



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Τομέας IV :Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διεργασιών**

**Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας**

**Συνεπεξεργασία υγρού κλάσματος τροφικών αποβλήτων  
και αστικών υγρών αποβλήτων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Θεόδωρος Κόκκας**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**ΛΥΜΠΕΡΑΤΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2023**

## Ευχαριστίες

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

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας καθηγητή Γεράσιμο Λυμπεράτο για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του και με τους συνεργάτες του, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος και φυσικά για την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα βαθύτατα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Αχιλλέα Ζαρκαλίου για την καθημερινή του βοήθεια και την άριστη συνεργασία μας. Χωρίς τη σημαντική υποστήριξη και συμβολή του η εργασία αυτή δε θα είχε πραγματοποιηθεί.

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

Τέλος, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς μου Δημήτρη και Νατάσσα, στον αδερφό μου Μάριο καθώς και στους υπόλοιπους συγγενείς μου για την αγάπη και την στήριξη τους τα ακαδημαϊκά μου χρόνια. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους αγαπημένους μου φίλους εντός και εκτός σχολής που υπήρξαν πάντα δίπλα μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Μας ενώνουν – και ελπίζω να συνεχίσουν να μας ενώνουν– υπέροχες αναμνήσεις και εμπειρίες.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική διατριβή εμβαθύνει στην καινοτόμο σφαίρα της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων (MWW) μέσω αναερόβιας χώνευσης, σε συνδυασμό με την ανάκτηση ενέργειας. Οι παραδοσιακές αερόβιες μέθοδοι, αν και αποτελεσματικές, παρουσιάζουν μεγάλα λειτουργικά κόστη για την επιτυχή επεξεργασία των λυμάτων. Ως απάντηση, στη παρούσα μελέτη διερευνάται η βιωσιμότητα της αναερόβιας χώνευσης ως εναλλακτική λύση επεξεργασίας των αστικών λυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι δυνατότητες αυτής της διαδικασίας σε ένα περιβάλλον που περιλαμβάνει ζυμώσιμο συμπύκνωμα αστικών στερεών αποβλήτων (FMSW condensate) και συνθετικά αστικά λύματα.

Η επιδίωξη της βιώσιμης διαχείρισης των υγρών αποβλήτων και της ταυτόχρονης παραγωγής ενέργειας έχει πυροδοτήσει εναλλακτικές στρατηγικές που υπερβαίνουν τα συμβατικά πρότυπα. Η παρούσα μελέτη εξετάζει την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης μέσω του συστήματος περιοδικού αναερόβιου αντιδραστήρα (PABR), με απώτερο στόχο τόσο την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, όσο και την παραγωγή βιοαερίου, δηλαδή ενέργειας από αυτή τη διεργασία. Ο πυρήνας της προσοχής περιστρέφεται γύρω από την περίπλοκη επεξεργασία ενός υβριδικού υποστρώματος που αποτελείται από απόβλητα επεξεργασίας τροφίμων και αστικά λύματα.

Η πειραματική διερεύνηση αποκάλυψε ελπιδοφόρα αποτελέσματα όσον αφορά την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, επιτυγχάνοντας εντυπωσιακή μείωση 94% -όμοια με την παραδοσιακή βιολογική οξείδωση, αλλά με σημαντικά μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Ειδικότερα, η διαδικασία αυτή διατήρησε, καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής μελέτης, το οργανικό φορτίο κάτω από το ρυθμιστικό όριο, παρουσιάζοντας έτσι μια περιβαλλοντικά βιώσιμη λύση.

Μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκαν οι αξιοσημείωτες δυνατότητες της αναερόβιας χώνευσης για ανάκτηση ενέργειας, κυρίως μέσω της παραγωγής βιο-μεθανίου. Η συσσώρευση θρεπτικών συστατικών όπως αζώτου και φωσφόρου εντός του PABR επέβαλε μεταγενέστερη παρέμβαση, η οποία κατέληξε σε μια υβριδική στρατηγική PABR-SBR (Sequencing Batch Reactor). Αυτή η νέα υβριδική διεργασία πέτυχε σημαντική μείωση των θρεπτικών συστατικών του αποβλήτου. Συγκεκριμένα, επιτεύχθηκε σημαντική μείωση στη συγκέντρωση του αζώτου κάτω από τα θεσμοθετημένα όρια. Η επίτευξη αυτού του στόχου, ωστόσο, επέβαλε τη σχολαστική ανάμειξη αποβλήτων (εκροή PABR και εκ νέου προσθήκη FMSW condensate). Επιπλέον, αυτή η σύνθετη προσέγγιση πέτυχε ικανοποιητική μείωση του φωσφόρου, και μείωσε τη συγκέντρωση του εντός των περιβαλλοντικά καθορισμένων ορίων.

Ουσιαστικά, η παρούσα έρευνα επιβεβαιώνει τις δυνατότητες της αναερόβιας χώνευσης σε ένα σύστημα PABR για την επεξεργασία περίπλοκων συνθέσεων αποβλήτων, με αποτέλεσμα την αποτελεσματική μείωση του οργανικού φορτίου και την ταυτόχρονη παραγωγή βιο-μεθανίου. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τα οικονομικά πλεονεκτήματα και τη βιωσιμότητα αυτής της προσέγγισης σε σύγκριση με τη συμβατική βιολογική οξείδωση. Επιπροσθέτως, ενώ η μελέτη αναγνωρίζει το εμπόδιο των αυξημένων επιπέδων αζώτου και φωσφόρου, προτείνει επίσης μια νέα υβριδική στρατηγική επεξεργασίας για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού, αποτελώντας παράδειγμα μιας πολύπλευρης προσέγγισης για τη βιώσιμη διαχείριση των υγρών αποβλήτων.

## ABSTRACT

This thesis delves into the innovative realm of municipal wastewater (MWW) treatment through anaerobic digestion combined with energy recovery. Traditional aerobic methods, although efficient, present high operational costs for successful wastewater treatment. In response, this study investigates the viability of anaerobic digestion as an alternative to municipal wastewater treatment. Specifically, the potential of this process is examined in an environment that includes fermentable municipal solid waste water (FMSW) condensate and synthetic municipal wastewater.

The pursuit of sustainable wastewater management and simultaneous energy production has triggered alternative strategies that go beyond conventional standards. This study examines the performance of anaerobic digestion through the periodic anaerobic digester (PABR) system, with the ultimate goal of both treating wastewater and producing biogas, more specifically energy, from this process. The focus of attention revolves around the complex treatment of a hybrid substrate consisting of food processing waste and municipal wastewater.

The experimental investigation revealed promising results in terms of organic load removal, achieving an impressive 94% reduction - similar to traditional biological oxidation, but with significantly reduced energy requirements. In particular, this process kept the organic load below the regulatory limit throughout the experimental study, thus presenting an environmentally sustainable solution.

Through this thesis, the remarkable potential of anaerobic digestion for energy recovery, mainly through the production of biomethane, was presented. However, obstacles arose regarding the removal of environmentally hazardous nitrogen and phosphorus compounds. Their accumulation within the PABR necessitated a subsequent intervention, which resulted in a hybrid PABR-SBR (Sequencing Batch Reactor) strategy. This new hybrid process achieved a significant reduction of waste nutrients. In particular, a significant reduction in nitrogen concentration below the regulatory limits was achieved. Achieving this objective, however, required thorough waste mixing (PABR effluent and re-addition of FMSW condensate). In addition, this composite approach did not achieve a satisfactory reduction of phosphorus, although it did reduce its concentration within the environmentally defined limits.

Essentially, the present study confirms the potential of anaerobic digestion in a PABR system for the treatment of complex waste compositions, resulting in effective organic load reduction and simultaneous bio-methane production. The findings highlight the economic advantages and viability of this approach compared to conventional biological oxidation. In addition, while the study acknowledges the barrier of elevated nitrogen and phosphorus levels, it also proposes a novel hybrid treatment strategy to address this limitation, exemplifying a multi-faceted approach to sustainable wastewater management.

## Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	10
2.	Αστικά απόβλητα.....	10
2.1.	Υγρά Αστικά Λύματα.....	10
2.2.	Στερεά Αστικά Απόβλητα.....	16
2.2.1.	Ανακυκλώσιμα απόβλητα.....	16
2.2.2.	Ζυμώσιμα απόβλητα .....	17
2.2.3.	Υπόλοιπος Όγκος αποβλήτων.....	18
3.	Μέθοδοι Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων.....	19
3.1.	Συμβατικό διαχειριστικό πλάνο επεξεργασίας αστικών λυμάτων.....	19
3.1.1.	Προ-επεξεργασία και Πρωτοβάθμια επεξεργασία.....	19
3.1.2.	Δευτεροβάθμια επεξεργασία.....	22
3.1.2.1.	Διεργασία Ενεργού Ιλύος – Απομάκρυνση οργανικού φορτίου.....	22
3.1.2.2.	Απομάκρυνση αζώτου.....	26
3.1.2.3.	Απομάκρυνση Φωσφόρου.....	30
3.1.2.4.	Ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικών, αζώτου και φωσφορικών.....	30
3.1.2.5.	Αντιδραστήρας Διαλείπουσας λειτουργίας SBR (Sequence Batch Reactor).....	31
3.1.3.	Τριτογενής επεξεργασία.....	33
3.2.	Αναερόβια Χώνευση.....	33
4.	Επεξεργασία Στερεών Αποβλήτων.....	41
4.1.	Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) .....	41
4.2.	Μονάδες Καύσης Απορριμμάτων .....	43
5.	Προτεινόμενο πλάνο συν διαχείρισης Υγρών Αστικών Λυμάτων και Στερεών Τροφικών Υπολειμμάτων.....	45
5.1.	Εισαγωγή.....	45
5.2.	Πειραματικό Μέρος .....	47
6.	Αποτελέσματα Πειραματικής μελέτης.....	61
7.	Συμπεράσματα .....	74

## Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1. Λειτουργικές παράμετροι διεργασίας αναερόβιας χώνευσης.....	49
Πίνακας 2. φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τροφοδοσίας PABR.....	49
Πίνακας 3. Στάδια λειτουργίας του SBR και η διάρκεια τους.....	52
Πίνακας 4. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μίγματος τροφοδοσίας SBR.....	52
Πίνακας 5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναερόβιας συγχώνευσης FMSW condensate και συνθετικών αστικών λυμάτων.....	61
Πίνακας 6. Μέση τιμή αναλυόμενων παραμέτρων της αναερόβιας χώνευσης στα διαμερίσματα του PABR.....	69

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Ποσοστό ανεπεξέργαστων λυμάτων το 2015 σε χώρες με διαφορετικά επίπεδα εισοδήματος και φιλοδοξίες για το 2030 (μείωση κατά 50% σε σχέση με το 2015).[2].....	12
Εικόνα 2. Παραγωγή υγρών αποβλήτων σε όλες τις περιφέρειες το 2015 και πρόβλεψη μέχρι το 2050- υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα για τα υγρά απόβλητα από διάφορες πηγές [3][4][5][6].....	13
Εικόνα 3. Δυναμικό των υγρών αποβλήτων για την παραγωγή ενέργειας, το 2015 και προβλέψεις για τα έτη 2030 και 2050 με βάση την αναμενόμενη αύξηση του όγκου των υγρών αποβλήτων [1].....	14
Εικόνα 4. Σύστημα επεξεργασίας Λυμάτων κλειστού βρόχου.....	16
Εικόνα 5. Εκτιμήσεις της Eurostat για την προέλευση των τροφικών αποβλήτων το έτος 2020. [15].....	18
Εικόνα 6. Σχάρα εγκατεστημένη στην μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων στην Μεταμόρφωση.....	20
Εικόνα 7. Απεικόνιση συμβατικής διεργασίας εξάμωσης.....	20
Εικόνα 8. Λιποσυλλέκτης στον οποία τα λίπη βρίσκονται στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και τα βαρέα σωματίδια στον πυθμένα του.....	21
Εικόνα 9. Ορθογωνική δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης Τύπου.....	22
Εικόνα 10. Απεικόνιση συμβατικής διεργασίας ενεργούς ιλύος με δεξαμενή αερισμού (Δ.Α), δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Δ.Δ.Κ) και ανακυκλοφορία ιλύος [19].....	26
Εικόνα 11. Διάγραμμα ροής κατά το οποίο πραγματοποιείται η απομάκρυνση του αζώτου [21].....	29
Εικόνα 12. Διεργασία ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικών και θρεπτικών από τα αστικά απόβλητα [21].....	31
Εικόνα 13. Απεικόνιση της αλληλουχίας σταδίων ενός κύκλου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα SBR.....	32
Εικόνα 14. Αντιδραστήρες τύπου CSTR. Στα αριστερά ο αντιδραστήρας έχει και δεξαμενή καθίζησης[32].....	37
Εικόνα 15. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και τρόπου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα τύπου ABR πολλαπλών διαμερισμάτων[35].....	38

Εικόνα 16.: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και τρόπου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα τύπου UASBR [36].....	39
Εικόνα 17. Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα PABR.....	41
Εικόνα 18. ΧΥΤΑ Χαλκίδας.....	43
Εικόνα 19. Μονάδα καύσης απορριμμάτων.....	44
Εικόνα 20. Διάγραμμα ροής τροφικών αποβλήτων κατά την εφαρμογή του διαχειριστικού σεναρίου του ερευνητικού προγράμματος Waste4Think.....	46
Εικόνα 21. Ξηραντήρας όπου έλαβε χώρα η ξήρανση και ο τεμαχισμός των τροφικών υπολειμμάτων.....	47
Εικόνα 22. Ο αντιδραστήρας PABR που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.....	48
Εικόνα 23. Πειραματική διάταξη PABR.....	48
Εικόνα 24. Διάγραμμα ροής διεργασίας.....	50
Εικόνα 25. Πειραματική διάταξη SBR.....	51
Εικόνα 26. Διάγραμμα ροής πειραματικής διάταξης.....	52
Εικόνα 27. Εργαστηριακή διάταξη μέτρησης pH.....	53
Εικόνα 28. Φούρνος σταθερής θερμοκρασίας 105 °C (αριστερά), αναλυτικόςζυγός δεξιά.....	55
Εικόνα 29. Ειδικός φούρνος στους 150°C για την εξώθερμη αντίδραση μέτρησης των COD.....	58
Εικόνα 30. Χρωματογράφος Shimadzu GC-2010 (αριστερά), χρωματογράφος Shimadzu GC 2014 (δεξιά).....	60
Εικόνα 31. Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου σε L/d στον PABR.....	62
Εικόνα 32. Ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης οργανικού φορτίου στηνείσοδο και στην έξοδο του αντιδραστήρα PABR σε μονάδες mg/L sCOD.....	62
Εικόνα 33. Ημερήσια διακύμανση οργανικού φορτίου στην είσοδο και την έξοδο του PABR σε μονάδες mg/L διαλυτού οργανικού άνθρακα.....	63
Εικόνα 34. Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR σε μονάδες sCOD.....	63
Εικόνα 35. Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR σε μονάδες TOC.....	64



Εικόνα 36. Ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου στην τροφοδοσία και στην εκροή του PABR.....	64
Εικόνα 37. Ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου στα διαμερίσματα του PABR.....	65
Εικόνα 38. Ημερήσια τιμή pH στα διαμερίσματα του PABR.....	65
Εικόνα 39. Ημερήσια τιμή της ολικής αλκαλικότητας στα διαμερίσματα του PABR.....	66
Εικόνα 40. Ημερήσια συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στα διαμερίσματα του PABR.....	66
Εικόνα 41. Ημερήσια συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στα διαμερίσματα του PABR.....	67
Εικόνα 42. Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην τροφοδοσία του PABR.....	67
Εικόνα 43. Συγκέντρωση οξικού οξέος στο 1 <sup>ο</sup> κατά σειρά εισόδου διαμέρισμα του PABR. ....	68
Εικόνα 44. Ημερήσια συγκέντρωση τροφοδοσίας και εκροής αντιδραστήρα SBR. Η τροφοδοσία αποτελείται από εκροή αναερόβιου αντιδραστήρα PABR και FMSW condensate.....	69
Εικόνα 45. Συγκέντρωση διαλυτού οργανικού φορτίου στο ανάμικτο υγρό του SBR κατά το στάδιο της αντίδρασης.....	70
Εικόνα 46. Συγκέντρωση ολικού αζώτου στην τροφοδοσία του SBR και στην εκροή του σε μορφή νιτρικών και αμμωνιακού.....	71
Εικόνα 47. Συγκέντρωση αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου στο ανάμικτο υγρό του SBR κατά το στάδιο της αντίδρασης.....	71
Εικόνα 48. Μέση συγκέντρωση διαλυτού φωσφόρου στην τροφοδοσία και στην εκροή του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια της διεργασίας.....	72
Εικόνα 49. Μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυτού φωσφόρου στο ανάμικτο υγρό του SBR κατά την διάρκεια του σταδίου της αντίδρασης.....	73

## 1. Εισαγωγή

Με τον όρο αστικά απόβλητα χαρακτηρίζεται το σύνολο των αποβλήτων μιας πόλης τα οποία είναι ανθρωπογενούς προέλευσης και χρήζουν επεξεργασίας πριν την τελική τους απόρριψη στο περιβάλλον. Στον όρο αστικά απόβλητα δεν συμπεριλαμβάνονται τα απόβλητα που παράγονται σε διάφορα στάδια βιομηχανικών διεργασιών, τα οποία ονομάζονται βιομηχανικά απόβλητα και παρουσιάζουν μεγάλες φυσικοχημικές διαφορές από τα αστικά.

Τα αστικά απόβλητα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με την φυσική φάση στην οποία αυτά βρίσκονται. Τα στερεά απόβλητα τα οποία κατά κανόνα απαρτίζονται από οικιακά απορρίμματα και τα υγρά αστικά λύματα. Ο ανωτέρω διαχωρισμός κατά γενικό κανόνα καθορίζει και τις μεθόδους συλλογής και διαχείρισης των αποβλήτων. Συγκεκριμένα τα στερεά αστικά απόβλητα συλλέγονται σε κάδους συλλογής απορριμμάτων ενώ τα αστικά λύματα μέσω των αποχετευτικών δικτύων. Κατά αυτό τον τρόπο τα στερεά αστικά απόβλητα οδηγούνται σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ), Μονάδες Καύσης Απορριμμάτων καθώς και σε Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (ΚΔΑΥ). Αντίστοιχα τα αστικά λύματα οδηγούνται σε Κέντρα Επεξεργασίας Λυμάτων (ΚΕΛ). Ωστόσο παρά την στερεή τους φάση τα στερεά αστικά απόβλητα δεν παρουσιάζουν ομοιογένεια ως προς τις φυσικοχημικές του ιδιότητες και τις δυνατότητες αξιοποίησης τους. Για το λόγο αυτό χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες. Συγκεκριμένα τα στερεά αστικά απόβλητα χωρίζονται σε ανακυκλώσιμα, ζυμώσιμα απόβλητα (ή βιο-απόβλητα) και τα υπόλοιπα απόβλητα που δεν εμπίπτουν στις δύο παραπάνω κατηγορίες. Η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση παρέχει την δυνατότητα περαιτέρω μελέτης τους, τόσο ως προς την συλλογή των αποβλήτων όσο και ως προς την επεξεργασία τους. Στην συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι βασικές κατηγορίες των αστικών αποβλήτων.

