 - 105°C σχεδόν για 12h και κατόπιν αφήνεται μέχρι να κρυώσει εντός ξηραντήρα (15min). Η αύξηση του βάρους της κάψας σε σχέση με πριν που ήταν άδεια αντιπροσωπεύει τα TS. Ο υπολογισμός τους πραγματοποιείται ως εξής:

$$TS (g/L) = \frac{A-B}{V} \cdot 1000$$

Όπου:

A: το αρχικό/ προζυγισμένο βάρος της κάψας με 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).

Όσον αφορά τα Πτητικά Στερεά (Volatile Solids, VS), το αποξηραμένο υπόλειμμα μαζί με την κάψα από την προηγούμενη μέθοδο με τα 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 (15min). Το βάρος που χάνεται κατά την ανάφλεξη είναι τα VS και τα υπόλοιπα στερεά αντιπροσωπεύουν τα Μη Πτητικά Στερεά (Fixed Solids, FS).

$$VS (g/L) = \frac{A-C}{V} \cdot 1000$$

Όπου A, V ίδια με πριν και C είναι το αρχικό βάρος της κάψας μαζί με το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 550 °C (σε mg), δηλαδή μετά την ανάφλεξη.

Ο προσδιορισμός αυτός χρησιμεύει στον έλεγχο της λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων, επειδή προσφέρει μια ποσοτική προσέγγιση της οργανικής ύλης που εμπεριέχεται στο στερεό κλάσμα των λυμάτων, της ενεργού ιλύος και των βιομηχανικών αποβλήτων.

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

Με τον προσδιορισμό του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD) πραγματοποιείται μέτρηση της οργανικής ισχύος και αντιστοιχεί στη συνολική ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξείδωση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η αντίδραση πραγματοποιείται σε όξινο περιβάλλον έχοντας ως ισχυρό οξειδωτικό μέσο περίσσεια διχρωμικού καλίου ($K_2Cr_2O_7$) και με θέρμανση σε ειδικό φούρνο (Hatch COD Reactor) σε θερμοκρασίες $150\text{ }^\circ\text{C}$ για 2 ώρες.

Πιο αναλυτικά, ως καταλύτης για την οξείδωση των οργανικών ενώσεων, χρησιμοποιείται πυκνό θειικό οξύ (H_2SO_4). Σε ειδικά φιαλίδια μεταφέρονται με σιφόνι 2,8 mL καταλύτη H_2SO_4 , 1,2 mL οξειδωτικού $K_2Cr_2O_7$ και 2mL δείγματος ή απιονισμένου νερού για την μέτρηση του τυφλού διαλύματος (blank). Επειδή πρόκειται για μια γρήγορη και έντονα εξώθερμη αντίδραση, τα αντιδραστήρια αυτά προστίθενται με προσοχή δημιουργώντας τρεις στρώσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η έναρξη της αντίδρασης, η οποία πραγματοποιείται με ανάδευση όταν τα φιαλίδια τοποθετούνται στον ειδικό φούρνο (εικόνα 11).



Εικόνα 11: Ειδικός φούρνος ($150\text{ }^\circ\text{C}$) για την εξώθερμη αντίδραση μέτρησης COD.

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 sCOD 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.



Εικόνα 12: Εργαστηριακό φωτόμετρο για την μέτρηση της απορρόφησης.

4.1.6 Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN).

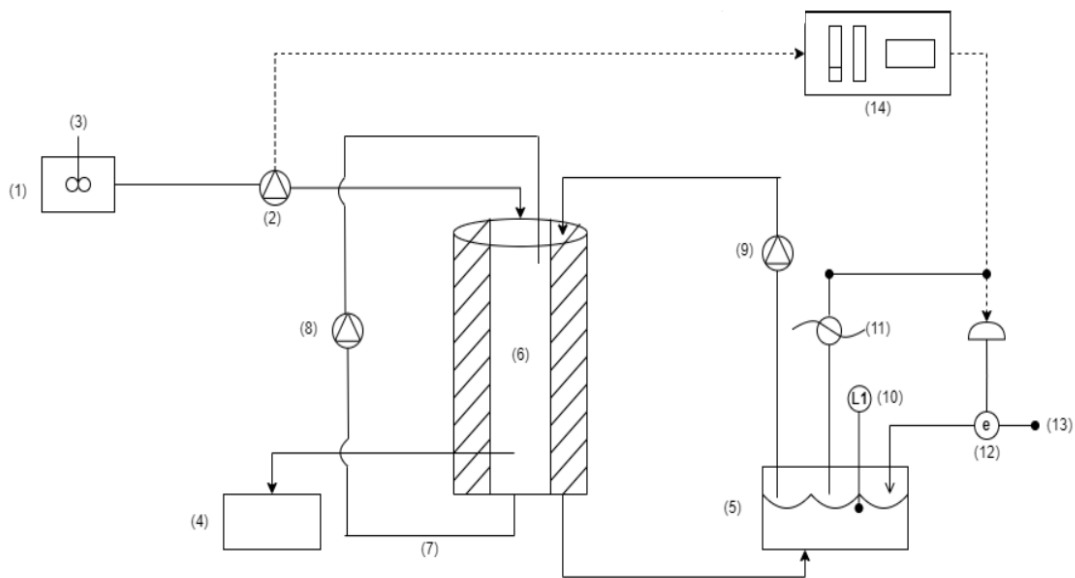
Ο ποσοτικός προσδιορισμός του Ολικού Αζώτου (Total Nitrogen, TN) πραγματοποιείται σε κάθε δείγμα, αφού περάσει από διήθηση και ληφθεί το διήθημά του, με τη βοήθεια της αναλυτικής συσκευής μέτρησης (SHIMADZU TOC-L).

4.2 Πειραματική Διάταξη.

Η πειραματική διάταξη του αντιδραστήρα SBR αποτελείται από τα εξής (βλ. σχήμα 11):

- 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), στο οποίο γίνεται 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 τις ρυθμίσεις αυτοματισμού και ενώνεται νοητά με ολόκληρο το σύστημα (14),
- Λοιπός ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (βάνες, όργανα μέτρησης κ.ά.)



Σχήμα 10: 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.



Εικόνα 13: Εργαστηριακός αντιδραστήρας SBR.

4.3 Πειραματική Διεργασία.

Στα παρακάτω πειράματα της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένας αντιδραστήρας SBR 15L. Σε κάθε πειραματικό κύκλο τροφοδοτούταν με ποσότητα αποβλήτου ίσου όγκου με τα $\frac{2}{3}$ του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα. Ίση ποσότητα αφαιρούταν στην εκροή του. Το υπόλοιπο $\frac{1}{3}$ του ενεργού όγκου το καταλάμβανε η ενεργός ιλύς, η οποία παρέμενε στον αντιδραστήρα καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τέσσερις (4) πειραματικές φάσεις λειτουργίας του αντιδραστήρα. Σε όλες αυτές τις φάσεις η τροφοδοσία αποτελείται από συνθετικό υγρό απόβλητο, που παρασκευαζόταν στο εργαστήριο και προσομοίαζε τα αστικά λύματα ως προς την σύστασή τους. Η σύσταση του συνθετικού υγρού καταγράφεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα 4.

Πίνακας 4: Χημική σύσταση συνθετικού υγρού αποβλήτου τροφοδοσίας.