## 2. Αστικά Απόβλητα

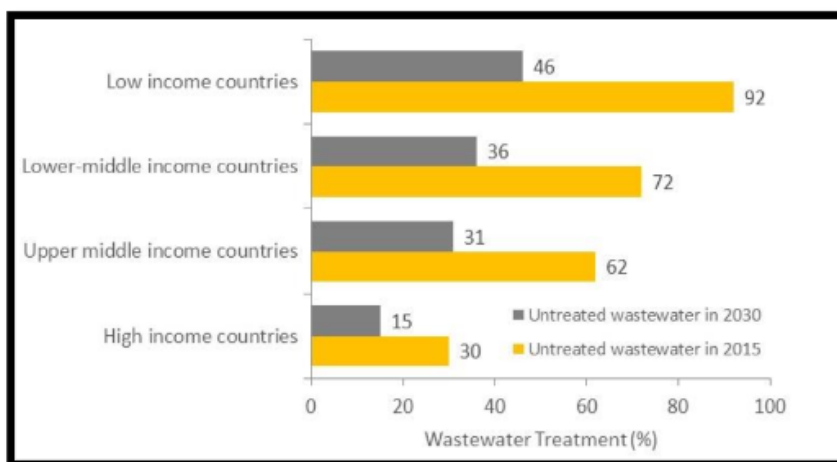
### 2.1 Υγρά Αστικά Λύματα (Municipal Wastewater)

Τα υγρά αστικά λύματα κατά κύριο λόγο παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και αποτελούν απειλή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Η σύσταση των λυμάτων αυτών, εμπεριέχει ένα μείγμα οργανικής και ανόργανης ύλης. Επιπρόσθετα, στη σύνθεση των αστικών αποβλήτων απαντώνται και χημικές ουσίες από απορρυπαντικά, φαρμακευτικά προϊόντα και φυτοφάρμακα καθώς και βαρέα μέταλλα. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η συλλογή και επεξεργασία των λυμάτων για την προστασία της δημόσιας υγείας και του οικοσυστήματος. Η επεξεργασία των υγρών αστικών λυμάτων χωρίζεται σε τρία στάδια πρωτοβάθμιο, δευτεροβάθμιο και τριτοβάθμιο. Στη πρωτοβάθμια επεξεργασία τα λύματα υποβάλλονται σε φυσικές διεργασίες όπως η διαλογή και η καθίζηση των μεγάλων στερεών και της οργανικής ύλης. Στη δευτεροβάθμια επεξεργασία, τα απόβλητα υποβάλλονται σε βιολογικές διεργασίες όπως αερισμός και χρήση βακτηρίων για την απομάκρυνση της εναπομένουσας οργανικής ύλης. Τέλος στη τριτοβάθμια επεξεργασία πραγματοποιούνται διεργασίες όπως διήθηση και απολύμανση ρύπων, όπως παθογόνων μικροοργανισμών και βαρέων μετάλλων. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία επεξεργασίας, το νερό απορρίπτεται πίσω στο περιβάλλον ή επαναχρησιμοποιείται για γεωργικούς ή βιομηχανικούς σκοπούς.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η παραγωγή αστικών λυμάτων αποτελεί σημαντική πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι αστικές περιοχές. Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός συνεχίζει να αυξάνεται, η

ζήτηση για υπηρεσίες ύδρευσης και αποχέτευσης αυξάνεται, οδηγώντας σε αύξηση της ποσότητας των παραγόμενων υγρών αποβλήτων. Η παραγωγή αστικών λυμάτων επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων, όπως η πυκνότητα του πληθυσμού, η οικονομική δραστηριότητα κλπ. Σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, η ταχεία αστικοποίηση έχει ξεπεράσει την ανάπτυξη των υποδομών αποχέτευσης, οδηγώντας σε ανεπαρκή επεξεργασία και διάθεση των λυμάτων. Οι περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες ενδιαφέρονται ενεργά για τη βελτίωση της διαχείρισης των υγρών αποβλήτων. Ο στόχος είναι να προχωρήσουν πέρα από τη μείωση της ρύπανσης, στη παραγωγή ενέργειας αλλά και άλλων προϊόντων από τα υγρά απόβλητα. Ως αποτέλεσμα, ο τομέας των λυμάτων στις ανεπτυγμένες χώρες έχει αρχίσει να απομακρύνεται από την απλή επεξεργασία των λυμάτων και προσβλέπει πέρα από τη παραγωγή καθαρού νερού, στην ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών από τα υγρά απόβλητα και στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων μέσω της παραγωγής και χρήσης ανανεώσιμης ενέργειας από αυτά. Παρά τις δυνατότητες που παρουσιάζουν τα υγρά απόβλητα, στη παγκόσμια πραγματικότητα μόνο ένα πολύ μικρό μέρος του συνόλου των παραγόμενων υγρών αποβλήτων συλλέγεται και επεξεργάζεται, πόσο μάλλον αξιοποιείται για την ανάκτηση πόρων. Εκτιμάται ότι, σε παγκόσμιο επίπεδο, πάνω από το 80% του συνόλου των παραγόμενων υγρών αποβλήτων απορρίπτεται στο περιβάλλον χωρίς επαρκή επεξεργασία, αν και το επίπεδο ποικίλλει σε διάφορες περιοχές.

Τα στατιστικά στοιχεία που παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 παρουσιάζουν το ποσοστό των λυμάτων που οδηγούνται προς επεξεργασία σε σύγκριση με το εισοδηματικό επίπεδο των κρατών. Οι χώρες υψηλού εισοδήματος έχουν κατά μέσο όρο το υψηλότερο ποσοστό επεξεργασμένων λυμάτων, γεγονός που υποδηλώνει ότι διαθέτουν πιο προηγμένες και αποτελεσματικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Ωστόσο, το επίπεδο επεξεργασίας μειώνεται δραματικά στις χώρες με ανώτερο μεσαίο και χαμηλότερο μεσαίο εισόδημα, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι χώρες αυτές αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά τις επενδύσεις σε υποδομές επεξεργασίας λυμάτων. Στις χώρες με χαμηλό εισόδημα, η κατάσταση είναι ιδιαίτερα άσχημη, καθώς μόνο το 8% των παραγόμενων λυμάτων λαμβάνει οποιαδήποτε μορφή επεξεργασίας. Αυτή η έλλειψη επεξεργασίας μπορεί να οδηγήσει σε μόλυνση των υδάτινων σωμάτων, η οποία μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι χώρες με χαμηλό εισόδημα έχουν συνήθως υψηλότερα επίπεδα λειψυδρίας και δεν διαθέτουν επαρκείς υποδομές ύδρευσης και αποχέτευσης, γεγονός που επιτείνει περαιτέρω τις προκλήσεις της επεξεργασίας λυμάτων[1].

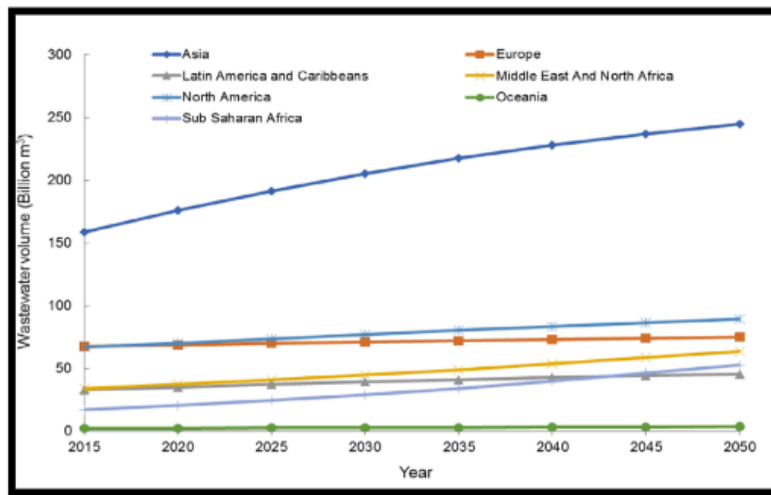


Εικόνα 1. Ποσοστό ανεπεξεργαστων λυμάτων το 2015 σε χώρες με διαφορετικά επίπεδα εισοδήματος και φιλοδοξίες για το 2030 (μείωση κατά 50% σε σχέση με το 2015).[2]

Η ετήσια παραγωγή αστικών λυμάτων, η οποία εκτιμάται σε 380 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> παγκοσμίως, αποτελεί σημαντική περιβαλλοντική και υγειονομική πρόκληση. Τα ανεπεξεργαστα ή ανεπαρκώς επεξεργασμένα λύματα μπορούν να μολύνουν τα υδάτινα σώματα και να θέσουν σε σοβαρούς κινδύνους την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η Ασία, η Βόρεια Αμερική και η Ευρώπη είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί αστικών λυμάτων, με την Ασία να κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο 42%. Αυτό οφείλεται στις υψηλές πληθυσμιακές πυκνότητες και την ταχεία αστικοποίηση σε πολλές ασιατικές χώρες, οι οποίες έχουν οδηγήσει σε αυξημένη ζήτηση για υπηρεσίες ύδρευσης και αποχέτευσης. Αντίθετα, η Υποσαχάρια Αφρική παράγει τους χαμηλότερους ετήσιους όγκους λυμάτων ανά κάτοικο. Αυτό οφείλεται κυρίως στην περιορισμένη πρόσβαση στην ύδρευση και στα ανεπαρκή συστήματα συλλογής λυμάτων στις περισσότερες αστικές περιοχές. Η έλλειψη πρόσβασης σε υπηρεσίες ύδρευσης και αποχέτευσης στην Υποσαχάρια Αφρική έχει σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία, το οποίο αποτυπώνεται στην εξάπλωση των υδατογενών ασθενειών.

Η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ετήσιου όγκου παραγωγής υγρών αποβλήτων και διαφόρων δυνητικά σχετιζόμενων μεταβλητών αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη μελλοντικών τάσεων στην παραγωγή υγρών αποβλήτων[1].

Με την εξέταση της συσχέτισης μεταξύ της παραγωγής λυμάτων και του ακαθάριστου εθνικού εισοδήματος, του δείκτη ανθρώπινης ανάπτυξης, του συνολικού πληθυσμού και του αστικού πληθυσμού, είναι δυνατόν να αποκτηθούν γνώσεις σχετικά με τους παράγοντες που συμβάλλουν στην παραγωγή αστικών λυμάτων. Στην προκειμένη περίπτωση, διαπιστώθηκε ισχυρή συσχέτιση ( $R^2 = 0,78$ ,  $P < 0,01$ ) μεταξύ της παραγωγής αστικών λυμάτων και του αστικού πληθυσμού, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αύξηση του πληθυσμού και η αστικοποίηση αποτελούν σημαντικούς παράγοντες παραγωγής λυμάτων. Με βάση την αναμενόμενη αύξηση του αστικού πληθυσμού τα επόμενα χρόνια, θα υπάρξει αυξανόμενη ζήτηση για παροχή νερού στις αστικές περιοχές σε σχέση με την αύξηση του όγκου των λυμάτων. Έτσι εκτιμάται ότι η παραγωγή λυμάτων παγκοσμίως αναμένεται να φθάσει τα 470 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> μέχρι το τέλος του 2030, δηλαδή 24% αύξηση σε σχέση με την τρέχουσα παραγωγή λυμάτων- και μέχρι το 2050 θα φθάσει τα 574 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup>, δηλαδή 51% αύξηση σε σχέση με το σημερινό επίπεδο όπως αποτυπώνεται στον Εικόνα 2[1].



Εικόνα 2. Παραγωγή υγρών αποβλήτων σε όλες τις περιφέρειες το 2015 και πρόβλεψη μέχρι το 2050- υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα για τα υγρά απόβλητα από διάφορες πηγές [3][4][5][6].

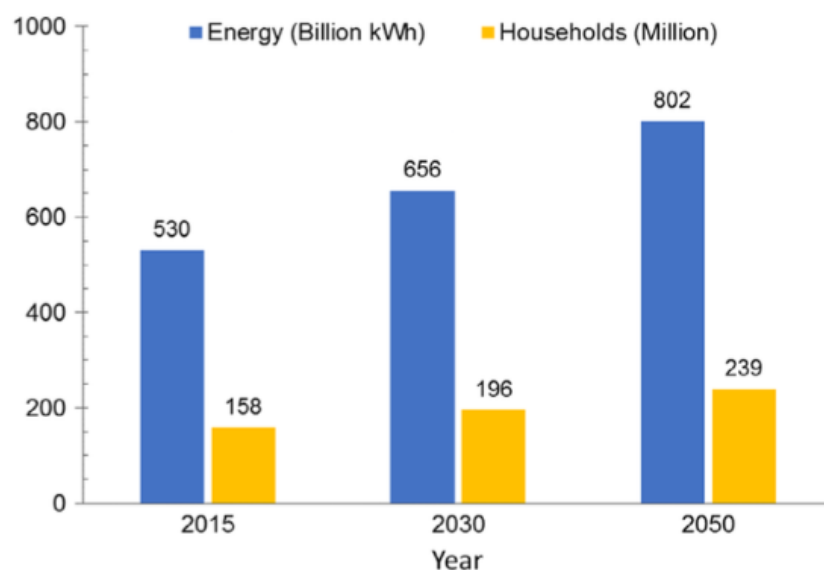
Όπως προαναφέρθηκε η απόρριψη μη επεξεργασμένων λυμάτων στο περιβάλλον αποτελεί κίνδυνο τόσο για την δημόσια υγεία όσο και για την ισορροπία των οικοσυστημάτων. Στα αστικά λύματα απαντώνται αιωρούμενα, διαλυμένα ή σε κolloειδή μορφή, οργανικά και ανόργανα συστατικά. Τα οργανικά συστατικά είναι κυρίως πρωτεΐνες (40-60%), υδατάνθρακες (25-50%), λιπαρές ενώσεις (5-10%) και ουρία. Η περιεκτικότητα των λυμάτων σε αιωρούμενα στερεά οδηγεί στην αισθητική υποβάθμιση των υδάτινων πόρων, εμποδίζεται τη διέλευση του ηλιακού φωτός, με προφανείς επιπτώσεις στη φωτοσύνθεση της χλωρίδας. Επιπροσθέτως, η αποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων παράγει προϊόντα όπως αμινοξέα, αμμωνία, υδρόθειο, αλκοόλες, λιπαρά οξέα, φαινόλες, διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υδρογόνο, νιτρικά, νιτρώδη και θειικά άλατα. Η αύξηση της συγκέντρωσης βιοαποικοδομήσιμου οργανικού άνθρακα στους υδάτινους αποδέκτες θα οδηγήσει σε αύξηση των απαιτήσεων οξυγόνου, γεγονός που θα προκαλέσει μείωση στον πληθυσμό των υπόλοιπων ζωντανών οργανισμών. Επιπρόσθετα στα απόβλητα όπως αναφέρθηκε εμπεριέχονται θρεπτικά συστατικά όπως φώσφορος και άζωτο τα οποία ευθύνονται για την ανάπτυξη φυκιών, το οποίο οδηγεί στην αποσύνθεση τους και δέσμευση οξυγόνου (ευτροφισμός), ενώ επίσης πολλά είδη φυκιών παράγουν τοξίνες. Ο ευτροφισμός απαντάται σε λίμνες και κλειστούς αβαθείς κόλπους όπου η μεγάλη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων οδηγεί στην ανάπτυξη βακτηρίων και αλγών. Η ανάπτυξη αυτών των δύο οδηγεί στη δημιουργία ενός επικαλύμματος στις υδάτινες επιφάνειες, που προκαλεί σκίαση στο νερό κάτω από την επιφάνεια. Αυτή η κατάσταση ωθεί τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς στον πυθμένα των υδάτων σε θανάτωση, οι οποίοι με τη σειρά τους προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη ποσότητα τροφής σε άλλα βακτήρια, που συνεχίζουν να αναπτύσσονται. Άρα σταδιακά μειώνεται το παρεχόμενο διαλυμένο οξυγόνο των φωτοσυνθετικών οργανισμών, τα βακτήρια από την άλλη αυξάνονται και καταναλώνουν παράλληλα το υπόλοιπο διαλυμένο οξυγόνο το οποίο, τελικά, οδηγεί και στη θανάτωση των μη φωτοσυνθετικών οργανισμών αφού δεν υπάρχει οξυγόνο (π.χ. ψάρια)[7].

Με εφιαλτήριο την επιτακτική ανάγκη για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων αλλά και τις δυνατότητες αξιοποίησής τους ως προς την ανάκτηση ενέργειας και ενώσεων από αυτά, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στρέφεται στην ανάπτυξη καινοτόμων διεργασιών επεξεργασίας τους. Ιδιαίτερη θέση στις εναλλακτικές διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων αλλά και άλλων οργανικών αποβλήτων κατέχει η αναερόβια χώνευση. Η αναερόβια χώνευση παρέχει την

δυνατότητα μετατροπής της οργανικής ύλης σε βιοαέριο, το οποίο μπορεί να ανακτηθεί και να εκμεταλλευτεί ενεργειακά.

Σε γενικές γραμμές, υπάρχει ένα σημαντικό δυναμικό ανάκτησης ενέργειας από τα υγρά απόβλητα, το οποίο δεν έχει ακόμη αξιοποιηθεί πλήρως. Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί πρόοδος προς την επίτευξη ενεργειακά ουδέτερης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, ωστόσο υπάρχουν και αρκετές εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που είναι ενεργειακά αυτόνοκες.

Η επέκταση της ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα είναι πολλά υποσχόμενη και υπάρχει η δυνατότητα να μειώσει το κόστος της διαδικασίας επεξεργασίας, μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης εντός των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων έχουν επίσης τη δυνατότητα να παράγουν ακόμη και ενέργεια για το δίκτυο ηλεκτροδότησης, επιστρέφοντας το στις πόλεις που παράγουν τα λύματα. Εάν ο οργανικός άνθρακας των υγρών αποβλήτων μετατραπεί αναερόβια σε μεθάνιο, η ενεργειακή αξία των 380 δισεκατομμυρίων  $m^3$  υγρών αποβλήτων εκτιμάται σε 53,2 δισεκατομμύρια  $m^3$  μεθανίου με θερμιδική αξία 1.908 δισεκατομμύρια MJ [8]. Σε αυτή τη περιγραφή αναφέρεται η εκτίμηση της ενεργειακής αξίας των υγρών αποβλήτων με βάση τον αναερόβιο συντελεστή μετατροπής του οργανικού άνθρακα σε μεθάνιο ( $0,14 m^3 CH_4$  ανά  $m^3$  υγρών αποβλήτων [9]) και τη θερμιδική αξία του μεθανίου. Η ενέργεια αυτή είναι αρκετή για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε 158 εκατομμύρια νοικοκυριά. Λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη αύξηση του όγκου των υγρών αποβλήτων, η παραγωγή υγρών αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε 196 εκατομμύρια νοικοκυριά έως το 2030 και 239 εκατομμύρια νοικοκυριά έως το 2050. Στον Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι προβλέψεις, οι οποίες βασίζονται στα μέγιστα θεωρητικά επίπεδα ανάκτησης ενέργειας (χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί στις διαδικασίες ανάκτησης ενέργειας από τα υγρά απόβλητα).