Χημική ένωση	Συγκέντρωση (mg/L)
Γλυκόζη, C ₆ H ₁₂ O ₆	700
Ουρία, CH ₄ N ₂ O	100
Φωσφορικό κάλιο, KH ₂ PO ₄	44
Διττανθρακικό νάτριο (σόδα), NaHCO ₃	125
Θειικό μαγνήσιο (ένυδρο), MgSO ₄ ·7H ₂ O	27,5
Χλωριούχο ασβέστιο, CaCl ₂	2,5
Χλωριούχο κάλιο, KCl	4
Trace element solution*	1 (mL/L)

Πίνακας 5: Χημική σύσταση διαλύματος ιχνηθέτη (trace element solution*).

Χημική ένωση	Συγκέντρωση (mg/L)
Βορικό οξύ, H ₃ BO ₃	187,5
Χλωριούχος σίδηρος (ένυδρος), FeCl ₃ ·6H ₂ O	1875
Θειικός χαλκός (ένυδρος), CuSO ₄ ·5H ₂ O	37,5
Ιωδιούχο κάλιο, KI	225
Θειικό μαγγάνιο, MnSO ₄	150
Θειικός ψευδάργυρος (ένυδρος), ZnSO ₄ ·7H ₂ O	150
EDTA	12500

Κατά την πρώτη φάση λειτουργίας, επιλέχθηκε κύκλος με διάρκεια οχτώ (8) ωρών, ενώ στις επόμενες φάσεις το στάδιο του αερισμού και άρα συνολικά ο χρόνος του κύκλου μειωνόταν ανά μια ώρα. Η μείωση αυτή έφτασε έως και 1 ώρα αερισμού. Ωστόσο, ο χρόνος της τροφοδοσίας, της καθίζησης και της εκροής παρέμειναν ίδιοι, καθώς και η ποιοτική σύσταση της τροφοδοσίας, σε όλες τις φάσεις του πειράματος. Καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους 35°C. Αναλυτικά οι χρόνοι των επιμέρους σταδίων σε κάθε κύκλο των διαφορετικών πειραματικών φάσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 6.

Πίνακας 6: Χρόνοι καθενός σταδίου σε έναν πλήρη κύκλο SBR για καθεμία από τις πειραματικές φάσεις.

Πειραματική φάση	Τροφοδοσία (h)	Αερισμός (h)	Καθίζηση (h)	Εκροή (h)	Συνολικός χρόνος κύκλου (h)
1 ^η	0,5	4	3	0,5	8
2 ^η	0,5	3	3	0,5	7
3 ^η	0,5	2	3	0,5	6
4 ^η	0,5	1	3	0,5	5

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε έναν κύκλο αντιδραστήρα SBR, όπως αναφέρεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το στάδιο του αδειάσματος του υπερκείμενου υγρού από τον αντιδραστήρα (discharge) και εκείνο της απομάκρυνσης περισσειας ιλύος (idle) είναι δύο διακριτά στάδια. Ωστόσο, στο παρόν πείραμα πραγματοποιούνται ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω της απουσίας στερεών στο συνθετικό απόβλητο και της χαμηλής συγκέντρωσης στερεών στην εκροή του αναερόβιου αντιδραστήρα που έχει ως αποτέλεσμα να μην παράγεται σημαντική ποσότητα περισσειας ιλύος. Ειδικότερα, όπως θα αναφερθεί αναλυτικά παρακάτω, δεν υπήρξε ανοξικό στάδιο στο σύστημα του πειράματος, με τα αποτελέσματα να μαρτυρούν ότι όντως για ορισμένες από τις φάσεις δεν ήταν απαραίτητο.

5. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.

5.1 Χαρακτηρισμός Τροφοδοσίας.

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 4.3 της Πειραματικής Διεργασίας, στις πειραματικές φάσεις, το απόβλητο που χρησιμοποιείται είναι συνθετικό, για λόγους προσομοίωσης. Επομένως, βάσει των συστατικών που χρησιμοποιούνται στην τροφοδοσία, τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS) καθώς και τα Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS) θεωρούνται εξ αρχής πως είναι μηδενικά.

Πίνακας 7: Μέσες τιμές για pH, αλκαλικότητα, Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (CODin) και Ολικό Άζωτο (TNin) στην τροφοδοσία του SBR.

Πειραματικές φάσεις	pH	Αλκαλικότητα mgCaCO ₃ /L	CODin mgO ₂ /L	TNin mgN/L
1 ^η φάση	7,28	485,7	606,6	44,2
2 ^η φάση	6,99	448,9	665,7	45,3
3 ^η φάση	7,03	455,0	611,7	42,2
4 ^η φάση	7,05	450	587,7	42,7

Παρατηρείται ότι σε κάθε πειραματική φάση το συνθετικό απόβλητο, που χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία, προσομοιάζει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά υγρού αστικού λύματος μέτριας ισχύος, σύμφωνα και με τον πίνακα 1. Το συγκεκριμένο απόβλητο είναι φανερό πως πρέπει να σταθεροποιηθεί πριν απορριφθεί στο περιβάλλον καθώς τόσο η συγκέντρωση του σε οργανικό φορτίο όσο και η συγκέντρωσή του σε άζωτο είναι υψηλότερες από τα επιτρεπτά περιβαλλοντικά όρια. Συγκεκριμένα, το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) κυμαίνεται μεταξύ του εύρους 500 – 700 mg/L και το Ολικό Άζωτο (TN) μεταξύ 40 – 45 mg/L. Επίσης, το pH λαμβάνει σχεδόν σταθερές τιμές κοντά στο 7, με την αλκαλικότητα, που έχει ανιχνευτικό ρόλο σε πιθανά προβλήματα ελέγχου pH, να βρίσκεται εντός των επιπέδων 450 – 500 mg CaCO₃/L. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην ανωτέρω τροφοδοσία οφείλονται κατά βάση στην ποιότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε,

καθώς αυτό προέρχεται από γεώτρηση με αποτέλεσμα ανά περιόδους οι ενώσεις που χρησιμοποιούνται να παρουσιάζουν χαμηλότερη διαλυτότητα.

5.2 Εκροή.

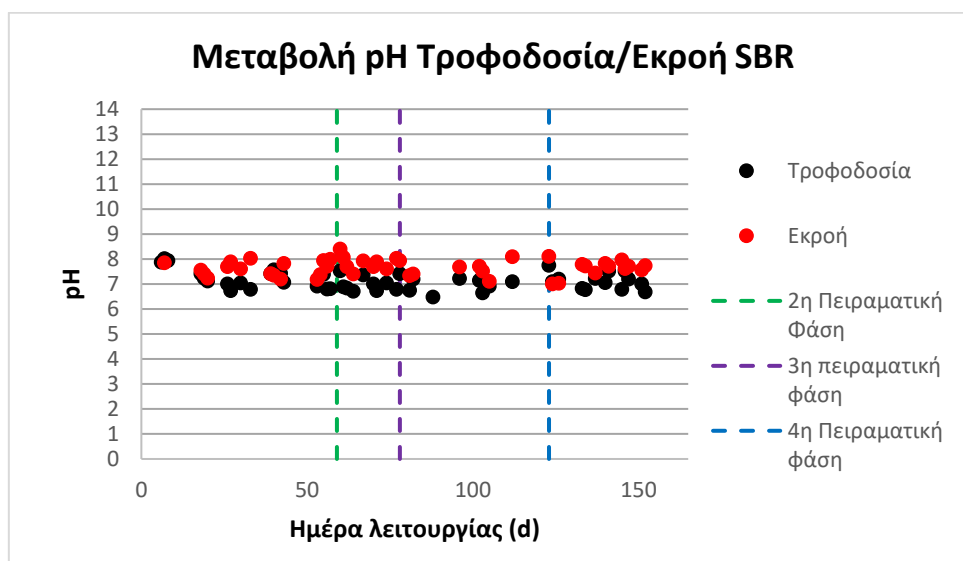
Στον παρακάτω πίνακα 8, αναγράφονται οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών της εκροής του συστήματος SBR. Η εκροή έχει ένα pH σχεδόν ουδέτερο – ελαφρά βασικό με τις τιμές του να είναι εντός του διαστήματος 7,5 – 8. Η αλκαλικότητά της κυμαίνεται από 400 έως 510 mg CaCO₃/L. Επίσης, το υγρό στην εκροή του SBR διατηρεί Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) 20 – 40 mg/L και Ολικό Άζωτο μεταξύ των τιμών 17 – 30 mg/L, ανάλογα την πειραματική φάση.

Πίνακας 8: Μέσες τιμές pH, αλκαλικότητας, Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD) και Ολικού Αζώτου (TN) στην εκροή του SBR.

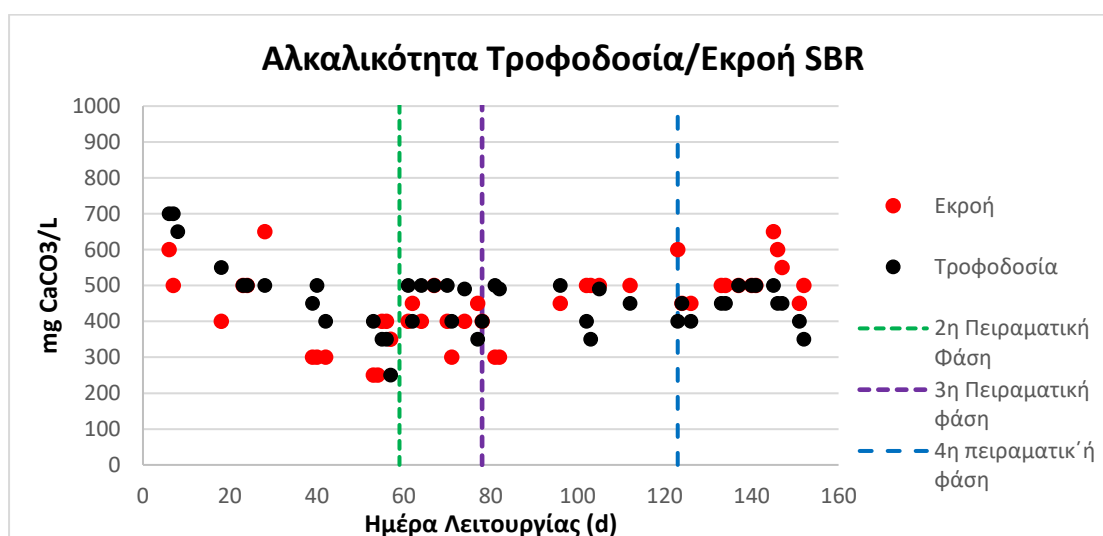
Πειραματικές φάσεις	pH	Αλκαλικότητα mgCaCO ₃ /L	COD mgO ₂ /L	TN mgN/L
1 ^η φάση	7,66	407,1	22,8	17,22
2 ^η φάση	7,81	412,5	19,7	19,56
3 ^η φάση	7,56	456,2	25,9	24,91
4 ^η φάση	7,64	512,5	35,9	27,46

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα 8, ο SBR φαίνεται να παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας. Σε καθεμιά από τις πειραματικές φάσεις, το εύρος της συγκέντρωσης οργανικών που παρουσιάζει η εκροή βρίσκεται κάτω από το περιβαλλοντικό όριο απόρριψης, που είναι 120 mg/L.

Ωστόσο, δεν θα μπορούσε να εξαχθεί το ίδιο συμπέρασμα και για την απομάκρυνση του αζώτου. Στον αντιδραστήρα η απομάκρυνση του αζώτου δεν είναι εφικτή στον απαιτούμενο περιβαλλοντικό βαθμό, σε καμία από τις τέσσερις φάσεις. Συγκεκριμένα, το άζωτο δεν καταφέρνει να μειωθεί κάτω του ορίου 14 mg/L, ώστε να μπορεί να απορριφθεί σε κάποιο υδάτινο αποδέκτη. Για το γεγονός αυτό, ευθύνεται η απουσία του ανοξικού σταδίου στον κύκλο λειτουργίας του SBR, κατά το οποίο πραγματοποιείται κατανάλωση του οργανικού και αμμωνιακού αζώτου. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη ανοξικού σταδίου σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η περαιτέρω μείωση του αζώτου.

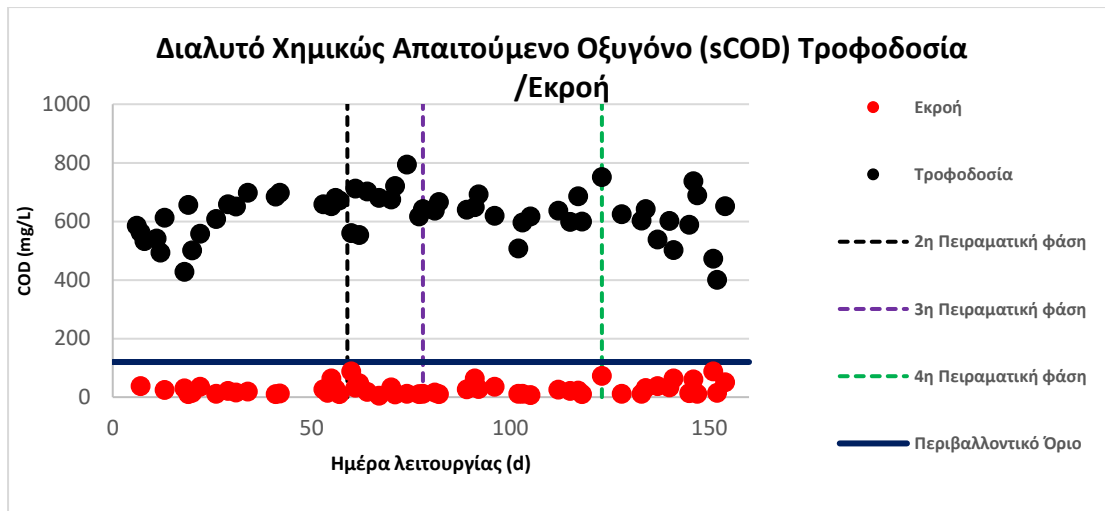


Εικόνα 14: Διάγραμμα τιμών pH και μεταβολής του από τροφοδοσία σε εκροή για κάθε πειραματική φάση.



Εικόνα 15: Διάγραμμα τιμών αλκαλικότητας και μεταβολής της από τροφοδοσία (inlet) σε εκροή (effluent) για κάθε πειραματική φάση.

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.