Εικόνα 3. Δυναμικό των υγρών αποβλήτων για την παραγωγή ενέργειας, το 2015 και προβλέψεις για τα έτη 2030 και 2050 με βάση την αναμενόμενη αύξηση του όγκου των υγρών αποβλήτων [1].

Επιπλέον, πέραν της ενεργειακής αξιοποίησής τους, το μοντέλο επεξεργασίας των αστικών λυμάτων οφείλει να εντάσσεται σε ένα πλαίσιο υδατικής οικονομίας με σκοπό την μείωση των αναγκών σε

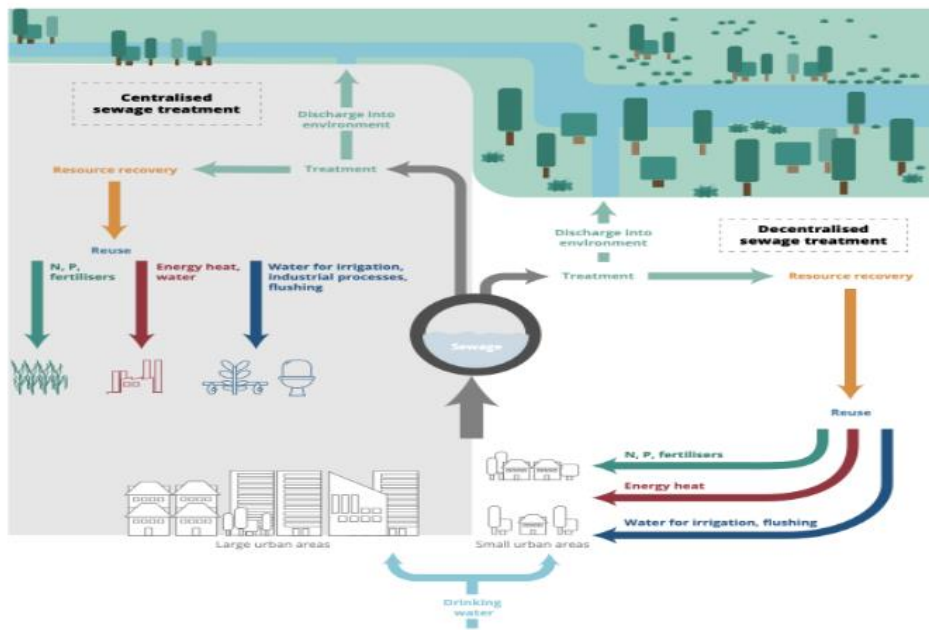
νερό τόσο για γεωργικές όσο και για βιομηχανικές χρήσεις. Το χημικώς καθαρό νερό δεν υπάρχει στη φύση, γιατί είναι ισχυρό διαλυτικό μέσο και εμπλουτίζεται κατά την επαφή του με το περιβάλλον με διάφορες ουσίες, που διαλύονται ή παρασύρονται από αυτό. Έτσι το φυσικό νερό παρουσιάζει ποικιλία ποιοτικών χαρακτηριστικών (φυσικά, χημικά, βιολογικά - μικροβιολογικά) ανάλογα με τις περιεχόμενες ξένες προσμίξεις. Για κάθε χρήση απαιτείται ορισμένη διακύμανση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού, που καθορίζεται συνήθως από τα πρότυπα ποιότητας (Quality Standard). Το νερό μετά τη χρήση του έχει αλλοιωμένα και σημαντικά υποβαθμισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά, που δημιουργούν σοβαρά προβλήματα ρύπανσης και ακαταλληλότητας στον τελικό αποδέκτη [10]. Όσο και αν το διαθέσιμο νερό στον πλανήτη είναι φαινομενικά πάρα πολύ, το σημαντικότερο μέρος του (97%) είναι αλμυρό, ενώ το γλυκό νερό είναι στο 3% με το μεγαλύτερο μέρος του να είναι παγιδευμένο στα πολικά καλύμματα των πάγων. Επομένως από την πλευρά της υδατικής οικονομίας, προκειμένου να προστατευτεί το περιβάλλον και παράλληλα η δημόσια υγεία, είναι ανάγκη τα υγρά απόβλητα να υποβληθούν στην απαραίτητη επεξεργασία καθαρισμού, προτού φτάσουν στον τελικό αποδέκτη[11].

Η Εικόνα 4 παρουσιάζει ένα μοντέλο επαναχρησιμοποίησης των αστικών λυμάτων αφού υποστούν κατάλληλη επεξεργασία. Με αυτό το τρόπο ελαχιστοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απόρριψης υγρών αποβλήτων και μεγιστοποιούνται τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων βιολογικής επεξεργασίας. Στόχος είναι η δημιουργία ενός συστήματος κλειστού βρόχου όπου τα λύματα θα υποβάλλονται σε επεξεργασία και θα επαναχρησιμοποιούνται, αντί να απορρίπτονται ως απόβλητα. Η σημαντική σύσταση σε άζωτο και φώσφορο που περιέχεται στα αστικά λύματα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως λιπάσματα για γεωργικούς σκοπούς. Με την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, τα θρεπτικά συστατικά μπορούν να διατηρηθούν και να αξιοποιηθούν αντί να χαθούν στο περιβάλλον, οδηγώντας στη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους και της ανάπτυξης των φυτών. Επιπλέον, με την επαναχρησιμοποίηση αυτών των θρεπτικών συστατικών μπορεί να μειωθεί η ανάγκη για συνθετικά λιπάσματα, γεγονός που μπορεί να εξοικονομήσει κόστος και να αποτρέψει τη ρύπανση του περιβάλλοντος που προκαλείται από την υπερβολική χρήση χημικών ουσιών.

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων απαιτούν σημαντική ποσότητα ενέργειας για τη λειτουργία τους. Ωστόσο, τα λύματα περιέχουν επίσης οργανική ύλη που μπορεί να μετατραπεί σε βιοαέριο μέσω αναερόβιας χώνευσης. Αυτό το βιοαέριο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για την τροφοδοσία της μονάδας επεξεργασίας ή την παραγωγή θερμότητας για τα κοντινά κτίρια. Επιπλέον, τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς ψύξης σε βιομηχανικές διεργασίες, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση των πόρων γλυκού νερού και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Τέλος, συνολικά η επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων για σκοπούς άρδευσης μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση των πόρων γλυκού νερού. Τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για βιομηχανικές διεργασίες που απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού.

Συμπερασματικά, το μοντέλο επαναχρησιμοποίησης των αστικών λυμάτων παρέχει μια βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της διάθεσης των λυμάτων και της ζήτησης για πόρους γλυκού νερού. Μέσω της χρήσης των προϊόντων της βιολογικής επεξεργασίας, αυτό το σύστημα κλειστού βρόχου εξασφαλίζει την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, ελαχιστοποιώντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται ένα σύστημα επεξεργασίας κλειστού βρόχου το οποίο κατευθύνει τις διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων προς

την αξιοποίησή τους μέσω της ανάκτησης θρεπτικών συστατικών, ενέργειας και νερού.



Εικόνα 4. Σύστημα επεξεργασίας Λυμάτων κλειστού βρόχου.

## 2.2 Στερεά Αστικά Απόβλητα

Τα αστικά απόβλητα αποτελούν το απότοκο νοικοκυριών και επιχειρήσεων σε μία περιοχή. Στα στερεά απόβλητα συγκαταλέγεται μεγάλη ποικιλία απορριμμάτων όπως τρόφιμα, χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλα, κατασκευαστικά υλικά και άλλα υλικά. Αυτά τα απόβλητα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορους τύπους, οι κυριότερες κατηγορίες είναι τα ανακυκλώσιμα (χαρτί) και τα ζυμώσιμα απόβλητα (τρόφιμα). Η διαχείριση των αστικών αποβλήτων αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της εποχής μας καθώς ο μεγάλος ρυθμός παραγωγής στερεών αποβλήτων εγκυμονεί κινδύνους τόσο για το περιβάλλον όσο και για την δημόσια υγεία. Σήμερα, τα απόβλητα συλλέγονται και οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) ή σε μονάδες καύσης. Ωστόσο, με αυτές τις μεθόδους επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων υπεισέρχονται και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για αυτό το λόγο πλέον, προτείνεται η ανακύκλωση και η κομποστοποίηση των αποβλήτων για μειωθεί όγκος που οδηγείται σε ΧΥΤΑ και μονάδες καύσης. Ουσιαστικά προτείνεται η επεξεργασία των αποβλήτων έτσι ώστε να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν προς παραγωγή νέων προϊόντων ή την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού μέσω της αξιοποίησης των θρεπτικών οργανικών ουσιών τους.

### 2.2.1 Ανακυκλώσιμα απόβλητα

Τα ανακυκλώσιμα στερεά απόβλητα αναφέρονται σε υλικά που μπορούν να συλλεχθούν, να υποστούν επεξεργασία και να ανακατασκευαστούν σε νέα προϊόντα. Στα ανακυκλώσιμα απόβλητα εμπεριέχονται και υλικά τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν όπως το χαρτί, το χαρτόνι, τα πλαστικά, το γυαλί και τα μέταλλα. Η διαχείριση των ανακυκλώσιμων στερεών αποβλήτων περιλαμβάνει διάφορα στάδια, συμπεριλαμβανομένης της συλλογής, της



διαλογής, της επεξεργασίας και της ανακατασκευής. Κατά τη διαδικασία της διαλογής διαχωρίζονται τα διάφορα ανακυκλώσιμα υλικά σε περαιτέρω κατηγορίες και υποβάλλονται σε επεξεργασία για την απομάκρυνση των ρύπων τους. Για την ανακατασκευή των ανακυκλώσιμων υλικών αυτά μπορεί να υποβληθούν σε τεμαχισμό, τήξη ή άλλες μεθόδους, ανάλογα με τον τύπο του υλικού.

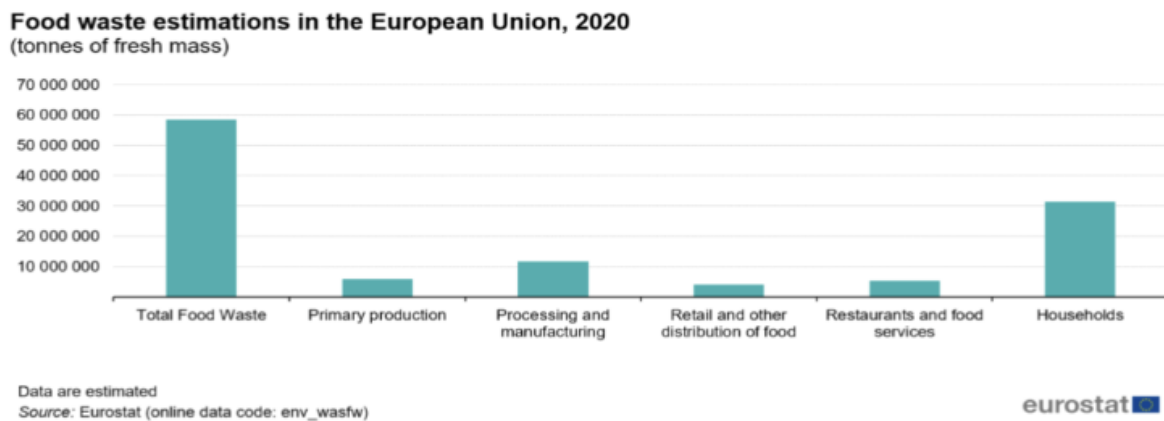
Η διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί κρίσιμη πτυχή της βιώσιμης ανάπτυξης και της μετάβασης σε μια κυκλική οικονομία, τόσο σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) όσο και σε Ελληνικό επίπεδο. Εντός της Ευρώπης, τα ποσοστά παραγωγής αποβλήτων και ανακύκλωσης παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις. Κατά μέσο όρο, κάθε Ευρωπαίος παράγει περίπου 5 τόνους αποβλήτων ετησίως και το ποσοστό ανακύκλωσης σε ολόκληρη την ΕΕ ανέρχεται μόλις στο 38%. Είναι ανησυχητικό το γεγονός ότι σε ορισμένες χώρες της ΕΕ, πάνω από το 60% των οικιακών απορριμμάτων συνεχίζει να διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Αναγνωρίζοντας τον επείγοντα χαρακτήρα της αντιμετώπισης αυτών των ζητημάτων, η ΕΕ έχει θεσπίσει συγκεκριμένους στόχους για την ενίσχυση της ανακύκλωσης των αποβλήτων και της ανάκτησης των ανακυκλώσιμων αποβλήτων [13]. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, τα κράτη μέλη της ΕΕ υποχρεούνται να εφαρμόσουν μία σειρά από μέτρα έτσι ώστε μέχρι το 2025, να επιτύχουν ελάχιστο ποσοστό ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης στο 55% για τα αστικά απόβλητα, ενώ οι επόμενοι στόχοι ορίζονται στο 60% μέχρι το 2030 και στο 65% μέχρι το 2035 [14]. Στην Ελλάδα, γίνονται προσπάθειες έτσι ώστε η χώρα μας να ευθυγραμμιστεί με το σχέδιο δράσης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία. Ωστόσο, το 2017 στη χώρα μας σχεδόν το 80% των αστικών αποβλήτων κατέληξε σε χώρους υγειονομικής ταφής. Έτσι, προκειμένου να δημιουργηθούν στέρεα θεμέλια για την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας, είναι επιτακτική ανάγκη να δοθεί προτεραιότητα στην πρόληψη και την επαναχρησιμοποίηση των αστικών αποβλήτων, καθώς και στην υιοθέτηση νέων τεχνικών επεξεργασίας αυτών.

### **2.2.2 Ζυμώσιμα απόβλητα**

Τα ζυμώσιμα απόβλητα ανήκουν στη κατηγορία των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων τα οποία μπορούν να διασπαστούν μέσω βιολογικών διεργασιών. Βιοαποικοδομήσιμα υλικά είναι τα τροφικά, τα ζωικά και άλλα απόβλητα πλούσια σε οργανικά συστατικά. Τα ζυμώσιμα στερεά μπορούν να αποτελέσουν ιδανικό υπόστρωμα για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Τα ζυμώσιμα απόβλητα, επίσης, κομποστοποιούνται μέσω φυσικών διεργασιών με χρήση βακτηρίων, μυκήτων και σκουληκιών για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης παράγοντας εδαφοβελτιωτικό χρήσιμο για τη γεωργία και τη κηπουρική.

Μία κατηγορία ζυμώσιμων αποβλήτων που απασχολεί έντονα τη παγκόσμια κοινότητα τα τελευταία χρόνια αποτελούν τα τροφικά υπολείμματα. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε τρόφιμα έχει ως αποτέλεσμα την ολοένα και αυξανόμενη δημιουργία τροφικών αποβλήτων. Τα τροφικά απόβλητα έχουν σημαντικό αντίκτυπο για το περιβάλλον και την δημόσια υγεία, διότι όταν τα τρόφιμα απορρίπτονται σε χωματερές, αποσυντίθενται και κάτω από αναερόβιες συνθήκες παράγουν μεθάνιο, το οποίο ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου και για αυτό το λόγο διερευνώνται μέθοδοι για τη διαχείρισή τους. Όπως διαφαίνεται στον Εικόνα 5 μόνο σε επίπεδο ΕΕ, τα συνολικά απόβλητα τροφίμων που μετρήθηκαν το 2020 έφτασαν σχεδόν τα 59 εκατομμύρια τόνους νωπής μάζας. Τα οικιακά απόβλητα τροφίμων αντιπροσώπευαν περισσότερους από 31 εκατομμύρια τόνους νωπής μάζας, με μερίδιο 53 % του συνόλου. Ο δεύτερος τομέας από άποψη

μεριδίου (20 %) ήταν η μεταποίηση, όπου η ποσότητα των μετρημένων αποβλήτων τροφίμων ήταν σχεδόν 12 εκατομμύρια τόνοι νωπής μάζας. Το υπόλοιπο μερίδιο, το ένα τέταρτο του συνόλου των αποβλήτων τροφίμων, προέρχονταν από τον τομέα της πρωτογενούς παραγωγής (6 εκατομμύρια τόνοι, μερίδιο 11 % επί της συνολικής ποσότητας αποβλήτων τροφίμων), τα εστιατόρια και τις υπηρεσίες τροφίμων (πάνω από 5 εκατομμύρια τόνοι, μερίδιο 9 % επί του συνόλου) και τους τομείς του λιανικού εμπορίου και της λοιπής διανομής τροφίμων (πάνω από 4 εκατομμύρια τόνοι, μερίδιο 7 %) [15].



Εικόνα 5. Εκτιμήσεις της Eurostat για την προέλευση των τροφικών αποβλήτων το έτος 2020. [15]

### 2.2.3 Υπόλοιπος Όγκος αποβλήτων

“Άλλοι τύποι αποβλήτων που δεν συγκαταλέγονται στις παραπάνω κατηγορίες είναι τα:

- Μη ανακυκλώσιμα απόβλητα: Σε αυτή τη κατηγορία αναφέρονται τα μη ανακυκλώσιμα υλικά που δεν μπορούν να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν, όπως ορισμένοι τύποι πλαστικών και μη βιοαποικοδομήσιμα υλικά.
- Ηλεκτρονικά απόβλητα (e-waste): Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει υλικά αποβλήτων που παράγονται από ηλεκτρονικά προϊόντα, όπως υπολογιστές, τηλεοράσεις και κινητά τηλέφωνα. Τα ηλεκτρονικά απόβλητα μπορεί να περιέχουν επικίνδυνα υλικά, όπως μόλυβδο και υδράργυρο, και απαιτούν εξειδικευμένη ανακύκλωση για την αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος.

### **3. Μέθοδοι Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων**

#### **3.1 Συμβατικό διαχειριστικό πλάνο επεξεργασίας αστικών λυμάτων**

Η διαδικασία επεξεργασίας των αστικών λυμάτων περιλαμβάνει μια σειρά φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών για την απομάκρυνση των ρύπων και των μολυσματικών ουσιών από τα λύματα πριν αυτά απορριφθούν με ασφάλεια στο περιβάλλον ή επαναχρησιμοποιηθούν.