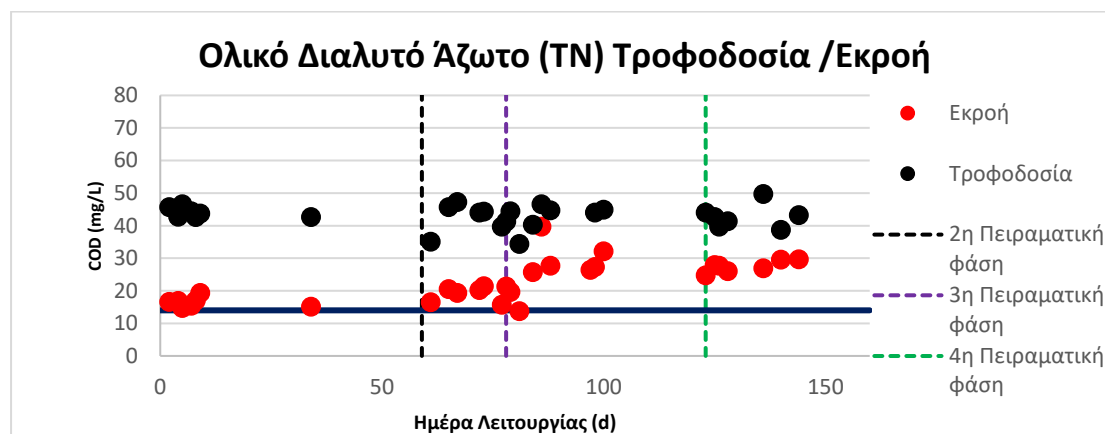
Εικόνα 16: Διάγραμμα τιμών COD σε τροφοδοσία (inlet) και εκροή (effluent) για κάθε πειραματική φάση.

Στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 16), απεικονίζεται και σχηματικά η μείωση της συγκέντρωσης του (διαλυτού) COD από την τροφοδοσία έως και την εκροή του αντιδραστήρα, με αναλυτικές τιμές για κάθε μέρα λειτουργίας και κάθε φάση ξεχωριστά. 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 120 mg/L, με βάση την αντίστοιχη νομοθεσία που παρατέθηκε παραπάνω σε προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο αναλυτικά, στην 1^η φάση για χρόνο αερισμού 1 ώρα επιτυγχάνεται ποσοστό απομάκρυνσης του COD κατά 96%, στην 2^η κατά 97%, στην 3^η 95,7%, ενώ στην 4^η και τελευταία αγγίζει το 94%.

Κάτι επιπλέον που μπορεί να παρατηρηθεί στο ίδιο διάγραμμα, είναι οι διακυμάνσεις των τιμών του COD εισόδου στην τροφοδοσία του SBR. Ένας λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το νερό που χρησιμοποιείται, το οποίο είναι από γεώτρηση και δημιουργεί μια αστάθεια στις τιμές λόγω διαφορών στη διαλυτοποίηση των συστατικών της τροφοδοσίας από παρασκευή σε παρασκευή. Παράλληλα, η τροφοδοσία επηρεάζεται και από τις διεργασίες που συμβαίνουν εντός της παγολεκάνης (δοχείου τροφοδοσίας), όπως, για παράδειγμα, όξυνση.

Όσον αφορά το COD εξόδου στην εκροή γίνεται αντιληπτή μια μικρή αύξηση στις τιμές του τις πρώτες μέρες αλλαγής μιας πειραματικής φάσης. Αυτό έχει ως αιτία την λειτουργική προσαρμογή του συστήματος σε κάθε μετάβαση από μια φάση στην επόμενη, πράγμα αναμενόμενο. Επίσης, είναι εμφανής μια αύξηση στην 4^η, τελευταία πειραματική φάση, σε σχέση με τις προηγούμενες, πράγμα που δηλώνει ότι με 1 ώρα αερισμού καταναλώνεται λιγότερη ποσότητα οργανικού φορτίου, γι' αυτό συναντάται και το μικρότερο ποσοστό απομάκρυνσης. Ωστόσο και πάλι το ποσοστό παραμένει

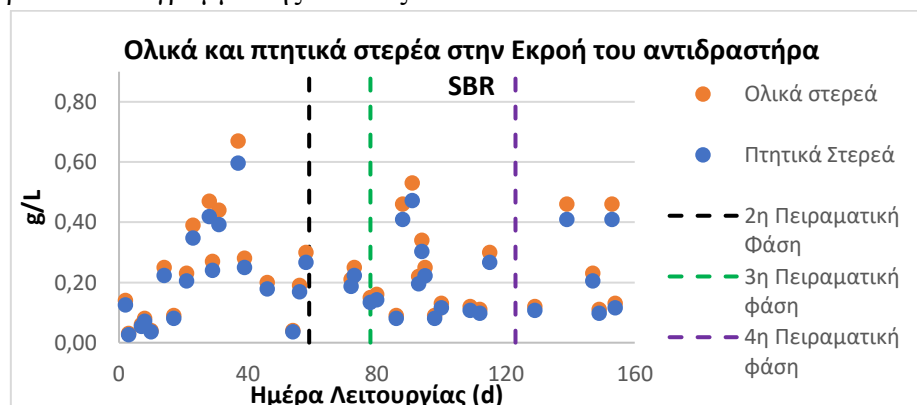
πολύ υψηλό και το σύστημα του SBR αποδοτικό, αφού από άποψη περιβαλλοντικού ορίου σε όλες τις φάσεις η εκροή βρίσκεται εντός προδιαγραφών.



Εικόνα 17: Διάγραμμα τιμών TN σε τροφοδοσία (inlet) και εκροή (effluent) για κάθε πειραματική φάση.

Προχωρώντας στον σχολιασμό των αποτελεσμάτων του ολικού αζώτου, παραπάνω (εικόνα 17) παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές TN εισόδου και εξόδου στην τροφοδοσία και εκροή του SBR ανά ημέρα λειτουργίας, αντίστοιχα, για κάθε μια από τις πειραματικές φάσεις. Αρχικά, όπως μελετάται, η απομάκρυνση αζώτου έχει μειωθεί αισθητά από την 1^η έως την 4^η πειραματική φάση. Πιο συγκεκριμένα, κατά την 1^η φάση, το μέσο ποσοστό απομάκρυνσης υπολογίζεται, από τις μέσες συγκεντρώσεις TN εισόδου – εξόδου (σε τροφοδοσία και εκροή, αντίστοιχα), στα 61% και οι συγκεντρώσεις αυτές προσεγγίζουν πολύ το περιβαλλοντικό όριο, χωρίς όμως να βρίσκονται εντός του. Κατά την 2^η φάση το ποσοστό αγγίζει το 57%, κατά την 3^η φάση το 41%, ενώ στην 4^η το ποσοστό φτάνει μόλις το 37%. Τα ποσοστά αυτά υποδηλώνουν ότι δεν πραγματοποιείται επαρκής απομάκρυνση TN.

Αξίζει να σημειωθεί πως εν αντιθέσει με την σύνθετη τροφοδοσία, που παρασκευάζεται στο εργαστήριο με τρόπο που να θεωρούνται μηδενικά τα αιωρούμενα στερεά, η εκροή του SBR περιέχει κανονικά τόσο ολικά όσο και πτητικά αιωρούμενα στερεά, TSS και VSS αντίστοιχα. Οι τιμές των στερεών της εκροής αναπαρίστανται στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 18.

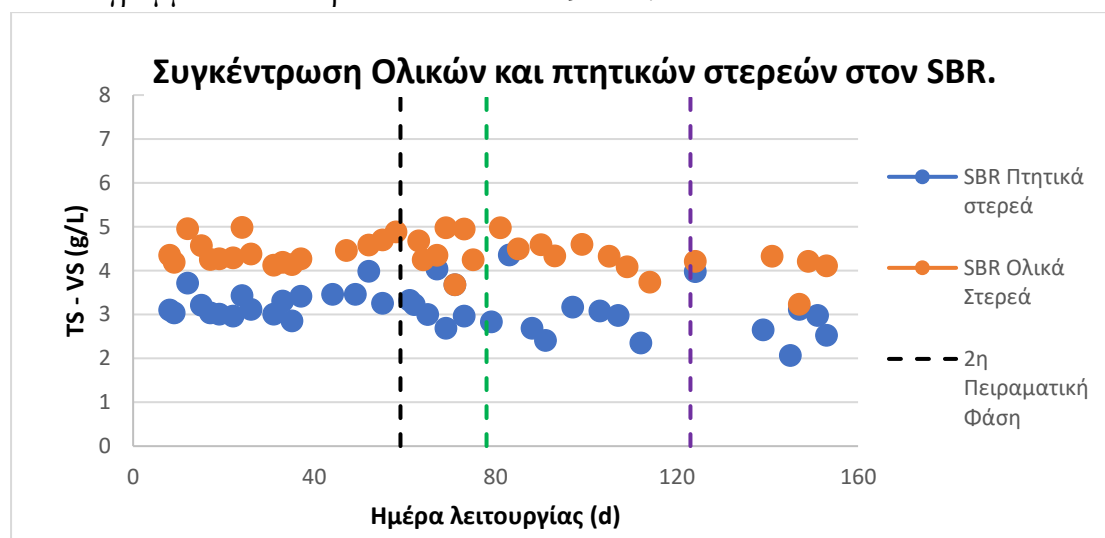


Εικόνα 18: Διάγραμμα τιμών ολικών αιωρούμενων και πτητικών αιωρούμενων στερεών ανά ημέρα λειτουργίας του αντιδραστήρα για κάθε πειραματική φάση.

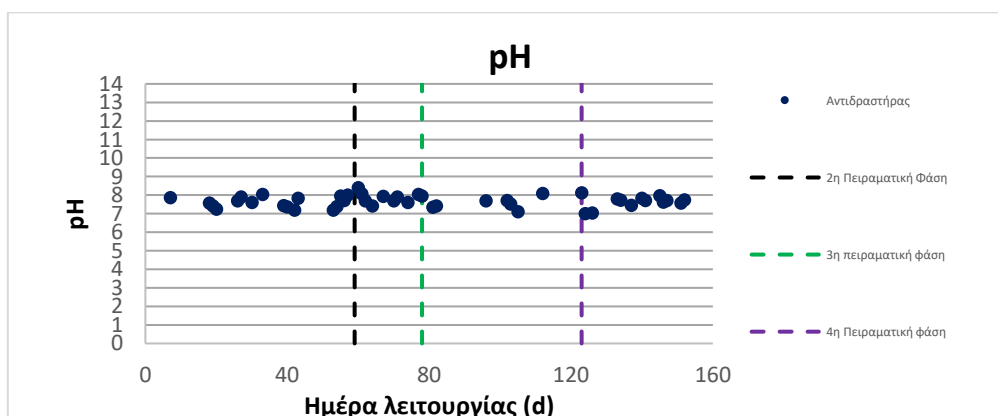
Σύμφωνα με το διάγραμμα των αιωρούμενων στερεών εκροής, παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των τιμών των στερεών κυμαίνεται στο εύρος 0,1 – 0,4 g/L. Η συνολική εικόνα του διαγράμματος μαρτυρά ότι δεν υπάρχει διακύμανση ανάμεσα σε ολικά αιωρούμενα και πτητικά αιωρούμενα στερεά. Αντίθετα, υπάρχει μια «ταύτιση» μετρήσεων με κάθε σχεδόν μέτρηση που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ημέρα λειτουργίας. Συγκεκριμένα, τα ολικά αιωρούμενα ξεπερνούν σε ελάχιστο βαθμό – ταυτίζονται με τα πτητικά αιωρούμενα στερεά. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε όλες τις πειραματικές φάσεις.

5.3 Συνθήκες SBR.

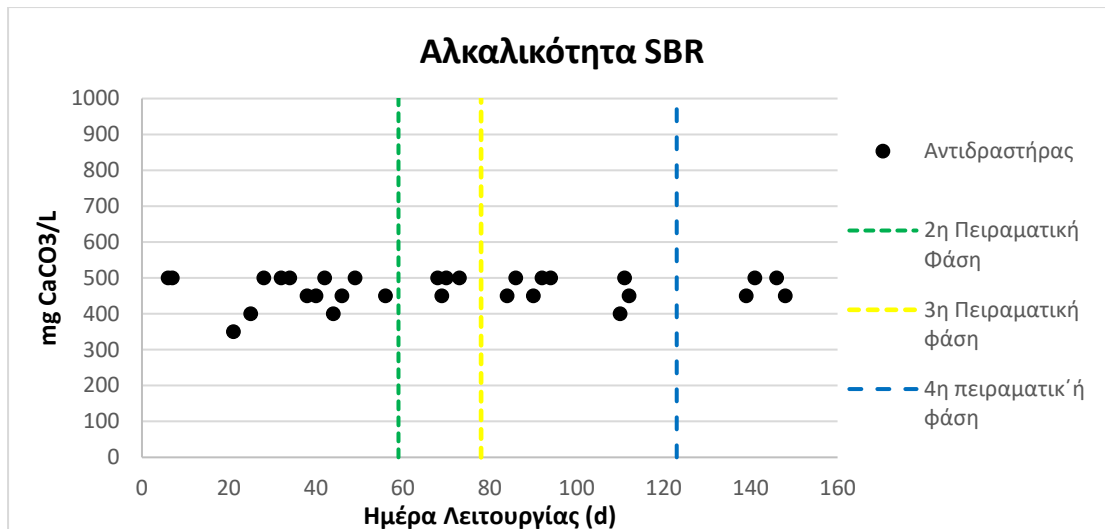
Προκειμένου να χαρακτηριστεί ο αντιδραστήρας SBR, πραγματοποιείται δειγματοληψία κατά τη διάρκεια του αερισμού από την ανακυκλοφορία. Το δείγμα αυτό προβαίνει σε μετρήσεις ολικών και πτητικών στερεών, TS και VS αντίστοιχα, μέτρηση pH και αλκαλικότητας, ώστε να δοθεί μια εικόνα για τις συνθήκες που επικρατούν εντός αντιδραστήρα. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων φαίνονται στα διαγράμματα των παρακάτω εικόνων 19 – 21.



Εικόνα 19: Διάγραμμα τιμών ολικών (TS) και πτητικών στερεών (VS) εντός του αντιδραστήρα SBR ανά ημέρα λειτουργίας.



Εικόνα 20: Διάγραμμα τιμών pH εντός του αντιδραστήρα SBR ανά ημέρα λειτουργίας.



Εικόνα 21: Διάγραμμα τιμών αλκαλικότητας εντός του αντιδραστήρα SBR ανά ημέρα λειτουργίας.

Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας του αντιδραστήρα. Αναλυτικότερα, γίνεται αντιληπτό ότι το φαινόμενο «ταύτιση» των ολικών και πτητικών στερεών που παρατηρείται στην εκροή, επικρατεί σε έναν βαθμό και εντός του αντιδραστήρα. Τα ολικά και τα πτητικά στερεά ακολουθούν την ίδια τάση διαγραμματικά όσον αφορά την πορεία ανά ημέρα, αλλά πλέον τα ολικά είναι με περισσότερη διαφορά μεγαλύτερα από τα πτητικά, σε αντίθεση με την εκροή που πέρα από την τάση ταυτιζόταν σχεδόν και η τιμή τους. Είναι προβλεπόμενο να μην παρουσιάζεται ακριβώς η ίδια εικόνα σε εκροή και στο δείγμα της ανακυκλοφορίας, αφού στο δεύτερο το υγρό βρίσκεται στο στάδιο του αερισμού δημιουργώντας μια συνεχή ανάδευση με την ενεργό ιλύ να είναι διασπαρμένη σε όλη την έκταση του αντιδραστήρα.