Τα κύρια στάδια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων είναι τα εξής :

- Προ επεξεργασία
- Πρωτοβάθμια επεξεργασία
- Δευτεροβάθμια επεξεργασία
- Τριτοβάθμια επεξεργασία

##### **3.1.1 Προ-επεξεργασία και Πρωτοβάθμια επεξεργασία**

Πριν την βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι αναγκαία η απομάκρυνση στοιχείων που απαντώνται στα λύματα και μπορεί να προκαλέσουν φθορές ή βλάβες στο μηχανολογικό εξοπλισμό των μετέπειτα διεργασιών. Για το λόγο αυτό, πρέπει να απορριφθούν τεμάχια ξύλου ή πλαστικού, άμμος, λίπη και να επιτευχθεί εξισορρόπηση της παροχής και εξομάλυνση του ρυπαντικού φορτίου. Οι μέθοδοι που ακολουθούνται αυτό το σκοπό είναι ο εσχαρισμός, η εξάμμωση και η λιποσυλλογή [7],[16].

##### **Εσχαρισμός**

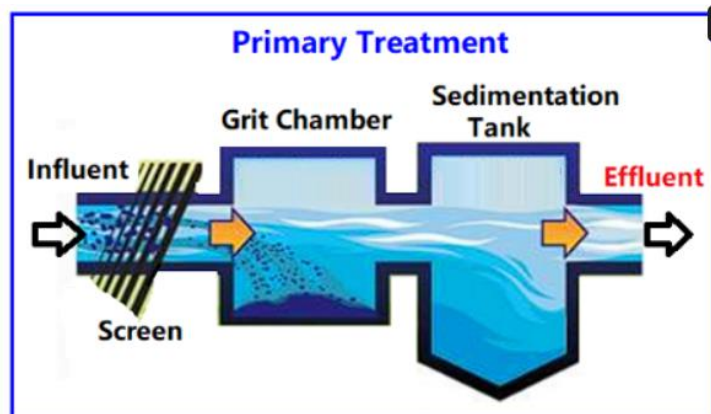
Για το διαχωρισμό των στερεών από τα υγρά απόβλητα γίνεται με τη χρήση σχαρών ή κοσκίνων. Για την επιτυχή απομάκρυνση ογκωδών στερεών (κουρέλια, κομμάτια ξύλου, σακούλες κλπ.) χρησιμοποιούνται είτε παράλληλη ράβδοι είτε σύρματα, είτε κόσκινα, είτε διάτρητοι δίσκοι [7]. Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται μια τυπική σχάρα που χρησιμοποιείται σε κέντρο επεξεργασίας λυμάτων της Μεταμόρφωσης.



Εικόνα 6. Σχάρα εγκατεστημένη στην μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων στην Μεταμόρφωση

## Εξάμμωση

Με την αξιοποίηση δεξαμενών εξάμμωση επιτυγχάνεται η απομάκρυνση ανόργανων σωματιδίων στα φυσικά νερά ή στα υγρά απόβλητα όπως είναι οι κόκκοι άμμου, σωματίδια αργιλίου μέσω της διεργασίας της καθίζησης. Η συγκεκριμένη διεργασία εκμεταλλεύεται τις υψηλότερες ταχύτητες καθίζησης που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα συστατικά σε σύγκριση με αυτές των οργανικών στερεών. Η απομάκρυνση της άμμου είναι απαραίτητη για την περαιτέρω επεξεργασία των λυμάτων καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα δημιουργηθούν φθορές στο μηχανολογικό εξοπλισμό των μετέπειτα μονάδων επεξεργασίας [17]. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 7, η άμμος καθιζάνει στο εσωτερικό της δεξαμενής και το υπόλοιπο υγρό προωθείται για περαιτέρω επεξεργασία.

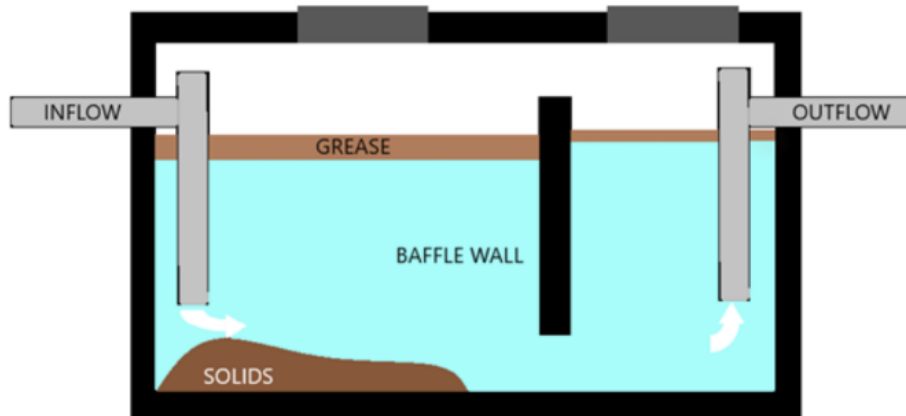


Εικόνα 7. Απεικόνιση συμβατικής διεργασίας εξάμμωσης.

## Λιποσυλλογή

Στα υγρά απόβλητα συχνά απαντώνται και ποσότητες ελαίων-λιπών, έτσι μετά το πέρας της αμμοσυλλογής είναι αναγκαία και μία μονάδα λιποσυλλογής. Ο λιποσυλλέκτης είναι συνήθετα μία ορθογώνια ή κυκλική δεξαμενή στην οποία εισέρχεται το απόβλητο και αφήνεται για ορισμένο χρονικό διάστημα να "ηρεμήσει". Η διαδικασία της λιποσυλλογής επιτυγχάνεται λόγω της σημαντικής διαφοράς της πυκνότητας μεταξύ του νερού και των ελαιωδών ουσιών [16]. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8 οι μεγάλες διαφορές στην πυκνότητα των λιπών-ελαίων και του νερού έχει ως αποτέλεσμα τα πρώτα να ανεβαίνουν λόγω άνωσης στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, από όπου και απομακρύνονται με κατάλληλες διατάξεις επιφανειακής συλλογής, τα δε

βαρέα σωματίδια που κατακάθονται ως ιλύ, απομακρύνονται και αυτά μέσω κατάλληλων διατάξεων.



Εικόνα 8.Λιποσυλλέκτης στον οποία τα λίπη βρίσκονται στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και τα βαρέα σωματίδια στον πυθμένα του.

### Εξισορρόπηση παροχής

Σε τελικό στάδιο, πραγματοποιείται εξισορρόπηση της παροχής σε δεξαμενή εξισορρόπησης, όπου εξουδετερώνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις και εξασφαλίζεται σταθερή παροχή στις επόμενες διεργασίες για ευκολότερο έλεγχο [7].

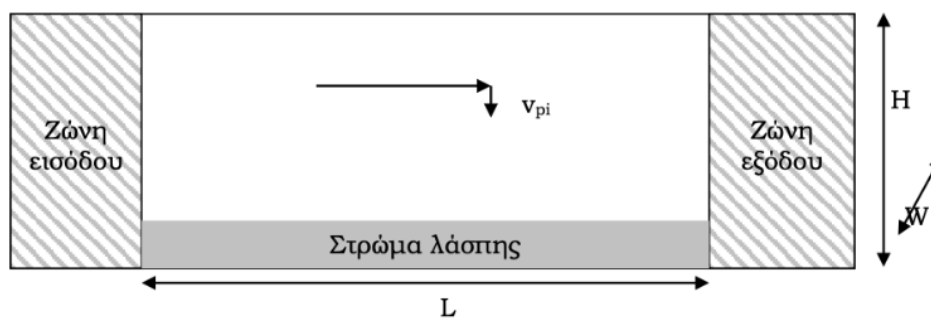
### Κροκίδωση

Στα υγρά αστικά λύματα συναντώνται συνήθως και κολλοειδή σωματίδια. Τα κολλοειδή είναι υλικά (στερεά, υγρά, αέρια) που απαντώνται με τη μορφή λεπτών σωματιδίων (~200nm). Συνήθως είναι αρνητικά φορτισμένα και το ομώνυμο φορτίο τους τα βοηθά να παραμένουν σε διασπορά. Για την απομάκρυνση τους από τα αστικά λύματα είναι αναγκαία η χημική σταθεροποίηση των κολλοειδών διασπορών και για αυτό το λόγο προστίθενται κατάλληλοι ηλεκτρολύτες (κροκιδωτικό μέσο). Έτσι σχηματίζονται μεγαλύτερα συσσωματώματα τα οποία είναι πιο εύκολο να καθιζάνουν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται κροκίδωση και λαμβάνει χώρα σε δεξαμενές κροκίδωσης. Η διεργασία της συσσωμάτωσης-κροκίδωσης πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά τα λύματα υποβάλλονται σε ταχεία ανάμιξη, όπου το κροκιδωτικό μέσο και το απόβλητο έρχονται σε επαφή και στη συνέχεια πραγματοποιείται η διαδικασία της συσσωμάτωσης- καθίζησης, όπου υπό βραδεία ανάδευση τα αυξάνεται το μέγεθος των συσσωματωμάτων, τα οποία εν τέλει καθιζάνουν.

### Πρωτοβάθμια καθίζηση

Τα αιωρούμενα στερεά τα οποία έχουν εισέλθει από την προ επεξεργασία αφού το απόβλητο είναι ακατέργαστο και τα συσσωματώματα που έχουν δημιουργηθεί δευτερογενώς από την κροκίδωση είναι σημαντικό να απομακρυνθούν. Τα σωματίδια αυτά έχουν λίγο μεγαλύτερο ειδικό βάρος από αυτό του νερού για αυτό και αποκτούν μικρές οριακές ταχύτητες καθίζησης.

Για το διαχωρισμό των αιωρούμενων στερεών από τα λύματα αυτά υποβάλλονται σε πρωτοβάθμια καθίζηση. Η διεργασία αυτή έχει ως στόχο την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών (διαστάσεων 0,1 - 0,01 mm) για τη μείωση του ρυπαντικού φορτίου, δηλαδή τη μείωση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου ( $BOD_5$ ) του δυνητικά εξερχόμενου αποβλήτου στη μετέπειτα δευτεροβάθμια επεξεργασία του [7]. Για τον διαχωρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων ακολουθείται καθίζηση Τύπου 2, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 9. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων αυξάνεται, στην πορεία τους προς τον πυθμένα, καθώς αυξάνεται το μέγεθός τους. Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι είτε ορθογωνικές με συνεχή οριζόντια ροή είτε κυλινδρικές, με την ταχύτητα της ροής του αποβλήτου να μειώνεται συνεχώς βοηθώντας τα στερεά να καθιζάνουν στον πυθμένα. Στις κυλινδρικές δεξαμενές η λάσπη απομακρύνεται από τον πυθμένα είτε με αντλίες είτε με ξέστρα. Συνήθως για τα αστικά λύματα επιλέγεται απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, σε αυτό το στάδιο, 50% - 70% και η επακόλουθη μείωση του  $BOD_5$  είναι της τάξης 25% - 40%.



Εικόνα 9. Ορθογωνική δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης Τύπου II

### 3.1.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

#### 3.1.2.1 Διεργασία Ενεργού Ιλύος – Απομάκρυνση οργανικού φορτίου

Σκοπός της δευτερογενούς επεξεργασίας είναι η απομάκρυνση του υπολειπόμενου μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία, οργανικού φορτίου των λυμάτων. Η απομάκρυνση επιτυγχάνεται μέσω βιολογικής οξείδωσης της οργανικής ύλης από αερόβιους ετερότροφους μικροοργανισμούς. Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε δεξαμενές αερισμού όπου η παροχή οξυγόνου επιτυγχάνεται με χρήση μηχανικού αερισμού. Στις βιολογικές διεργασίες που αξιοποιούνται στην επεξεργασία των υγρών αστικών αποβλήτων, είναι σημαντική η ανάπτυξη συγκεκριμένων μικροοργανισμών έτσι ώστε να μειωθεί το ρυπαντικό φορτίο του εκάστοτε αποβλήτου. Κατά τη διάρκεια της βιολογικής οξείδωσης, οι οργανικοί ρύποι που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα χρησιμεύουν ως θρεπτικά συστατικά για τους μικροοργανισμούς της ενεργού ιλύος για ανάπτυξη και αναπαραγωγή. Οι μικροοργανισμοί διασπούν τις σύνθετες οργανικές ενώσεις σε απλούστερες ουσίες αυτή η διαδικασία ονομάζεται βιολογική οξείδωση. Για την βιολογική ανάπτυξη των μικροοργανισμών, αναγκαία είναι η καλή ανάδευση και αερισμός (συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στα λύματα) του αποβλήτου [7] [18].

Για το σχεδιασμό βιολογικών διεργασιών και την ανάλυση της κινητικής που ακολουθεί η ανάπτυξη των μικροοργανισμών και κατά συνέπεια η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, μπορεί να αξιοποιηθεί το πιο απλουστευμένο κινητικό μοντέλο αυτό του Monod. Ο ρυθμός βιολογικής ανάπτυξης περιγράφεται από τη σχέση (1):

$$r_{\text{ανάπτυξης}} = \mu * X \text{ Εξίσωση [1]}$$

όπου,

X: η συγκέντρωση των μικροοργανισμών σε g/L κυτταρικής μάζας: ο ειδικός ρυθμός μικροβιακής ανάπτυξης με μονάδες αντίστροφου χρόνου

Ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} \quad \text{Εξίσωση [2]}$$

S      περιοριστικό υπόστρωμα, συνήθως η πηγή άνθρακα (mg/L)

K<sub>s</sub>     σταθερά κορεσμού (mg/L)

μ<sub>max</sub>   μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης

Σε περίπτωση μεγάλων συγκεντρώσεων υποστρώματος παρεμποδίζεται η βιολογική ανάπτυξη. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{1 + \frac{Km}{S} + \frac{S}{Ki}} \quad \text{Εξίσωση [3]}$$

Το περιοριστικό υπόστρωμα, θεωρείται ότι βρίσκεται σε σταθερή στοιχειομετρική σχέση με τη βιομάζα:

$$YS \rightarrow X \quad \text{Εξίσωση [4]}$$

Έτσι προκύπτει ο ειδικός ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος:

$$r_s = -\frac{1}{Y} r_{x, \text{ανάπτυξης}} \quad \text{Εξίσωση [5]}$$

Ο ρυθμός που αποδομείται η βιομάζα είναι ανάλογος της συγκέντρωσης της βιομάζας:

$$r_d = -k_d * X \quad \text{Εξίσωση [6]}$$

Έτσι τα κινητικά μοντέλα της βιομάζας και του υποστρώματος διαμορφώνονται ως εξής:

$$r_x = \mu(S) * X - k_d * X \quad \text{Εξίσωση [7]}$$

$$r_s = -\frac{\mu(S) * X}{Y} \quad \text{Εξίσωση [8]}$$

Με βάση το κινητικό μοντέλο Monod, μπορούν να περιγράψουν τα ισοζύγια μάζας που λαμβάνουν χώρα σε αντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας (CSTR).

$$V \frac{dS}{dt} = Q_0 S_0 - Q_0 S - \frac{1}{Y} \frac{\mu_{max} S}{K_S + S} X V \quad \text{Εξίσωση [9]}$$

$$V \frac{dX}{dt} = Q_0 X_0 - Q_0 X + \frac{\mu_{max} S}{K_S + S} X V - k_d X V \quad \text{Εξίσωση [10]}$$

όπου:

$S_0$  : Η συγκέντρωση του υποστρώματος στη τροφοδοσία

$X_0$  : Η συγκέντρωση μικροοργανισμών στη τροφοδοσία

$V$  : Ο όγκος

Διαιρώντας τις παραπάνω σχέσεις με τον όγκο και ορίζοντας ρυθμό αραιώσης  $D = \frac{Q_0}{V}$  και σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης ( $\frac{dS}{dt} = \frac{dX}{dt} = 0$ ) οι άνωθεν εξισώσεις παίρνουν τη μορφή:

$$D(S_0 - S) - \frac{1}{Y} \frac{\mu_{max} S}{K_S + S} X = 0 \quad \text{Εξίσωση [11]}$$

$$D(X_0 - X) + \frac{1}{Y} \frac{\mu_{max} S}{K_S + S} X - k_d X = 0 \quad \text{Εξίσωση [12]}$$

Εάν δεν εμπεριέχονται οργανισμοί στην τροφοδοσία ( $X_0 = 0$ ) τότε ισχύει :

$$D = \frac{\mu_{max} S}{K_S + S} - k_d \Rightarrow S = \frac{(D + k_d) K_S}{\mu_{max} - (D + k_d)} \quad \text{Εξίσωση [13]}$$

Στην περίπτωση που ο ρυθμός αραιώσης είναι πολύ μεγάλος, φτάνει στην οριακή τιμή  $D_w = \frac{\mu_{max} S_0}{K_S + S_0} - k_d$  **Εξίσωση [14]**. Σε αυτή τη περίπτωση οι οργανισμοί δεν μπορούν να αναπτυχθούν στον

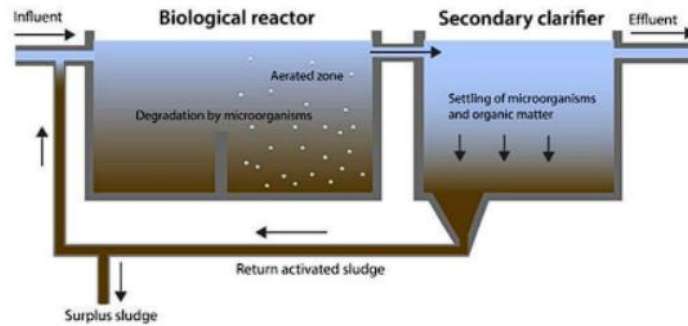


αντιδραστήρα αφού αποβάλλονται από αυτόν με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν που μπορούν να αναπτυχθούν.

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι μια κρίσιμη διαδικασία που αποσκοπεί στην απομάκρυνση των ρύπων και στην εξασφάλιση της διατήρησης των υδάτινων πόρων. Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων που χρησιμοποιούνται, η διεργασία της ενεργού ιλύος ξεχωρίζει ως μια ιδιαίτερα αποτελεσματική προσέγγιση για την αποικοδόμηση οργανικών ρύπων και τον καθαρισμό του νερού. Στη συμβατική διεργασία ενεργού ιλύος, Εικόνα 10, από τη σκοπιά του μηχανολογικού εξοπλισμού περιλαμβάνεται μία δεξαμενή αερισμού (ΔΑ) στην οποία πραγματοποιείται η βιολογική οξείδωση των οργανικών συστατικών του αποβλήτου και μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΔΚ) σε δεύτερο στάδιο για την καθίζηση των μικροοργανισμών και την απομάκρυνση του διαυγούς υγρού [18].

Η επαρκής παροχή αερισμού διασφαλίζει την καλή ανάμειξη του υγρού και εξασφαλίζει τις κατάλληλες συνθήκες για την βιολογική οξείδωση η οποία οδηγεί σε ανάπτυξη των μικροοργανισμών (αφομοίωση) , από την οποία προκύπτουν και διάφορα μεταβολικά προϊόντα όπως  $\text{CO}_2$  ,  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{SO}_4^{2-}$ . Επομένως, η ανίχνευση νιτρικών, θειικών και  $\text{CO}_2$  στο στάδιο της βιολογικής οξείδωσης, σηματοδοτεί την ανάπτυξη νέων μικροοργανισμών [16].

Επιπροσθέτως, οι μικροοργανισμοί, της ενεργού ιλύος, παράγουν λιποσακχαρίτες και άλλες ουσίες οι οποίες προκαλούν τη συσσωμάτωση των μικροοργανισμών σε κροκίδες (bioflocs). Η συγκράτηση των συσσωματωμάτων γίνεται μέσω της διακυτταρικής πηκτής (gel) . Η ενεργός ιλύ, υπό τη μορφή κροκίδων, απορροφά τα αιωρούμενα οργανικά και ανόργανα στερεά τα οποία και οξειδώνει. Αρχικά, το διαλυμένο οξυγόνο σε συνδυασμό με τις οργανικές ενώσεις του αποβλήτου διαχέονται μέσα στην πηκτή. Στη συνέχεια διαπερνούν το κυτταρικό τοίχωμα των μικροοργανισμών και αυτοί με τη σειρά τους μεταβολίζουν το οργανικό φορτίο σε αέρια και νερό. Ταυτόχρονα μέσω αυτής της διαδικασίας εξασφαλίζεται η ανάπτυξη και αναπαραγωγή των βακτηρίων. Για την διατήρηση των βέλτιστων χαρακτηριστικών καθίζησης της ιλύος έχει παρατηρηθεί ότι πρέπει να παραμείνει στο σύστημα τουλάχιστον τέσσερις ημέρες. Για αυτό το λόγο, επιλέγεται, οι κροκίδες μαζί με τους μικροοργανισμούς που παράγονται και καθιζάνουν στη ΔΔΚ, να ανακυκλώνονται εν μέρει και η περίσσεια ιλύος απομακρύνεται από το σύστημα. Αυτό εξασφαλίζει από τη μία, ότι οι μικροοργανισμοί δεν θα συσσωρευτούν στη διεργασία και από την άλλη η ανακυκλοφορία επιτρέπει τη παραμονή των στερεών στο σύστημα για μεγάλο χρονικό διάστημα (SRT) σε σχέση με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής(HRT), μειώνοντας έτσι τον συνολικά απαιτούμενο όγκο για την επιθυμητή απομάκρυνση των οργανικών [7].



Εικόνα 10. Απεικόνιση συμβατικής διεργασίας ενεργούς ιλύος με δεξαμενή αερισμού (Δ.Α), δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Δ.Δ.Κ) και ανακυκλοφορία ιλύος [19].

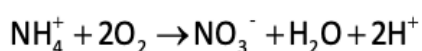
Η επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι μια πολύπλοκη αλλά και ζωτικής σημασίας διαδικασία που αποσκοπεί στην προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας με την αποτελεσματική απομάκρυνση των ρύπων από τα λύματα. Οι διεργασίες βιολογικής οξείδωσης, όπως η ενεργός ιλύς, έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην απομάκρυνση των οργανικών φορτίων από τα λύματα. Ωστόσο, για να επιτευχθεί ολοκληρωμένη απομάκρυνση των ρύπων, είναι σημαντικό να αντιμετωπιστούν και άλλοι βασικοί ρύποι, συμπεριλαμβανομένων των ενώσεων αζώτου και φωσφόρου. Σε αυτό το πλαίσιο αποκτά ιδιαίτερη σημασία η διαδικασία της νιτροποίησης, της απονιτροποίησης και της απομάκρυνσης του φωσφόρου. Η νιτροποίηση είναι η βιολογική μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά, ενώ η απονιτροποίηση περιλαμβάνει τη μείωση των νιτρικών σε αέριο άζωτο υπό ανοξικές συνθήκες. Ταυτόχρονα, η απομάκρυνση του φωσφόρου είναι απαραίτητη για την πρόληψη της υπερβολικής ανάπτυξης φυκιών και της εξάντλησης του οξυγόνου στα υδάτινα οικοσυστήματα.

### 3.1.2.2 Απομάκρυνση αζώτου

Το άζωτο στα υγρά απόβλητα συναντάται σε τέσσερις μορφές: οργανικό άζωτο, αμμωνία, νιτρικά και νιτρώδη ιόντα. Από αυτές, το οργανικό άζωτο και η αμμωνία είναι οι δύο βασικότερες μορφές στις οποίες συναντάται. Φυσικά, το οργανικό άζωτο μπορεί να μετατραπεί σε αμμωνία, κατά την αργή βιολογική διεργασία της αμμωνιοποίησης. Στα υγρά απόβλητα, το συνολικό άζωτο κυμαίνεται, συνήθως, μεταξύ των 20-85mg/L, όπου το 40% πρόκειται για οργανικό, ενώ το υπόλοιπο 60% για αμμωνία [7]. Η νιτροποίηση είναι η βιολογική διαδικασία κατά την οποία η αμμωνία (NH<sub>4</sub>) οξειδώνεται σε νιτρικά (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) μέσω μιας διαδικασίας δύο σταδίων. Η διαδικασία της νιτροποίησης πραγματοποιείται από μια ομάδα βακτηρίων σε αερόβιες συνθήκες, τα οποία είναι ικανά να χρησιμοποιούν ανόργανες ενώσεις ως πηγή ενέργειας [7] [20].

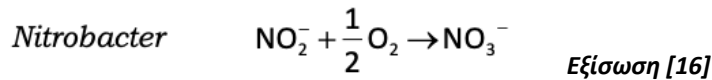
Τα δύο κύρια στάδια της νιτροποίησης είναι τα εξής:

**Οξείδωση της αμμωνίας:** Στο πρώτο στάδιο της νιτροποίησης, η αμμωνία (NH<sub>4</sub>) οξειδώνεται σε νιτρώδη (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) από τα βακτήρια *Nitrosomonas*, κατά κύριο λόγο. Η συνολική αντίδραση είναι η εξής:

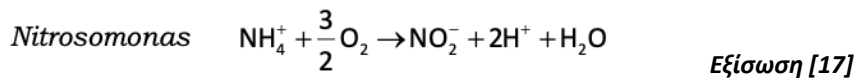


*Εξίσωση [15]*

**Οξείδωση των νιτρικών:** Στο δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης, τα νιτρώδη ( $\text{NO}_2^-$ ) οξειδώνονται σε νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ) από τα βακτήρια που οξειδώνουν τα νιτρώδη ιόντα. Το βήμα αυτό πραγματοποιείται από την ομάδα βακτηρίων που ονομάζεται Nitrobacter. Η συνολική αντίδραση είναι η εξής:



Όπως προαναφέρθηκε η οξείδωση της αμμωνίας απαντάται και στο φυσικό περιβάλλον μέσω αυτών των 2 σταδίων με τη συνολική αντίδραση της αμμωνίας προς νιτρικά ιόντα να παίρνει την εξής μορφή:



Όπως συμπεραίνεται από την παραπάνω αντίδραση, για την πλήρη αντίδρασή της απαιτούνται 4,57 g οξυγόνου ανά g αμμωνιακού αζώτου. Αυτή η απαίτηση σε οξυγόνο ονομάζεται νιτρογενής απαίτηση οξυγόνου και είναι ο βασικός λόγος που απαιτείται απομάκρυνση της αμμωνίας πριν την τελική απόρριψη του αποβλήτου.

### Κινητική Νιτροποίησης

Ο ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων μπορεί να περιγραφεί από την εξής έκφραση:

$$r_A = \widehat{\mu}_A \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \cdot \left( \frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) x_{BA} - b_A x_{BA} \quad \text{Εξίσωση [18]}$$

$x_{BA}$	η συγκέντρωση των αυτότροφων (νιτροποιητικών) οργανισμών
$\widehat{\mu}_A$	είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτότροφων οργανισμών
$S_O$	είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου
$b_A$	είναι ο ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής αυτότροφων οργανισμών
$S_{NH}$	είναι η συγκέντρωση του αμμωνίου
$K_{NH}, K_{OA}$	είναι οι συντελεστές κορεσμού

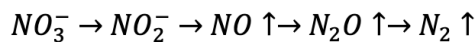
### Απονιτροποίηση

Η διαδικασία της νιτροποίησης είναι μία διαδικασία όπου μειώνει εν μέρει τις απαιτήσεις του αποβλήτου σε οξυγόνο ωστόσο δεν είναι αρκετή για να απορριφθεί το προϊόν αυτής της διεργασίας

στο περιβάλλον. Για την απομάκρυνση των προϊόντων της νιτροποίησης είναι αναγκαία η διαδικασία της απονιτροποίησης.

Η απονιτροποίηση αποτελεί μία βιολογική διαδικασία αναγωγής των νιτρωδών και νιτρικών ιόντων σε αέρια οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ) και τελικά προς αέριο άζωτο. Αυτή η διεργασία πραγματοποιείται από ετερότροφα, προαιρετικά αερόβια βακτήρια και για αυτό η συγκεκριμένη διεργασία πρέπει να πραγματοποιηθεί κάτω από ανοξικές συνθήκες [7]. Ανοξικές καλούνται οι συνθήκες κατά τις οποίες δεν υπάρχει στο περιβάλλον διαθέσιμο μοριακό οξυγόνο αλλά αυτό συναντάται στην μορφή ιόντων. Η συγκέντρωση νιτρικών και νιτρωδών ιόντων στο απόβλητο απουσία αερισμού είναι ικανή να προκαλέσει ανοξικό περιβάλλον. Το οξυγόνο που υπάρχει στα συγκεκριμένα ιόντα χρησιμοποιείται για την οξείδωση του οργανικού φορτίου που υπάρχει διαθέσιμο στο απόβλητο με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται τα ιόντα να μετατρέπονται σε αέριο άζωτο. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως για την επιτυχή απονιτροποίηση πέραν των ανοξικών συνθηκών, απαιτείται και διαθέσιμη πηγή οργανικού άνθρακα.

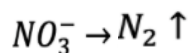
Η πλήρης σειρά των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα είναι η εξής:



*Εξίσωση [19]*

#### Κινητική απονιτροποίησης

Για την περιγραφή της κινητικής απονιτροποίησης γίνεται η παραδοχή για λόγους απλότητας, ότι πραγματοποιείται μια διεργασία αναγωγής ενός σταδίου:



*Εξίσωση [20]*

Για την περιγραφή της επίδρασης των βασικών υποστρωμάτων (νιτρικών και οργανικού άνθρακα) χρησιμοποιείται η κινητική Monod. Η εξίσωση που περιγράφει τον ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των απονιτροποιητικών βακτηρίων είναι:

$$\mu_H = \mu_H' \frac{S_{\text{NO}}}{K_{\text{NO}} + S_{\text{NO}}} \frac{S}{K_S + S} \quad \text{Εξίσωση [21]}$$

Η ανάπτυξη των απονιτροποιητικών βακτηρίων περιγράφεται από τη σχέση:

$$r_H = \mu_H' \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{\text{NO}}}{K_{\text{NO}} + S_{\text{NO}}} \cdot X_{\text{BH}} - b_H X_{\text{BH}}$$

*Εξίσωση [22]*

η απομάκρυνση των απονιτροποιητικών βακτηρίων δίνεται από τη σχέση:

$$r_{NO} = -\frac{1}{Y'}(r_H + b_H X_{BH})$$

Εξίσωση [23]

και τέλος η απομάκρυνση των οργανικών από:

$$r_S = -\frac{1}{Y_H}(r_H + b_H X_{BH})$$

Εξίσωση [24]

$\mu_H$  ειδικός ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης (τυπική τιμή  $\sim 4,2d^{-1}$ )

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

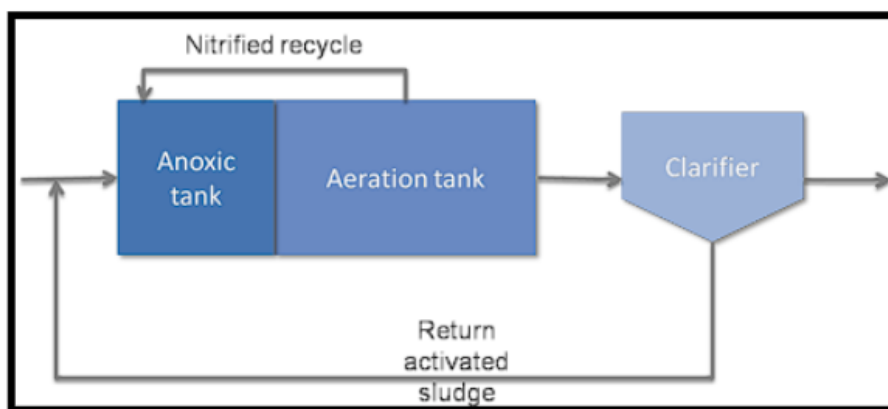
$b_H$  ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής (0,5d<sup>-1</sup>)

$S_{NO}$  συγκέντρωση NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg-N/L)

$S$  συγκέντρωση οργανικών (mg-COD/L)

$Y'$  συντελεστής αποδοτικότητας ( $\sim 5,8$ mg COD κυττ./mg-N)

$Y_H$  συντελεστής αποδοτικότητας ( $\sim 0,67$ mg COD κυττ./mgCOD)



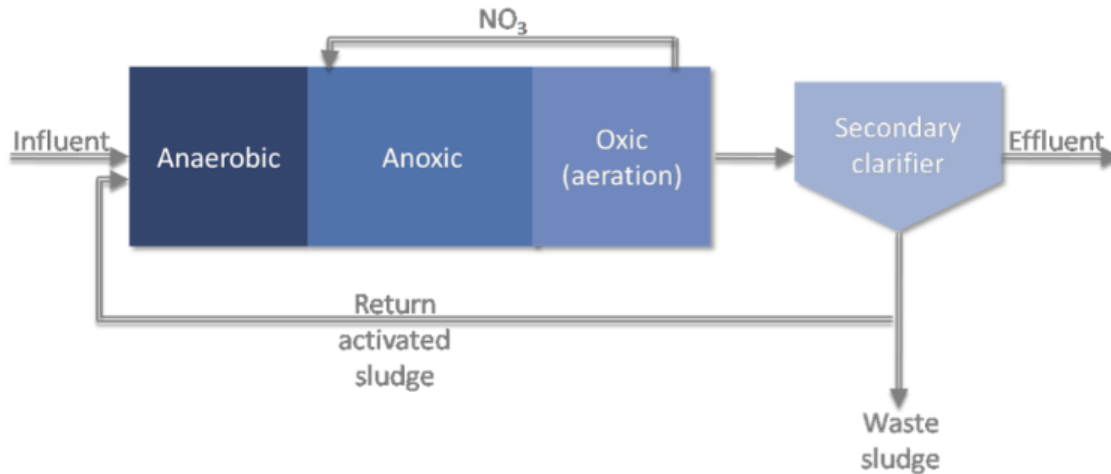
Εικόνα 11. Διάγραμμα ροής κατά το οποίο πραγματοποιείται η απομάκρυνση του αζώτου [21].

### **3.1.2.3 Απομάκρυνση Φωσφόρου**

Ο φώσφορος συναντάται στα υγρά αστικά λύματα σε τρεις μορφές: ορθοφωσφορικά και πολυφωσφορικά ιόντα, οργανικός φωσφόρος. Κατά την πρωτοβάθμια καθίζηση, απομακρύνεται ένα ποσοστό του 10%, ενώ κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, δεσμεύεται ένα μικρό ποσό για την μικροβιακή ανάπτυξη των βακτηριών. Το μεγαλύτερο ποσοστό διαλύεται και προκείμενου να αφαιρεθεί, απαιτείται προχωρημένη επεξεργασία. Η απομάκρυνσή του επιτυγχάνεται με ποικίλες μεθόδους, φυσικές, χημικές και βιολογικές [7]. Η σημαντικότερη βιολογική μέθοδος αφορά στην δέσμευση φωσφόρου από συγκεκριμένη ομάδα. Η εναλλάξ έκθεση των μικροοργανισμών σε αερόβιες και σε αναερόβιες συνθήκες επιτυγχάνουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών που ονομάζονται φωσφοροβακτήρια και είναι ικανοί να απομακρύνουν από το απόβλητο το φώσφορο σε ποσοστό από 70% έως και 90%[7]. Για την απομάκρυνση του φωσφόρου έχει σχεδιαστεί διάταξη που επιτυγχάνει τη συνδυασμένη οξείδωση άνθρακα και απομάκρυνση φωσφόρου από τα απόβλητα και περιλαμβάνει ένα αναερόβιο και ένα αερόβιο στάδιο σε σειρά. Αρχικά, στο αναερόβιο στάδιο, τα φωσφοροβακτήρια απελευθερώνουν ένα μέρος του ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου τους φωσφόρου σε μορφή διαλυτού φωσφόρου, ενώ, παράλληλα, συντελείται και μερική μείωση του BOD. Έπειτα, στο αερόβιο στάδιο, τα κύτταρα των φωσφοροβακτηρίων προσλαμβάνουν τον φωσφόρο αυτό, ο οποίος και τελικά απομακρύνεται από το υγρό κατά την απομάκρυνση της πλούσιας σε φωσφορικά ιλύος. Η ανακυκλοφορία της ιλύος στην είσοδο και η ανάμειξή της με το εισερχόμενο απόβλητο δημιουργεί κατάλληλο χρόνο παραμονής για την ανάπτυξη και την διατήρηση των φωσφοροβακτηρίων στο σύστημα.

### **3.1.2.4 Ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικών, αζώτου και φωσφορικών**

Με κατάλληλο συνδυασμό αερόβιων, ανοξικών και αναερόβιων συνθηκών έχουν αναπτυχθεί διεργασίες που επιτυγχάνουν την ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικού, αζώτου και φωσφόρου. Η εν λόγω διάταξη έχει ένα αναερόβιο στάδιο όπου πραγματοποιείται η απελευθέρωση του φωσφόρου. Στη συνέχεια, υπάρχει ένα ανοξικό στάδιο κατά το οποίο γίνεται η απονιτροποίηση του αποβλήτου και συγκεκριμένα τα νιτρώδη και τα νιτρικά μετατρέπονται σε αέριο άζωτο. Τέλος το αερόβιο στάδιο δημιουργεί κατάλληλες συνθήκες για τη περεταίρω διάσπαση του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικά και νιτρώδη ιόντα (νιτροποίηση) και την βιολογική οξείδωση του οργανικού φορτίου. Με ανακυκλοφορία του ανάμικτου υγρού μεταξύ αερόβιου και ανοξικού σταδίου πραγματοποιείται η απομάκρυνση των αζωτούχων στοιχείων του αποβλήτου. Η απομάκρυνση του φωσφόρου επιτυγχάνεται μέσω ανάπτυξης φωσφοροβακτηρίων τα οποία αναπτύσσονται μέσω της εναλλαγής της ιλύος μεταξύ αερόβιων και αναερόβιων συνθηκών .