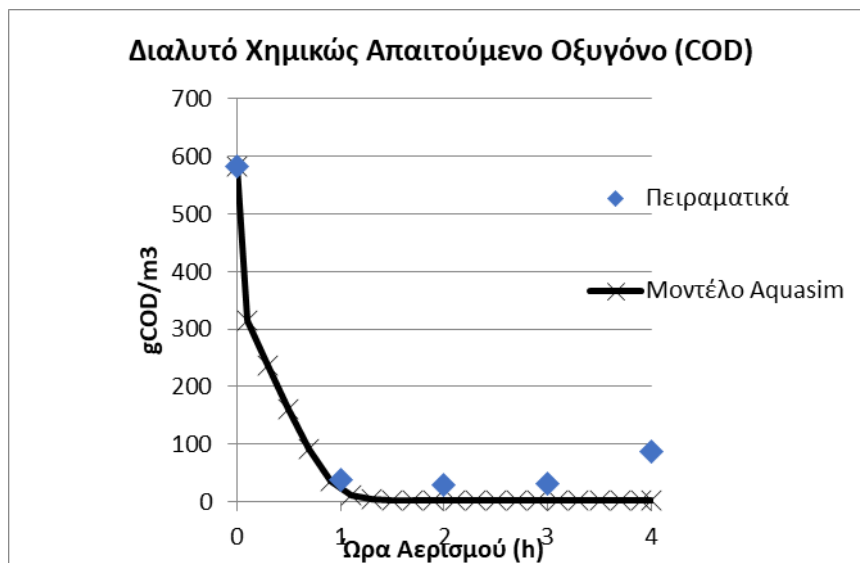
Όσον αφορά το pH του SBR, λαμβάνει τιμές μεταξύ 7 και 8. Αυτές οι τιμές επιβεβαιώνουν τις βιολογικές διεργασίες που προβλέπει το θεωρητικό κινητικό μοντέλο, οι οποίες αναφέρονται σε ένα ουδέτερο – ελαφρά βασικό περιβάλλον. Επίσης, η αλκαλικότητα έχει ανιχνευτικό ρόλο σε πιθανά προβλήματα ελέγχου pH και εντός του αντιδραστήρα φαίνεται να διατηρεί τιμές 400 – 500 mg CaCO₃/L, όμοιες σε γενικά πλαίσια με τις μέσες τιμές σε τροφοδοσία και εκροή.

5.4 Προσομοίωση κινητικής θεωρητικού μοντέλου – AQUASIM.

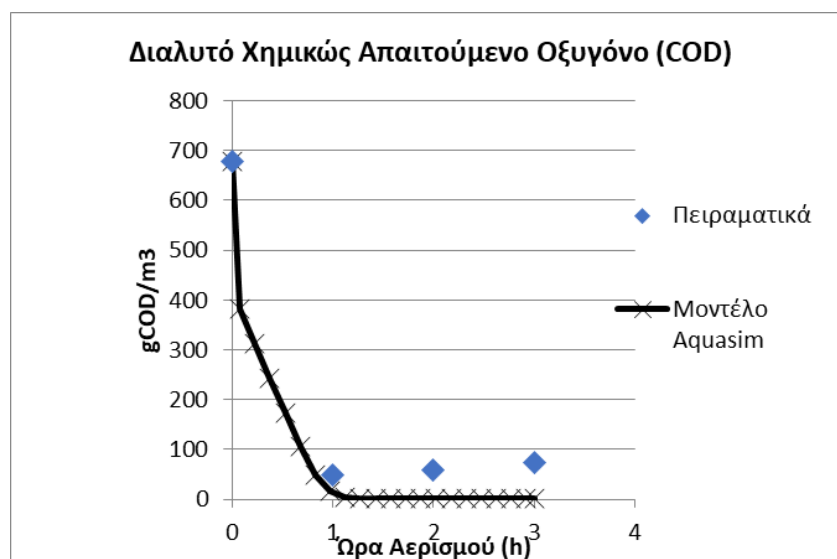
Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται σύγκριση του θεωρητικού κινητικού μοντέλου ενεργούς ιλύος που περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο (2.3.2), με τα πειραματικά αποτελέσματα του εξεταζόμενου συστήματος SBR. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η σύγκριση δημιουργείται στο περιβάλλον του λογισμικού AQUASIM, ένα φύλλο εργασίας που περιέχει όλες τις μεταβλητές του θεωρητικού μοντέλου IAWPRC, όλες τις διεργασίες που λαμβάνουν μέρος δηλαδή την αμμωνιοποίηση, τον αερισμό, την ετερότροφη και αυτότροφη ανάπτυξη και αποσύνθεση των μικροοργανισμών, την υδρόλυση του οργανικού άνθρακα και αζώτου. Στις παραπάνω μεταβλητές εισέρχονται ως δεδομένα εισόδου αυτά των

μετρήσεων της τροφοδοσίας και στις μεταβλητές των σταθερών εισάγονται οι θεωρητικές τιμές του μοντέλου. Έτσι, τρέχοντας το πρόγραμμα εξάγονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που αντιστοιχούν στους υπολογισμούς που προκύπτουν από τους ρυθμούς του θεωρητικού κινητικού μοντέλου.

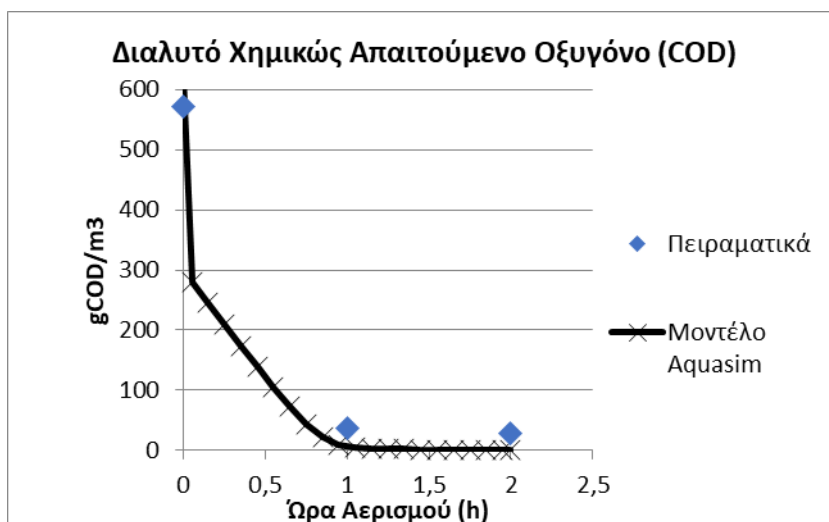
Ακολούθως, τα αριθμητικά αποτελέσματα από το λογισμικό του AQUASIM, καταγράφονται και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά του εργαστηρίου. Η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται για καθεμιά πειραματική φάση, πράγμα που σημαίνει ότι κάθε φορά εισάγονται στο πρόγραμμα διαφορετικά δεδομένα ως προς τις συνθήκες λειτουργίας κάθε φάσης.



Εικόνα 22: Διάγραμμα τιμών COD που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις και από τους υπολογισμούς του λογισμικού AQUASIM ανά ώρα αερίσμου για την 1η φάση λειτουργίας του SBR.