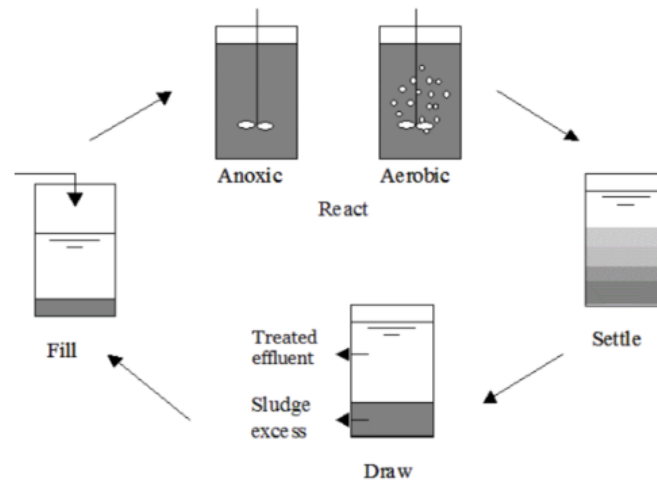


Εικόνα 12. . Διεργασία ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικών και θρεπτικών από τα αστικά απόβλητα [21].

### 3.1.2.5 Αντιδραστήρας Διαλείπουσας Λειτουργίας SBR (Sequencing Batch Reactor)

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα ροής της Εικόνας 12, για την ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών απαιτείται η έκθεση του προς επεξεργασία αποβλήτου σε διαφορετικές φυσικοχημικές συνθήκες. Η εναλλαγή συνθηκών που αναφέρθηκε μεταφράζεται σε διαχωρισμό φυσικοχημικών συνθηκών χωρικά. Το διάγραμμα της Εικόνας 12 απεικονίζει τρεις διακριτές δεξαμενές και την τελική δεξαμενή καθίζησης. Ο αντιδραστήρας διαλείπουσας SBR είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η έννοια του αντιδραστήρα SBR σε αντίθεση με την ευρέως χρησιμοποιούμενη δεξαμενή αερισμού διαφοροποιείται στην ικανότητα μεταβολής των συνθηκών μιας διεργασίας χρονικά, αντί της χωρικής μεταβολής συνθηκών που παρατηρείται σε ένα σύστημα ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικών και θρεπτικών συστατικών. Ο SBR δεν τροφοδοτείται συνεχώς αλλά ανά κύκλο λειτουργίας. Κάθε κύκλος λειτουργίας αποτελείται από 5 στάδια. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας του SBR πραγματοποιούνται μία σειρά από βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες. Ο αντιδραστήρας μπορεί να λειτουργήσει με τρόπο τέτοιο, ώστε να επιτευχθεί κάθε επιθυμητός συνδυασμός οξειδωσης οργανικής ύλης, μείωσης αζώτου και απομάκρυνσης φωσφόρου. Οι βιοαντιδραστήρες SBR προσφέρουν μια ποικιλία εφαρμογών για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και μπορούν να επιτύχουν υψηλά επίπεδα απόδοσης στην απομάκρυνση οργανικής και ανόργανης ύλης παρέχοντας επεξεργασμένο νερό υψηλής ποιότητας. Σε αντίθεση με άλλα συστήματα ενεργού ιλύος όπου οι διεργασίες του αερισμού και της καθίζησης λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικούς αντιδραστήρες, στα συστήματα SBR όλες οι διεργασίες γίνονται σε ένα αντιδραστήρα, με συνεχή διαδοχή. Πιο συγκεκριμένα, με βάση το προς επεξεργασία απόβλητο και τα χαρακτηριστικά του, σχεδιάζεται διεργασία, με στάδια τα οποία διαρκούν συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και διαδέχονται το ένα το άλλο, απομακρύνοντας έτσι σταδιακά το ρυπαντικό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα του SBR απαρτίζεται από πέντε (5) βασικά στάδια (Εικόνα 13). Αρχικά, λαμβάνει χώρα το στάδιο της πλήρωσης (γεμίσματος) της δεξαμενής (Fill), όπου ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται, στην συνέχεια ακολουθεί το κυρίως στάδιο της αντίδρασης (React) το οποίο μπορεί να αποτελείται από υπό-στάδια εάν απαιτείται επιβολή διαφορετικών συνθηκών. Χαρακτηριστικά το στάδιο της αντίδρασης μπορεί να περιλαμβάνει αερόβιες, αναερόβιες και ανοξικές συνθήκες σε αλληλουχία ή και εναλλασσόμενα. Στην συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της καθίζησης (settle) όπου

ο αντιδραστήρας προσομοιάζει την συμπεριφορά της δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης. Τέλος ακολουθούν τα δύο τελικά στάδια κατά τα οποία απομακρύνονται το επεξεργασμένο απόβλητο η περίσσεια ιλύος. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο SBR δεν αδειάζει πλήρως, αλλά στα 2/3 του όγκου του. Το 1/3 του ενεργού του όγκου καταλαμβάνεται μονίμως από την ενεργό ιλύ.[22].



Εικόνα 13. Απεικόνιση της αλληλουχίας σταδίων ενός κύκλου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα SBR.

Σε σύγκριση με άλλους τύπους συστημάτων, ο βιοαντιδραστήρας SBR παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων:

1. Ευελιξία: Ο αντιδραστήρας τύπου SBR λόγω της ικανότητάς του να λειτουργεί με διαφορετικούς τρόπους και να διαμορφώνεται βάση των απαιτήσεων του επεξεργαζόμενου αποβλήτου, είναι ιδιαίτερα ευέλικτος.
2. Υψηλή απόδοση επεξεργασίας: Ο βιοαντιδραστήρας SBR είναι ικανός να επιτύχει υψηλές αποδόσεις επεξεργασίας τόσο για τα θρεπτικά συστατικά όσο και για την οργανική ύλη, καθιστώντας τον κατάλληλο για την επεξεργασία διαφόρων τύπων λυμάτων.

Ο SBR αντιδραστήρας έχει μεταξύ άλλων και ορισμένους περιορισμούς:

1. Υψηλή κατανάλωση ενέργειας: Ο βιοαντιδραστήρας SBR χρησιμοποιεί πολλή ενέργεια για την ανάμιξη, τον αερισμό και την παρακολούθηση, γεγονός που αυξάνει το κόστος λειτουργίας.
2. Πολύπλοκο σύστημα ελέγχου: Ο βιοαντιδραστήρας SBR απαιτεί ένα πολύπλοκο σύστημα ελέγχου για να λειτουργήσει σωστά, το οποίο μπορεί να είναι δύσκολο να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί στην πράξη, ιδίως για μεγαλύτερα συστήματα επεξεργασίας.



3. Χαμηλή χωρητικότητα: Ο SBR είναι λιγότερο κατάλληλος για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, καθώς έχουν συγκριτικά περιορισμένη δυναμικότητα επεξεργασίας σε σύγκριση με άλλες μεθόδους επεξεργασίας.

### 3.1.3 Τριτογενής επεξεργασία

Η τριτογενής επεξεργασία λαμβάνει χώρα για την περαιτέρω επεξεργασία των διαλυμένων οργανικών ενώσεων στα υγρά απόβλητα, όταν η εκροή της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας δεν ικανοποιεί τις νομοθετικές απαιτήσεις για τον αποδέκτη ή όταν είναι επιθυμητή η επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων. Επιπρόσθετα μέσω της τριτογενούς επεξεργασίας, απομακρύνονται ενώσεις όπως μέταλλα τα οποία δεν μπορούν να απομακρυνθούν μέσω της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας αλλά και για την απενεργοποίηση παθογόνων μικροοργανισμών.

### Απολύμανση

Ο σχεδιασμός των δεξαμενών απολύμανσης έχει ως στόχο την επιλεκτική καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών που υπάρχουν στα αστικά λύματα ( $10^6 - 10^9$  ανά 100ml). Οι εγκαταστάσεις απολύμανσης σχεδιάζονται ως αντιδραστήρες εμβολικής ροής. Οι μικροοργανισμοί στόχος είναι βακτήρια, ιοί και κύστες. Η απολύμανση γίνεται με χημικά μέσα (χλώριο, βρώμιο, ιώδιο, όζον και πολλά άλλα χημικά), με φυσικά μέσα (θερμότητα και φως - ηλιακό ή υπεριώδες) και με ακτινοβολία (κυρίως με ακτίνες γ) [7].

### Αντίστροφη ώσμωση

Όταν στις δύο πλευρές μιας ημιπερατής μεμβράνης βρίσκονται διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης, είτε ιόντα είτε σε μη φορτισμένα μόρια, θα εμφανιστεί κίνηση (των μορίων του διαλύτη) μέσα από τους πόρους της μεμβράνης προς την κατεύθυνση εξομοίωσης των συγκεντρώσεων, δηλαδή από το πιο αραιό στο πυκνότερο. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται και ως ώσμωση. Για αυτό το λόγο πρέπει να εφαρμοστεί πίεση μεγαλύτερη από την ωσμωτική έτσι ώστε ο διαλύτης να περάσει από το πυκνότερο σε αραιότερο διάλυμα. Αυτή η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιείται στον καθαρισμό του νερού και την απομάκρυνση ιόντων από το νερό (αφαλάτωση), καθώς τα ιόντα/μόρια της διαλυμένης ουσίας συγκρατούνται πάνω στη μεμβράνη [7].

## 3.2 Αναερόβια Χώνευση

Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων μεθόδων επεξεργασίας των αστικών λυμάτων η βιολογική οξείδωση έχει αναδειχθεί ως αρκετά αποτελεσματική μέθοδος για την ταυτόχρονη απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, του αζώτου και του φωσφόρου. Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι διεργασίες αυτές έχουν εγγενείς περιορισμούς. Ένας πρωταρχικός περιορισμός είναι η συνεχής απαίτηση για σταθερή παροχή οξυγόνου. Οι αερόβιες συνθήκες πρέπει να διατηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας για να υποστηρίζεται η ανάπτυξη και η δραστηριότητα των αερόβιων μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για την οξείδωση της οργανικής ύλης. Αυτό απαιτεί τη

χρήση ενεργοβόρων συστημάτων αερισμού, τα οποία καταναλώνουν σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεχής ανάγκη για οξυγόνο οδηγεί σε υψηλό λειτουργικό κόστος, καθιστώντας τη διαδικασία οικονομικά απαιτητική. Αυτό έχει οδηγήσει στη διερεύνηση και υιοθέτηση εναλλακτικών τεχνολογιών, όπως η αναερόβια χώνευση, οι οποίες προσφέρουν σαφή πλεονεκτήματα έναντι της βιολογικής οξειδωσης.

Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιολογική διεργασία που λειτουργεί απουσία οξυγόνου, χρησιμοποιώντας αναερόβιους μικροοργανισμούς για τη διάσπαση της οργανικής ύλης και την παραγωγή βιοαερίου. Σε αντίθεση με τη βιολογική οξειδωση, η αναερόβια χώνευση όχι μόνο επιτυγχάνει την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου αλλά προσφέρει και πρόσθετα οφέλη, όπως ανάκτηση ενέργειας και μείωση του όγκου της λύσης.

**pH:** Για την ορθή λειτουργία της διεργασίας και το σχηματισμό μεθάνιου θα πρέπει το pH να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 6,5 έως 8,5 [28]. Ενδεικτικά, οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί παρουσιάζουν βέλτιστο pH στο εύρος μεταξύ 6,5-8,2 με βέλτιστη τιμή pH το 7,0. Παράλληλα, το βέλτιστο εύρος για το στάδιο της οξεογένεσης είναι μεταξύ 5,5 -6,5 [29]. Τα βακτήρια που είναι υπεύθυνα για τη απομάκρυνση της οργανικής ύλης είναι ευαίσθητα στις μεταβολές του pH. Επιπροσθέτως, η διαλυτότητα ορισμένων οργανικών μορίων μπορεί επίσης να επηρεαστεί από τις μεταβολές του pH, γεγονός που μπορεί να έχει αντίκτυπο στη διαδικασία.

**Σύνθεση του υποστρώματος:** Η διεργασία μπορεί να επηρεαστεί από τη σύσταση του υποστρώματος. Το υπόστρωμα αποτελείται συνήθως από μια ποικιλία οργανικών ενώσεων, συμπεριλαμβανομένων υδατανθράκων, λιπιδίων, πρωτεϊνών κλπ. Η σύνθεση του υποστρώματος μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την πηγή της οργανικής ύλης. Μια σημαντική πτυχή της σύνθεσης του υποστρώματος είναι η αναλογία άνθρακα προς άζωτο (C/N). Ο λόγος αυτός είναι ένα μέτρο των σχετικών ποσοτήτων άνθρακα και αζώτου στο υπόστρωμα. Ένας λόγος C/N 20-30 θεωρείται βέλτιστος για τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Εάν ο λόγος C/N είναι πολύ υψηλός, η διεργασία μπορεί να περιοριστεί σε άζωτο, οδηγώντας σε μείωση της παραγωγής βιοαερίου. Εάν ο λόγος C/N είναι πολύ χαμηλός, η διεργασία μπορεί να περιοριστεί σε άνθρακα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων (VFA) και σε μείωση του pH [26].

**Διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά:** Οι μικροοργανισμοί χρειάζονται ορισμένα θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο, φώσφορο και ιχνοστοιχεία για να εξουδετερώσουν την οργανική ύλη και να αναπαραχθούν. Έτσι ελλείψεις σε θρεπτικά στοιχεία μπορεί να οδηγήσουν σε επιβράδυνση της διεργασίας ή θανάτωση των μικροοργανισμών. Αντίστοιχα, η υπερβολική ποσότητα θρεπτικών συστατικών μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα, καθώς μπορεί να προωθήσει την ανάπτυξη επιβλαβών βακτηρίων για τη διεργασία.

**Ανασταλτικές ουσίες:** Τα βαρέα μέταλλα και άλλες οργανικές ενώσεις που μπορούν να εμποδίσουν την αναερόβια χώνευση. Αυτές οι ουσίες μπορεί να συσσωρευτούν στον χωνευτή και να επηρεάσουν το ρυθμό ανάπτυξης του πληθυσμού των βακτηρίων. Επιπλέον, μεγάλες συγκεντρώσεις λιπαρών οξέων (VFAs) στον χωνευτή μπορεί να οδηγήσει σε τοξικότητα και να προκαλέσει αλλαγή στις τιμές του pH, όπως επίσης η επικάλυψη των μικροοργανισμών με ένα στρώμα από λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας οδηγεί στην επίπλευσή τους και στην έκλυση από τον αντιδραστήρα [30].

**Ανάμιξη:** Για την αποτελεσματική λειτουργία του αναερόβιου χωνευτή, πρέπει να γίνεται καλή ανάμιξη του υποστρώματος και των μικροοργανισμών. Οι νεκρές ζώνες και η συσσώρευση

στερεών στο εσωτερικό του αντιδραστήρα λειτουργούν ανασταλτικά για τη διεργασία καθώς οι μικροοργανισμοί δεν εκτίθενται σε κάθε συστατικό του υποστρώματος ή σε ένα μέρος αυτού.

### **Λειτουργικές παράμετροι συστημάτων αναερόβιας χώνευσης**

#### **Ρυθμός οργανικής φόρτισης (Organic Loading Rate -OLR)**

Ο ρυθμός οργανικής φόρτισης είναι μια κρίσιμη παράμετρος λειτουργίας στην αναερόβια χώνευση, καθώς καθορίζει την ποσότητα οργανικής ύλης που τροφοδοτείται στον χωνευτή ανά μονάδα όγκου ημερησίως. Το οργανικό φορτίο που τροφοδοτείται, επηρεάζει τον ρυθμό παραγωγής βιοαερίου και τη σταθερότητα της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης. Υψηλότερα OLR οδηγούν γενικά σε υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής βιοαερίου, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε αστάθεια του συστήματος, εάν οι μικροοργανισμοί δεν μπορούν να συμβαδίσουν με τον ρυθμό μετατροπής της οργανικής ύλης. Αντίθετα, οι χαμηλότεροι OLR μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλότερους ρυθμούς παραγωγής βιοαερίου αλλά σταθερότερες συνθήκες μετατροπής. Πρακτικά, η επιλογή του συστήματος (το μέγεθος και ο τύπος του χωνευτή) βασίζεται σε έναν συμβιβασμό μεταξύ της μεγίστης παραγωγής βιοαερίου και της οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας. Από αυτή την άποψη, το οργανικό φορτίο είναι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας, η οποία δείχνει πόση οργανική ύλη σε μπορεί να τροφοδοτηθεί στο χωνευτή, ανά κυβικό μέτρο όγκου και μονάδα χρόνου, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$OLR = \frac{Q \times c}{Vr} \quad \text{Εξίσωση [25]}$$

όπου,

OLR: ρυθμός οργανικής φόρτισης (L/d\*m<sup>3</sup>)

Q:παροχή τροφοδοτούμενου υποστρώματος ανά μονάδα χρόνου (L/d)

c: συγκέντρωση οργανικής ουσίας (%)

VR: όγκος αναερόβιου χωνευτή

#### **Υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time -HRT)**

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους αποτελεί ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ενός συστήματος αναερόβιας χώνευσης, δηλαδή το χρονικό διάστημα που διατηρείται το υπόστρωμα στη δεξαμενή του χωνευτή. Ο HRT επηρεάζει τον ρυθμό και την έκταση της μετατροπής της οργανικής ύλης και τη σταθερότητα της διαδικασίας αναερόβιας χώνευσης. Μεγαλύτερα HRT έχουν γενικά ως αποτέλεσμα πληρέστερη χώνευση της οργανικής ύλης και υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής βιοαερίου. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες HRT μπορούν επίσης να οδηγήσουν στη συσσώρευση περίσσειας βιομάζας στο σύστημα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση. Οι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για τη διαδικασία χρειάζονται χρόνο για να διασπάσουν το υπόστρωμα και να παράγουν βιοαέριο. Έτσι μικροί χρόνοι παραμονής οδηγούν σε αδυναμία των μικροοργανισμών να καταναλώσουν την οργανική ύλη και να αναπαραχθούν

γεγονός που οδηγεί σε έκλυση, άρα ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να εξασφαλιστεί ότι η ποσότητα των βακτηρίων που αφαιρείται με το χωνεμένο υπόλειμμα δεν θα είναι υψηλότερη από την ποσότητα των αναπαραγομένων βακτηρίων. Ο ιδανικός χρόνος HRT ποικίλλει ανάλογα με το συγκεκριμένο υπόστρωμα που διασπάται [28].

$$HRT = \frac{Vr}{Q}$$

**Εξίσωση [26]**

Όπου:

**VR:** ο όγκος του χωνευτή (m<sup>3</sup>)

**Q:** Η παροχή του υποστρώματος (m<sup>3</sup>/d)

### **Συστήματα αναερόβιας χώνευσης**

#### **Αντιδραστήρες πλήρης Ανάμιξης (Continuous Stirring Tank Reactor- CSTR)**

Ο αντιδραστήρας συνεχούς ανάδευσης CSTR είναι ένας τύπος αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων και την παραγωγή βιοαερίου. Επίσης αυτός ο τύπος αντιδραστήρα είναι γνωστός για την αξιοπιστία τους και τη δυνατότητα του να επεξεργάζεται απόβλητα με υψηλές οργανικές συγκεντρώσεις. Σε ένα σύστημα CSTR οι μικροοργανισμοί αιωρούνται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλή επαφή του υποστρώματος και της λάσπης [29]. Για την επιτυχημένη λειτουργία των αντιδραστήρων τύπου CSTR είναι επιτακτικοί οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής για αυτό και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξουδετέρωση χαμηλού ρυπαντικού φορτίου [31]. Για την αύξηση του χρόνου κατακράτησης των στερεών (Solid Retention Time-SRT) ανεξάρτητα από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, προτάθηκε ο συνδυασμός του συστήματος CSTR με τη προσθήκη μιας δεξαμενής καθίζησης, με ανακυκλοφορία λάσπης (Εικόνα 14) [31]. Ωστόσο, σε αυτή τη περίπτωση δημιουργούνται εκ νέου προβλήματα κυρίως όσον αφορά το διαχωρισμό των υγρών αποβλήτων και της λάσπης στη δεξαμενή καθίζησης.

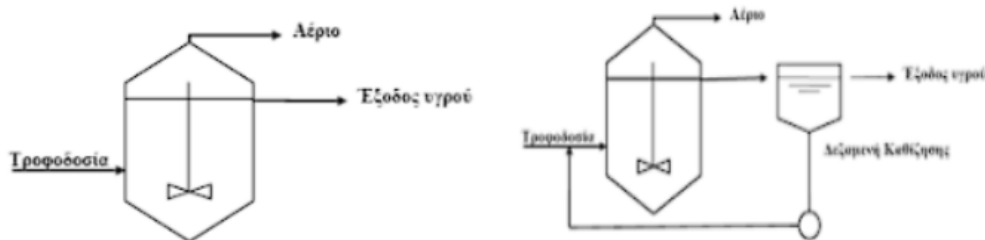
Σε σύγκριση με άλλους τύπους αναερόβιων συστημάτων, ο βιοαντιδραστήρας CSTR παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων:

1. Υψηλή σταθερότητα της διαδικασίας: Η διεργασία μπορεί να χειριστεί μεταβλητή πρώτη ύλη και να αντέξει διακυμάνσεις στο ρυθμό φόρτωσης οργανικών ουσιών, γεγονός που την καθιστά πιο σταθερή.
2. Υψηλή απόδοση μετατροπής: Η διεργασία CSTR μπορεί να επιτύχει υψηλό βαθμό μετατροπής της οργανικής ύλης σε βιοαέριο, συνήθως περίπου 60%. Η απόδοση μετατροπής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος της πρώτης ύλης, ο ρυθμός φόρτωσης οργανικών ουσιών και οι συνθήκες λειτουργίας.

3. Ευέλικτες επιλογές πρώτης ύλης: Ο CSTR μπορεί να χειριστεί ένα ευρύ φάσμα τύπων οργανικών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων τροφίμων, της ζωικών και γεωργικών υπολειμμάτων.

Παρά τα πλεονεκτήματα, πρέπει να ληφθούν υπόψη και διάφοροι περιορισμοί που διέπουν τη λειτουργία ενός συστήματος CSTR :

1. Χαμηλός ρυθμός παραγωγής μεθανίου: Η διαδικασία CSTR έχει σχετικά χαμηλό ρυθμό παραγωγής μεθανίου σε σύγκριση με άλλα συστήματα αναερόβιας χώνευσης.
2. Χρόνος παραμονής (HRT) και αδυναμία διαχείρισης χαμηλού ρυπαντικού φορτίου: Για την επιτυχημένη λειτουργία τους, απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι παραμονής το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα οι αντιδραστήρες να μη μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε απόβλητα χαμηλού ρυπαντικού φορτίου.



Εικόνα 14. Αντιδραστήρες τύπου CSTR. Στα αριστερά ο αντιδραστήρας έχει και δεξαμενή καθίζησης [32].

### Anaerobic Baffled Reactor - ABR

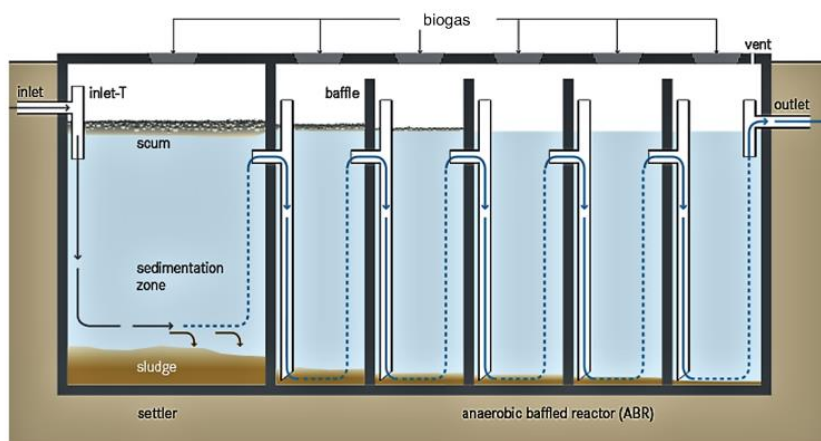
Ο βιοαντιδραστήρας ABR, επίσης γνωστός ως αναερόβιος αντιδραστήρας με διαφράγματα, είναι ένας τύπος αναερόβιου συστήματος επεξεργασίας λυμάτων, ο οποίος αποτελείται από δύο διαμερίσματα, ένα ανοδικό και ένα καθοδικό τα οποία επικοινωνούν μέσω ενός διαφράγματος στον πυθμένα του αντιδραστήρα. Σκοπός των διαφραγμάτων είναι να ενισχύουν την καθίζηση των ιζημάτων και να επιβραδύνουν τη ροή των λυμάτων, ενώ παράλληλα επιτρέπουν στα αναερόβια βακτήρια να διασπούν οργανικό υλικό και να παράγουν βιοαέριο.

Οι μικροοργανισμοί ανυψώνονται και καθιζάνουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής και την παραγωγή βιοαερίου, τελικά όμως τείνουν να συσσωρεύονται στο κάτω τμήμα του χωνευτήρα. Με τον τρόπο αυτό το απόβλητο έρχεται σε επαφή με μεγαλύτερη ποσότητα λάσπης, καθώς διέρχεται μέσα από τον αντιδραστήρα [33]. Αυτό επιτρέπει το διαχωρισμό των διαφόρων σταδίων της αναερόβιας χώνευσης και βελτιστοποιεί τις συνθήκες για τους μικροοργανισμούς που συμμετέχουν στη διαδικασία.

Σε σύγκριση με άλλους τύπους αναερόβιων συστημάτων, ο βιοαντιδραστήρας ABR παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων [29][34]:

Με τον βιοαντιδραστήρα ABR είναι δυνατή η υψηλή απόδοση απομάκρυνσης οργανικής ύλης, αζώτου και φωσφόρου

1. Απλός σχεδιασμός και οικονομική κατασκευή
2. Μειωμένη παραγωγή ιλύος επειδή τα στερεά καθιζάνουν σε κάθε διαμέρισμα, το σύστημα παράγει λιγότερη ιλύ από τα παραδοσιακά αναερόβια συστήματα.
3. Απλή λειτουργία και συντήρηση καθώς ο βιοαντιδραστήρας ABR απαιτεί χαμηλή εισροή ενέργειας και δεν απαιτεί χημικές ουσίες, καθιστώντας σχετικά εύκολη τη λειτουργία και τη συντήρησή του σε άριστη κατάσταση.



Εικόνα 15. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και τρόπου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα τύπου ABR πολλαπλών διαμερισμάτων[35].

Παρά τα πλεονεκτήματα, πρέπει να ληφθούν υπόψη και διάφοροι περιορισμοί που διέπουν τη λειτουργία ενός συστήματος ABR :

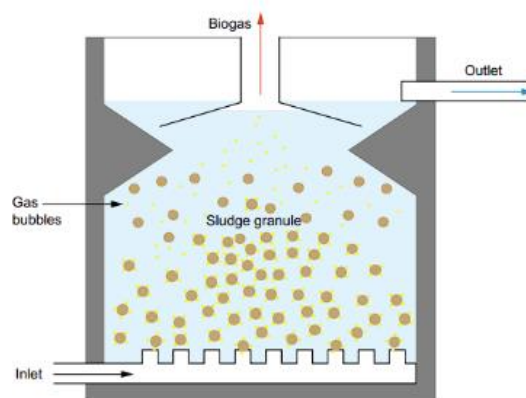
1. Τεράστιο αποτύπωμα: Το μεγάλο αποτύπωμα του βιοαντιδραστήρα ABR είναι ένα από τα βασικά μειονεκτήματά του. Ο σχεδιασμός του συστήματος με πολλά διαμερίσματα καθιστά αναγκαία την ανάγκη μεγαλύτερης έκτασης από ό,τι τα άλλα συστήματα αναερόβιων αντιδραστήρων.
2. Μειωμένος ρυθμός οργανικής φόρτισης: Σε σύγκριση με άλλα είδη αναερόβιων χωνευτήρων, ο βιοαντιδραστήρας ABR έχει χαμηλότερο ρυθμό οργανικής φόρτισης (OLR). Αυτό οφείλεται στην αρχιτεκτονική του συστήματος, η οποία θέτει περιορισμούς στο πόση οργανική ύλη μπορεί να εισαχθεί σε κάθε διαμέρισμα χωρίς να υποβαθμιστεί η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης της οργανικής ύλης.

## Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor - UASBR

Ο UASBR είναι ένας τύπος συστήματος αναερόβιας χώνευσης που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την επεξεργασία διαφόρων τύπων λυμάτων. Ο UASBR είναι ένας αναερόβιος χωνευτής ενός σταδίου. Ο άνωθεν βιοαντιδραστήρας είναι ένας τύπος αναερόβιου αντιδραστήρα με ανοδική ροή του υγρού αποβλήτου. Το προς επεξεργασία απόβλητο εισάγεται στο πυθμένα του αντιδραστήρα και μέσω εξαναγκασμένης ανοδικής ροής (Upflow) διέρχεται μέσα από τη λάσπη η οποία περιέχει μικτή καλλιέργεια αναερόβιων μικροοργανισμών που βρίσκονται σε αιώρηση [31].

Τα λύματα εισάγονται στον αντιδραστήρα από τον πυθμένα και κινούνται προς τα πάνω, περνώντας μέσα από στρώματα ιλύος και μια ζώνη όπου μικροοργανισμοί τα διασπούν. Η συμπαγής και κοκκώδης ιλύς παρέχει εκτεταμένη επιφάνεια για την προσκόλληση και την ανάπτυξη αναερόβιων βακτηρίων. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει την οργανική ύλη των λυμάτων σε βιοαέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το βιοαέριο ανεβαίνει στην κορυφή του αντιδραστήρα και συλλέγεται [31].

Εντός του αντιδραστήρα, μια ρευστοποιημένη ζώνη παίζει καθοριστικό ρόλο σε διάφορες διεργασίες. Πρώτον, λειτουργεί ως ρυθμιστικό στοιχείο μεταξύ της ιλύος και του συστήματος διαχωρισμού αερίου-υγρού-στερεών, διευκολύνοντας τον αποτελεσματικό διαχωρισμό του βιοαερίου από το υγρό και τα στερεά. Δεύτερον, παρέχει μια διευρυμένη επιφάνεια που προάγει την ανάπτυξη και την προσκόλληση μικροοργανισμών, ενισχύοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας επεξεργασίας. Τρίτον, εμποδίζει την ιλύ από το να προκαλεί εμπλοκές στο σύστημα διαχωρισμού αερίου-υγρού-στερεών, συλλαμβάνοντας και συγκρατώντας τα στερεά εντός της κλίνης. Τέλος, το σύστημα διαχωρισμού αερίου-υγρού-στερεών στην κορυφή του αντιδραστήρα αποτελείται από διαφράγματα, διαφράγματα ή θόλους συλλογής αερίων. Το σύστημα αυτό εμποδίζει τη διαφυγή της ιλύος, ενώ επιτρέπει τη συλλογή και την απόρριψη του βιοαερίου που παράγεται κατά τη διαδικασία επεξεργασίας.



Εικόνα 16. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και τρόπου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα τύπου UASBR [36].

Σε σύγκριση με άλλους τύπους αναερόβιων συστημάτων, ο βιοαντιδραστήρας UAB παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων:

1. Χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις: Ο UASBR απαιτεί πολύ λίγη ενέργεια για τη λειτουργία του, καθώς λειτουργεί χωρίς την ανάγκη μηχανικής ανάμιξης ή αερισμού.
2. Ελάχιστη παραγωγή ιλύος: Το UASBR παράγει ελάχιστη ιλύ, γεγονός που μειώνει την ανάγκη για χειρισμό και διάθεση της ιλύος.

Ο UASB αντιδραστήρας έχει μεταξύ άλλων και ορισμένους περιορισμούς:

1. Ευαισθησία στις διακυμάνσεις των συνθηκών λειτουργίας: Ο UASBR είναι ευαίσθητος στις διακυμάνσεις των συνθηκών λειτουργίας, όπως οι υδραυλικοί ρυθμοί και οι ρυθμοί οργανικής φόρτισης, οι οποίοι μπορεί να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας.
2. Μεγάλος χρόνος εκκίνησης: Ο UASBR απαιτεί μεγάλο χρόνο εκκίνησης για τη δημιουργία μιας σταθερής μικροβιακής κοινότητας, γεγονός που μπορεί να καθυστερήσει την έναρξη της επεξεργασίας.
3. Ευάλωτος σε απόφραξη: Ο UASBR είναι επιρρεπής σε απόφραξεις, ιδίως στο στρώμα ιλύος και στο σύστημα διαχωρισμού αερίου-υγρού-στερεού, για αυτό το λόγο δεν είναι κατάλληλοι για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση στερεών.

### **Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες ( Periodic Anaerobic Baffled Reactor -PABR)**

Ο PABR αναπτύχθηκε από τους Γεράσιμο Λυμπεράτο και Ιωάννη Σκιαδά στο Τμήμα Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο αντιδραστήρας αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους με τον χώρο ανάμεσα στα κυλινδρικά μέρη να χωρίζεται σε τέσσερα διαμερίσματα. Σαν αποτέλεσμα αυτού, η διάταξη του εσωτερικού του αντιδραστήρα μοιάζει με έναν αντιδραστήρα ABR του οποίου τα διαμερίσματα βρίσκονται σε κυκλική διάταξη. Κάθε ξεχωριστό διαμέρισμα χωρίζεται στο τμήμα καθοδικής ροής (downflow section) και το τμήμα ανοδικής ροής (up flow section). Η τροφοδοσία εισάγεται στον αντιδραστήρα από το πάνω μέρος του καθοδικού τμήματος του πρώτου διαμερίσματος, περνάει στο ανοδικό μέρος και συνεχίζει την πορεία της προς το δεύτερο στη σειρά διαμέρισμα με τη βοήθεια εξωτερικών σωληνώσεων.

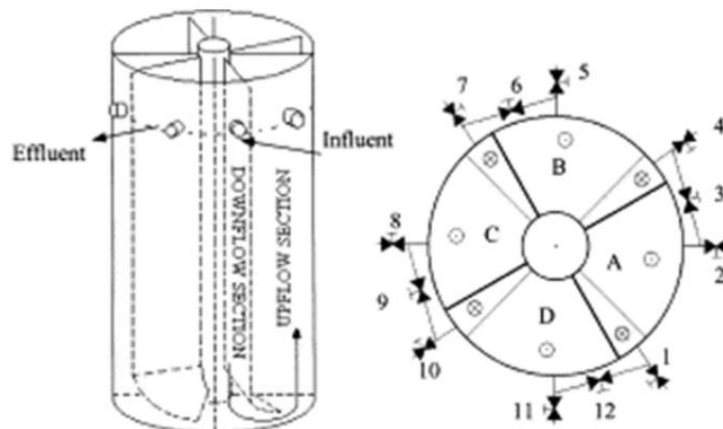
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με το υγρό να περνά από όλα τα διαμερίσματα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού μέχρι να φτάσει στο τέταρτο και τελευταίο διαμέρισμα όπου και εξέρχεται από το ανοδικό τμήμα του και αποτελεί την απορροή [37]. Χαρακτηριστικό του αντιδραστήρα αυτού, αποτελεί η κυκλική εναλλαγή των διαμερισμάτων που τροφοδοτούνται. Αυτή η εναλλαγή, πραγματοποιείται με τη βοήθεια βανών οι οποίες είναι τοποθετημένες κατάλληλα στο



σύστημα εξωτερικών σωληνώσεων. Εκτρέποντας κατάλληλα τη ροή, οι βάνες ελέγχουν εάν το ρευστό το οποίο εξέρχεται από το ανοδικό τμήμα του διαμερίσματος θα μεταφερθεί στο διπλανό διαμέρισμα ή θα αποτελέσει την απορροή του αντιδραστήρα.

Παράλληλα, οι βάνες ελέγχουν εάν το καθοδικό μέρος ενός διαμερίσματος θα τροφοδοτηθεί από το προηγούμενο διαμέρισμα ή θα εισέλθει σε αυτό καινούρια τροφοδοσία. Η εναλλαγή των βανών, η οποία γίνεται όπως αναφέρθηκε με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, θα αλλάζει και το ρόλο κάθε διαμερίσματος. Επομένως, σε μια περίοδο λειτουργίας (T) κάθε διαμέρισμα θα λειτουργήσει ως διαμέρισμα τροφοδοσίας για το ένα τέταρτο της περιόδου αλλά και ως απορροή για ένα τέταρτο της περιόδου [38]. Στην ακραία περίπτωση όπου η συχνότητα εναλλαγής είναι μηδέν, ο αντιδραστήρας συμπεριφέρεται ως ένας απλός ABR, ενώ στην ακραία περίπτωση όπου η συχνότητα τείνει στο άπειρο, τα διαμερίσματα γίνονται όμοια με τον αντιδραστήρα να συμπεριφέρεται σαν UASB. Ρυθμίζοντας, έτσι, τη συχνότητα εναλλαγής ο αντιδραστήρας γίνεται πιο ευέλικτος προσαρμόζοντας τη λειτουργία του ανάμεσα στις δυο ακραίες καταστάσεις (ABR, UASB) ή λειτουργώντας σε μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των δύο.

Ολοκληρώνοντας, ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας έχει ως πλεονεκτήματα την ευελιξία στη λειτουργία του, τη δυνατότητα χρήσης του εσωτερικού κυλίνδρου ως εναλλάκτη θερμότητάς καθώς και την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας λόγω του σχήματος του [38].



Εικόνα 17. Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα PABR.