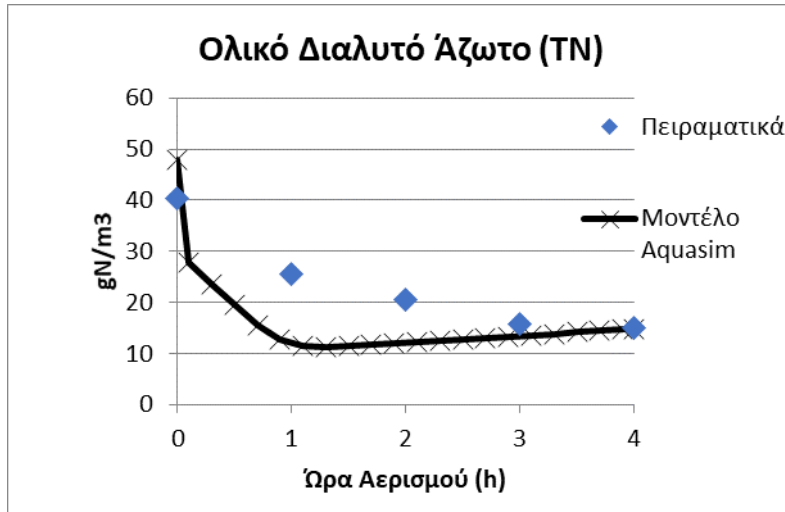
Εικόνα 23: Διάγραμμα τιμών COD που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις και από τους υπολογισμούς του λογισμικού AQUASIM ανά ώρα αερίσμου για την 2η φάση λειτουργίας του SBR.



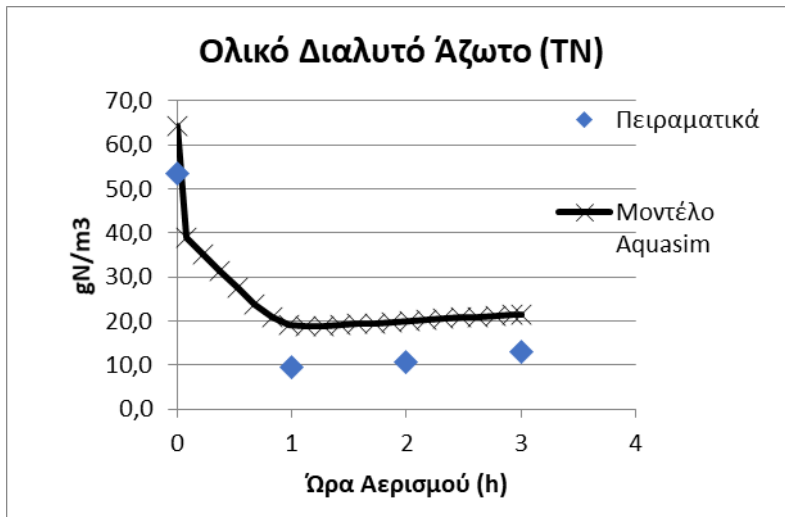
Εικόνα 24: Διάγραμμα τιμών COD που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις και από τους υπολογισμούς του λογισμικού AQUASIM ανά ώρα αερισμού για την 3η φάση λειτουργίας του SBR.

Στις παραπάνω εικόνες 22 – 24 αποτυπώνονται οι τιμές του διαλυτού χημικώς απαιτούμενου οξυγόνου όπως υπολογίζονται από το μοντέλο του AQUASIM, αλλά και από τις πειραματικές μετρήσεις του εργαστηρίου. Αρχικά, παρατηρείται ότι η κύρια κατανάλωση του COD συμβαίνει εντός της 1^{ης} ώρας αερισμού. Αυτός είναι και ο λόγος που οδήγησε στην εξέταση των συγκεκριμένων τεσσάρων φάσεων της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή μέχρι και τη 1 ώρα αερισμού, ώστε να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη μείωση, όπως και έγινε.

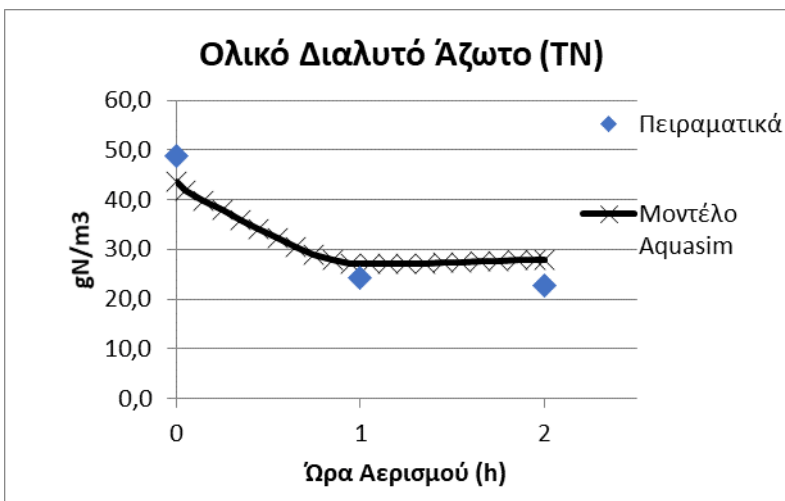
Έπειτα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η προσομοίωση του συστήματος ενεργούς ιλύος του SBR με το μοντέλο IAWPRC είναι η πλέον ικανοποιητική, ως προς την κατανάλωση του COD. Πιο αναλυτικά, στις τρεις πειραματικές φάσεις που μελετώνται οι τιμές που προκύπτουν πειραματικά προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό αυτές του μοντέλου για τους αντίστοιχους χρόνους. Οι τιμές που διαφέρει λίγο το πείραμα από το μοντέλο, είναι οι τελευταίες ώρες αερισμού σε κάθε φάση, κυρίως στην 1^η και την 2^η που το μοντέλο τις υποεκτιμά, ενώ στην 3^η με τις 2 ώρες αερισμού δείχνει να ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα. Αυτό δηλώνει ότι η μέθοδος επεξεργασίας λυμάτων με τον διαλείποντος έργου αντιδραστήρα περιοδικής λειτουργίας SBR, υπακούει στο προβλεπόμενο θεωρητικό κινητικό μοντέλο.



Εικόνα 25: Διάγραμμα τιμών TN που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις και από τους υπολογισμούς του λογισμικού AQUASIM ανά ώρα αερισμού για την 1η φάση λειτουργίας του SBR.



Εικόνα 26: Διάγραμμα τιμών TN που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις και από τους υπολογισμούς του λογισμικού AQUASIM ανά ώρα αερισμού για την 2η φάση λειτουργίας του SBR.



Εικόνα 27: Διάγραμμα τιμών TN που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις και από τους υπολογισμούς του λογισμικού AQUASIM ανά ώρα αερισμού για την 3η φάση λειτουργίας του SBR.

Πέρα από την απομάκρυνση του COD, γίνεται μελέτη για το κατά πόσο το μοντέλο προσομοιάζει το παρόν πείραμα και ως προς την απομάκρυνση του ολικού αζώτου, TN. Στα διαγράμματα των εικόνων 25 – 27 γίνεται σαφές ότι οι πειραματικές τιμές που λαμβάνονται στην περίπτωση του αζώτου δεν επιτυγχάνουν την σχεδόν «ταύτιση» μεταξύ τους όπως στην περίπτωση του COD. Υπάρχει μια απόκλιση τιμών, ιδίως στην 1^η και την 2^η φάση, ενώ η 3^η δηλαδή αυτήν των 2 ωρών αερισμού έχει πολύ ικανοποιητική προσέγγιση τιμών.

Μάλιστα, η 1^η και η 2^η φάση δεν αποκλίνουν με τον ίδιο τρόπο. Συγκεκριμένα, στην 1^η το σύστημα SBR επιτυγχάνει λιγότερη απομάκρυνση TN και με πιο αργό ρυθμό σε αντίθεση με το θεωρητικό μοντέλο, δηλαδή το μοντέλο υποεκτιμά το σύστημα. Στην δε 2^η το μοντέλο το υπερεκτιμά και η μείωση του TN στον SBR φαίνεται να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του μοντέλου IAWPRC με ελάχιστα πιο απότομο ρυθμό. Συνεπώς, ως προς την απομάκρυνση του αζώτου, δεν μπορεί να θεωρηθεί με την ίδια ευκολία της περίπτωσης του COD, πως το σύστημα του αντιδραστήρα SBR που μελετάται πειραματικά ακολουθεί την κινητική του μοντέλου ενεργούς ιλύος κατά IAWPRC.

5.5 Συμπεράσματα.

Η μελέτη του Αντιδραστήρα Διαλείποντος Έργου με Περιοδική Λειτουργία SBR, με τη χρήση συνθετικού αστικού αποβλήτου ως τροφοδοσία, φέρνει στο φως πολλά συμπεράσματα, 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 1η πειραματική φάση (με διάρκεια αερισμού 4 ώρες και συνολική διάρκεια κύκλου 8 ώρες) έως την 4η (με διάρκεια αερισμού 1 ώρα και συνολική διάρκεια κύκλου 5 ώρες). Ακόμα, σε όλες τις πειραματικές φάσεις, ο SBR παρουσίασε ιδανική συμπεριφορά ως προς την κατανάλωση οργανικού φορτίου. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με την απομάκρυνση ολικού αζώτου, η οποία είναι μικρή και εκτός περιβαλλοντικών ορίων, πράγμα που θέτει το απόβλητο ακατάλληλο για την τελική του απόθεση σε υδάτινο αποδέκτη.

Πιο αναλυτικά, και στις τέσσερις (4) πειραματικές φάσεις, το COD στην εκροή μειώθηκε κάτω των 120mg/L (περιβαλλοντικό όριο COD που ορίζει η νομοθεσία), ενώ τα ποσοστά απομάκρυνσής του επιτυγχάνουν τιμές, σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας, άνω του 90% – ποσοστιαίο εύρος απομάκρυνσης 94 – 97%. Από την άλλη, στην απομάκρυνση του ολικού αζώτου τα ποσοστά μείωσης αγγίζουν πολύ χαμηλές τιμές, με το εύρος τους να κυμαίνεται μεταξύ 37 – 61% και το περιβαλλοντικό όριο των 14 mg N/ L να ξεπερνιέται συνεχώς στις πειραματικές μετρήσεις της εκροής του SBR. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το αερόβιο σύστημα ενεργούς ιλύος της παρούσας διπλωματικής αρκεί για τον καθαρισμό του οργανικού φορτίου των

λυμάτων, αλλά υστερεί στην μείωση του ολικού αζώτου, χρίζοντας αναγκαία την προσθήκη ενός ανοξικού σταδίου προκειμένου να καθαρίσει εξ ολοκλήρου η εκροή. Ταυτόχρονα, η αποδοτικότερη κατανάλωση του COD με την μείωση του χρόνου αερισμού από τις τέσσερις (4) ώρες στη μία (1) αποτελεί από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, αφού αποτελεί τρόπο αποτελεσματικής λειτουργίας του συστήματος με λιγότερη δαπάνη ενέργειας.

Παράλληλα, στο σύστημα παρατηρείται ταύτιση ολικών αιωρούμενων – πτητικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή σε κάθε μέτρηση. Αυτό το γεγονός σηματοδοτεί ότι η λάσπη στερεών που συναντάται στην εκροή πρόκειται για την ίδια τη βιομάζα που έχει εκπλυθεί.

Επιπροσθέτως, όσον αφορά την μοντελοποίηση της κινητικής της αερόβιας διαδικασίας του συγκεκριμένου αντιδραστήρα SBR, εξάγεται το συμπέρασμα πως έχει την δυνατότητα να περιγραφεί από το υπάρχον θεωρητικό μοντέλο κατά IAWPRC. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός μείωσης του COD στον αντιδραστήρα ταυτίζεται και στις τρεις (3) πρώτες φάσεις – για τις οποίες γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί – με τον ρυθμό που προβλέπει το κινητικό μοντέλο. Η πορεία του ρυθμού ελαχιστοποίησης του TN έχει ορισμένες αποκλίσεις από το θεωρητικό μοντέλο, αλλά υπάρχουν προοπτικές βελτιστοποίησής του ώστε να ταυτιστεί, με την προσαρμογή των τιμών ορισμένων σταθερών του μοντέλου που εμπεριέχονται στους ρυθμούς της νιτροποίησης.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Λυμπεράτος Γ., Βαγενάς Δ. (2016). Διαχείριση υγρών αποβλήτων. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [2] Lofrano, Giusy, and Jeanette Brown. 2010. “Wastewater Management through the Ages: A History of Mankind.”. *Science of The Total Environment* 408 (22): 5254–64.
- [3] Βλυσίδης, Α. 2007. Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων και νερών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών Σχολή Χημικών Μηχανικών.
- [4] Standard Methods for Examination of Water & Wastewater, 20th Edition.pdf
- [5] Βλυσίδης, Α. 2020. Σχεδιασμός Βιολογικών Καθαρισμών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών Σχολή Χημικών Μηχανικών.
- [6] Muttamara, S. (1996). Wastewater characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 16(1-4), 145–159.
- [7] Henze M, van Loosdrecht M, Mino T. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2D, ASM3. In: *Water Intelligence Online*. ; 2000.
- [8] Rout, P. R., Shahid, M. K., Dash, R. R., Bhunia, P., Liu, D., Varjani, S., ... Surampalli, R. Y. (2021). Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies. *Journal of Environmental Management*, 296, 113246.
- [9] Ghangrekar, M. M., & Behera, M. (2014). Suspended Growth Treatment Processes. *Comprehensive Water Quality and Purification*, 74–89.

- [10] Stavenhagen, M., Buurman, J., & Tortajada, C. (2018). Saving water in cities: Assessing policies for residential water demand management in four cities in Europe. *Cities*, 79, 187–195.
- [11] <https://www.e-nomothesia.gr/kat-periballon/apobleta/koine-upourgike-apophase-oik-5673-400-1997.html>
- [12] Sonune A., & Ghate R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167, 55–63.
- [13] Grégorio Crini & Eric Lichtfouse (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters* volume 17, pages 145–155.
- [14] Municipal Wastewater and Sludge Treatment, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 1996. Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production. Washington, DC: The National Academies Press.
- [15] M. Henze, C. P. L. Grady Jr, W. Gujer, G. v. R. Marais, T. Matsuo (July 1986). Activated Sludge Model No.1 by IAWPRC Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment.
- [16] Li, B., Irvin, S., & Baker, K. (2007). 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*, 6(6), 651–663.
- [17] Dominic Yellezuome, Xianpu Zhu, Zengzhen Wang, Ronghou Liu (2022). “Mitigation of ammonia inhibition in anaerobic digestion of nitrogen-rich substrates for biogas production by ammonia stripping: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157 (2022) 112043.
- [18] Francesco Di Capua, Simona de Sario, Alberto Ferraro, Andrea Petrella, Marco Race, Francesco Pirozzi, Umberto Fratino, Danilo Spasiano (2022). “Phosphorous removal and recovery from urban wastewater: Current practices and new directions”. *Science of The Total Environment* 823 (2022) 153750.
- [19] 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.
- [20] 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.