## 4. Επεξεργασία Στερεών Αποβλήτων

Τα αστικά στερεά απόβλητα, παράγονται από τα νοικοκυριά, τις εμπορικές εγκαταστάσεις και τους δημόσιους φορείς στις αστικές περιοχές. Αποτελούνται από διάφορα υλικά, όπως οργανικά απόβλητα, πλαστικά, μέταλλα, γυαλί, χαρτί και άλλα υλικά. Η ορθή διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων είναι ζωτικής σημασίας για τη δημόσια υγεία, την προστασία του περιβάλλοντος.

### 4.1 Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ)

Ο ΧΥΤΑ (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων) είναι ένας χώρος ειδικά επιλεγμένος και διαμορφωμένος, ο οποίος δημιουργείται όταν εφαρμόζεται η υγειονομική ταφή ως μέθοδος διαχείρισης των απορριμμάτων. Υγειονομική ταφή ονομάζεται η διαδικασία ταφής των απορριμμάτων με την οποία ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη δημόσια

υγεία. Σε γενικές γραμμές, στους ΧΥΤΑ καταλήγουν κυρίως στερεά απόβλητα μη ανακυκλώσιμα και μη βιοαποικοδομήσιμα. Οι χώροι αυτοί είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αποτρέπουν την διασπορά επιβλαβών ουσιών στο περιβάλλον και να δεσμεύουν το αέριο μεθάνιο που παράγεται από την αποσύνθεση των αποβλήτων [39].

Πιο συγκεκριμένα σε ένα χώρο υγειονομικής ταφής αναπτύσσονται τα εξής στάδια:

- Η προετοιμασία του χώρου ταφής, που περιλαμβάνει την εξασφάλιση απορροής υγρών , την περίφραξη και την δημιουργία οδών πρόσβασης. Επιπρόσθετα γίνεται η εκσκαφή και προετοιμασία του δαπέδου.
- Τοποθετούνται περιμετρικοί αισθητήρες μεταξύ του πυθμένα και του υδροφόρου ορίζοντα
- Τοποθετείται δάπεδο χαμηλής διαπερατότητας.
- Το σύστημα συλλογής των αποστραγγισμάτων.

Για την ορθή λειτουργία ενός ΧΥΤΑ είναι αναγκαία η διαρκής εποπτεία των διεργασιών που πραγματοποιούνται. Μέσα στο χώρο αυτό λαμβάνουν μέρος βιολογικές αντιδράσεις (αρχικά αερόβιες και ύστερα αναερόβιες), χημικές και φυσικές μετατροπές που οδηγούν στη παραγωγή διαφόρων συστατικών τόσο στα υγρά όσο και στα αέρια απόβλητα.

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις αυξάνουν με την ηλικία του ΧΥΤΑ:

1. Αρχική προσαρμογή (αερόβια)
2. μεταβατική φάση(απονιτροποίηση, αποθειωποίηση, μεταβατική αναερόβια)
3. όξινη φάση(οξεογένεση)
4. μεθανογένεση
5. ωρίμανση(παραγωγή δύσκολα αποδομήσιμων χουμικού και φουλβικού οξέος)

Προβληματισμοί και ανησυχίες δημιουργίας και λειτουργίας ΧΥΤΑ:

- Οι χώροι υγειονομικής ταφής παράγουν στραγγίσματα, τα οποία είναι τοξικά καθώς προκύπτουν από τη διάσπαση των οργανικών υλικών αποτέλεσμα να εγκυμονούν κινδύνους σε περίπτωση διαρροής. Τα στραγγίσματα μπορούν να μολύνουν το έδαφος, τα υπόγεια και τα επιφανειακά ύδατα.
- Οι χώροι υγειονομικής ταφής αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως μεθανίου. Το μεθάνιο είναι ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου και αποτελεί απειλή για το περιβάλλον.
- Η αποσύνθεση των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής παράγει οσμές και άλλα επικίνδυνα αέρια που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία των κοντινών περιοχών. Η έκθεση σε αυτά τα αέρια μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά και άλλα προβλήματα υγείας.

- Περιορισμένη χωρητικότητα καθώς οι χώροι υγειονομικής ταφής έχουν περιορισμένη χωρητικότητα, και μόλις φτάσουν στην πλήρη χωρητικότητά τους, δεν μπορούν πλέον να δέχονται απόβλητα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εντοπιστούν και να κατασκευαστούν νέοι χώροι υγειονομικής ταφής.



Εικόνα 18. ΧΥΤΑ Χαλκίδας.

### Μονάδες Καύσης Απορριμμάτων

Οι μονάδες καύσης αστικών στερεών αποβλήτων είναι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν διάφορες θερμικές διεργασίες για την καύση και την επεξεργασία στερεών αποβλήτων που παράγονται από νοικοκυριά και επιχειρήσεις. Ο κύριος σκοπός αυτών των εγκαταστάσεων είναι η μείωση του όγκου των αποβλήτων και η παραγωγή ενέργειας από τη διαδικασία καύσης.

Τρεις εναλλακτικές τεχνικές επεξεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ): θερμική οξείδωση, πυρόλυση και αεριοποίηση. Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές συνεπάγεται έναν μοναδικό συνδυασμό χημικών και φυσικών διαδικασιών που μπορούν να εφαρμοστούν είτε για να μετατρέψουν τα σκουπίδια σε χρήσιμα αγαθά είτε για να μειώσουν τον συνολικό όγκο τους.

- Η διαδικασία της θερμικής οξείδωσης αποτελεί την ελεγχόμενη καύση σκουπιδιών σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσία περίσσειας οξυγόνου. Λόγω της διάσπασης των απορριμμάτων στα συστατικά τους μέρη ως αποτέλεσμα των υψηλών θερμοκρασιών, παράγονται θερμότητα, ατμός και διοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον, τα τοξικά υλικά και οι οργανικές ενώσεις των αποβλήτων εξαλείφονται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού ή ενέργειας για βιομηχανικές διεργασίες.
- Η πυρόλυση αποτελεί θερμική επεξεργασία των στερεών αστικών απορριμμάτων απουσία αέρα. Με τη θέρμανση απουσία οξυγόνου των αποβλήτων οι περισσότερες οργανικές ουσίες είναι θερμικά ασταθείς και έτσι με ένα συνδυασμό θερμικών διασπάσεων και

συμπύκνωσης παράγονται αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα.

Τα τρία σημαντικότερα κλάσματα που προκύπτουν από την πυρολυτική διαδικασία είναι:

1. Αέριο ρεύμα το οποίο περιέχει κυρίως υδρογόνο , μεθάνιο , μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα.
  2. Υγρό ρεύμα, αποτελούμενο από πίσσα ή λάδι το οποίο περιέχει οξικό οξύ , ακετόνη, μεθανόλη και περίπλοκους οξυγονομένους υδρογονάνθρακες.
  3. Στερεό υπόλειμμα , αποτελούμενο από σχεδόν καθαρό άνθρακα καθώς και άλλα αδρανή υλικά.
- Η αεριοποίηση είναι μία συναφής διεργασία με τη πυρόλυση. Στα συστήματα αεριοποίησης πραγματοποιείται προσθήκη αερίων με σκοπό την ενίσχυση του σχηματισμού αερίων προϊόντων ή/και για την απελευθέρωση θερμότητας μέσα στον αντιδραστήρα. Τα αέρια που προστίθενται είναι συνήθως το οξυγόνο, ατμός ή υδρογόνο.

Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι η πιθανότητα έκλυσης ατμοσφαιρικών ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου. Ακόμη και με προηγμένα συστήματα ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, εξακολουθεί να υπάρχει ο κίνδυνος εκπομπής επιβλαβών ουσιών στο περιβάλλον.



*Εικόνα 19. Μονάδα καύσης απορριμμάτων.*

## 5. Προτεινόμενο πλάνο συν διαχείρισης Υγρών Αστικών Λυμάτων και Στερεών Τροφικών Υπολειμμάτων.

### 5.1 Εισαγωγή

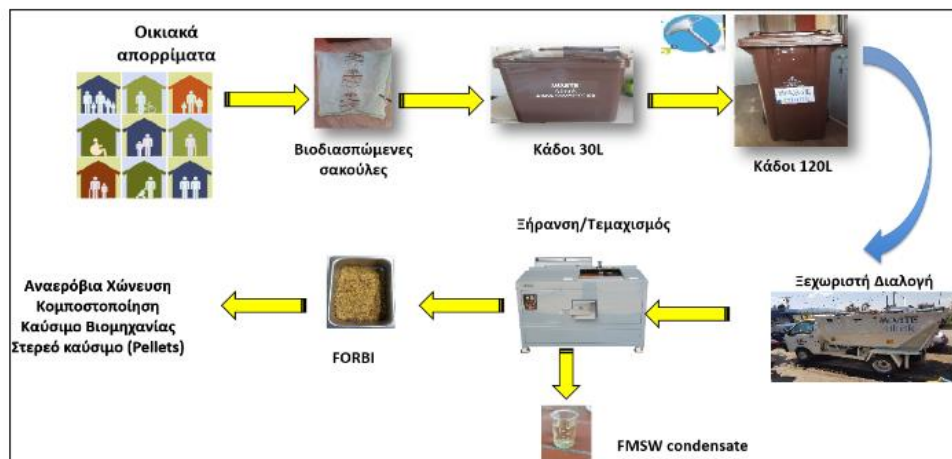
Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων έχουν κερδίσει όλο και μεγαλύτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια ως μια βιώσιμη προσέγγιση στη διαχείριση αποβλήτων. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν μικροοργανισμούς για τη διάσπαση των οργανικών αποβλήτων σε προϊόντα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, όπως το κομπόστ, και παραγωγή ενέργειας όπως βιοαέριο.

Τα ζυμώσιμα στερεά αστικά απόβλητα (**Fermentable Municipal Solid Waste, FMSW**) ανήκουν στη κατηγορία των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων. Βιοαποικοδομήσιμα υλικά είναι τα τροφικά, απόβλητα πλούσια σε οργανικά συστατικά. Τα ζυμώσιμα στερεά απόβλητα είναι ένας σημαντικός πόρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης με υψηλές δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας. Κατά αυτή τη διεργασία διασπάται η οργανική ύλη μέσω αναερόβιων μικροοργανισμών απουσία οξυγόνου, με ταυτόχρονη έκλυση βιοαερίου πλούσιο σε μεθάνιο. Τα ζυμώσιμα απόβλητα, επίσης, κομποστοποιούνται μέσω φυσικών διεργασιών με χρήση βακτηρίων, μυκήτων και σκουληκιών για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης παράγοντας εδαφοβελτιωτικό χρήσιμο για τη γεωργία και τη κηπουρική. Μία κατηγορία ζυμώσιμων αποβλήτων που απασχολεί έντονα τη παγκόσμια κοινότητα τα τελευταία χρόνια αποτελούν τα τροφικά υπολείμματα. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε τρόφιμα έχει ως αποτέλεσμα την ολοένα και αυξανόμενη δημιουργία τροφικών αποβλήτων. Τα τροφικά απόβλητα έχουν σημαντικό αντίκτυπο για το περιβάλλον και την δημόσια υγεία, διότι όταν τα τρόφιμα απορρίπτονται σε χωματερές, αποσυντίθενται και κάτω από αναερόβιες συνθήκες παράγουν μεθάνιο, το οποίο ενισχύει το φαινομένου του θερμοκηπίου. Μια πρώτη ερευνητική προσπάθεια αξιοποίησης του ρεύματος των οικιακών τροφικών υπολειμμάτων επιτεύχθηκε μέσω του προγράμματος Waste4Think. Στα πλαίσια του Waste4think με την συνδρομή κατοίκων και των δομών καθαριότητας του Δήμου Χαλανδρίου, οργανώθηκε από το Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ ένα πλάνο ξεχωριστής συλλογής και διαχείρισης των τροφικών υπολειμμάτων. Το προτεινόμενο διαχειριστικό πλάνο είχε ως αφετηρία την ξεχωριστή συλλογή στην πηγή των τροφικών υπολειμμάτων με την χρήση οικιακών καφέ κάδων χωρητικότητας 30 L. Στην συνέχεια οι οικιακοί καφέ κάδοι μεταφέρονταν από τους συμμετέχοντες στο πρόγραμμα σε αντίστοιχους καφέ κάδους σε συγκεκριμένα σημεία του Δήμου Χαλανδρίου όπου απορρίπτονταν τα τροφικά υπολείμματα. Οι δημοτικοί καφέ κάδοι έχουν χωρητικότητα 120 L και η δυνατότητα απόρριψης αποβλήτων σε αυτούς παρέχεται με την χρήση ειδικού κλειδιού, ώστε να μην υπάρχουν επιμολύνσεις από άλλου είδους απόβλητα. Για τον ίδιο λόγο η διαλογή τους από την Υπηρεσία Καθαριότητας του δήμου διεξάγεται από συγκεκριμένο απορριματοφόρο το οποίο δεν συλλέγει άλλους τύπους αποβλήτων.

Αφού συλλεχθούν τα τροφικά υπολείμματα μεταφέρονται σε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο όπου υπόκεινται σε ταυτόχρονη ξήρανση και τεμαχισμού. Μέσω της συγκεκριμένης διεργασίας παράγεται ένα προϊόν το οποίο ονομάζεται **Food Residue Biomass (FORBI)**. Η μετατροπή τους σε FORBI, αντί της απευθείας χρήσης τους σε βιολογικές διεργασίες αυξάνει σημαντικά της δυνατότητες αξιοποίησης των τροφικών υπολειμμάτων. Αρχικά μέσω της ξήρανσης επιτυγχάνεται απομάκρυνση της υγρασίας η οποία συνεπάγεται μείωση του βάρους τους κατά 80% διατηρώντας παράλληλα το ενεργειακό τους περιεχόμενο. Επιπλέον μέσω της απομάκρυνσης της υγρασίας αυξάνεται η διάρκεια συντήρησης τους καθώς δεν υφίστανται πλέον μικροβιακές διεργασίες αποσύνθεσης. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πώς μέσω της ξήρανσης χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη

ένα απόβλητο, παράγεται ένα προϊόν που παρουσιάζει ευκολία συντήρησης και μεταφοράς και ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων αξιοποίησης. Το FORBI έχει αξιοποιηθεί ως υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή ενέργειας υπό μορφή φυσικού αερίου κίνησης, ως πρώτη ύλη για την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού και ως καύσιμο για βιομηχανικές διεργασίες. Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που ακολουθούν τα τροφικά απόβλητα κατά την εφαρμογή του πλάνου που προτείνει το ερευνητικό πρόγραμμα Waste4Think.

Ωστόσο παράλληλα με την παραγωγή του FORBI κατά την ξήρανση των τροφικών αποβλήτων παράγεται ως προϊόν και το **Fermentable Municipal Solid Waste condensate (FMSW condensate)**, το οποίο αποτελείται από την περιεχόμενη υγρασία και τις πτητικές ενώσεις των τροφικών υπολειμμάτων που συμπυκνώνονται στην έξοδο του ξηραντήρα. Τα βασικά χαρακτηριστικά του FMSW condensate είναι η υψηλή συγκέντρωση σε οργανικό φορτίο προερχόμενη από πτητικά λιπαρά οξέα και αιθανόλη, η όξινη φάση και η δυσάρεστη οσμή. Είναι κατανοητό πως το FMSW condensate αποτελεί ένα επικίνδυνο περιβαλλοντικά απόβλητο το οποίο χρήζει άμεσης επεξεργασίας πριν την απόρριψη του στο περιβάλλον.



Εικόνα 20. Διάγραμμα ροής τροφικών αποβλήτων κατά την εφαρμογή του διαχειριστικού σενάριου του ερευνητικού προγράμματος Waste4Think.

Τα υγρά αστικά λύματα κατά κύριο λόγο παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και αποτελούν απειλή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Η σύσταση των λυμάτων εμπεριέχει ένα μείγμα οργανικής και ανόργανης ύλης. Επιπρόσθετα, στη σύνθεση των αστικών αποβλήτων απαντώνται και χημικές ουσίες από απορρυπαντικά, φαρμακευτικά προϊόντα και φυτοφάρμακα καθώς και βαρέα μέταλλα. Η επεξεργασία του συγκεκριμένου τύπου αποβλήτων είναι μείζονος σημασίας για την ανθρώπινη υγεία και την περιβαλλοντική ευημερία. Σήμερα η κύρια προσέγγιση της διαχείρισης των Υγρών Αστικών Λυμάτων αφορά στην συλλογή τους μέσω αποχετευτικού δικτύου και την επεξεργασία τους σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού για την αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών και των θρεπτικών συστατικών τους (άζωτο, φώσφορο) μέσω διεργασιών καθίζησης, βιολογικής οξειδωσης του οργανικού φορτίου και απολύμανσης μέσω χλωρίωσης. Στη συνέχεια ένα μείγμα πρωτογενούς και δευτερογενούς ιλύος που παράγεται από την παραπάνω διεργασία οδηγείται για αναερόβια χώνευση πριν την τελική του διάθεση. Το κύριο λειτουργικό κόστος που φέρει το παραπάνω σύστημα επεξεργασίας βασίζεται, στον αερισμό της

λύος που απαιτείται για την οξείδωση του οργανικού της φορτίου. Για την εξομάλυνση του συγκεκριμένου κόστους έχει προταθεί, συνολική ή μερική σταθεροποίηση των αποβλήτων μέσω αναερόβιας χώνευσης με σκοπό την παραγωγή ενέργειας, ωστόσο η συγκεκριμένη πρόταση έχει αποτελεσματική εφαρμογή μόνο για περιοχές με θερμό κλίμα (Μεσόφιλες συνθήκες), λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης σε οργανικό φορτίο που περιέχεται στον συγκεκριμένο τύπο αποβλήτων .

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η μελέτη σε πιλοτικό επίπεδο ενός νέου πλάνου συνδιαχείρισης των υγρών αστικών λυμάτων και των στερεών τροφικών υπολειμμάτων. Το προτεινόμενο διαχειριστικό πλάνο βασίζεται στην έννοια της αξιοποίησης των συγκεκριμένων αποβλήτων μέσω της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης. Επιπλέον πέραν της ενεργειακής τους αξιοποίησης διασφαλίζει και την ασφαλή απόρριψη τους στον περιβάλλον μέσω της επεξεργασίας του χωνεμένου υπολείμματος. Η καινοτόμος πρόταση περιλαμβάνει την ανάμειξη του ρεύματος των υγρών αστικών λυμάτων με το FMSW condensate και την απευθείας αναερόβια χώνευση σε ένα ταχύρρυθμο σύστημα τύπου PABR. Στην συνέχεια προτείνεται η σύζευξη του PABR με ένα αντιδραστήρα διαλείπουσας λειτουργίας τύπου SBR όπου μέσω βιολογική οξείδωσης θα πραγματοποιείται η σταθεροποίηση του χωνεμένου υπολείμματος, ώστε να μπορεί να απορριφθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον.



*Εικόνα 21. Ξηραντήρας όπου έλαβε χώρα η ξήρανση και ο τεμαχισμός των τροφικών υπολειμμάτων.*

## **5.2 Πειραματικό Μέρος**

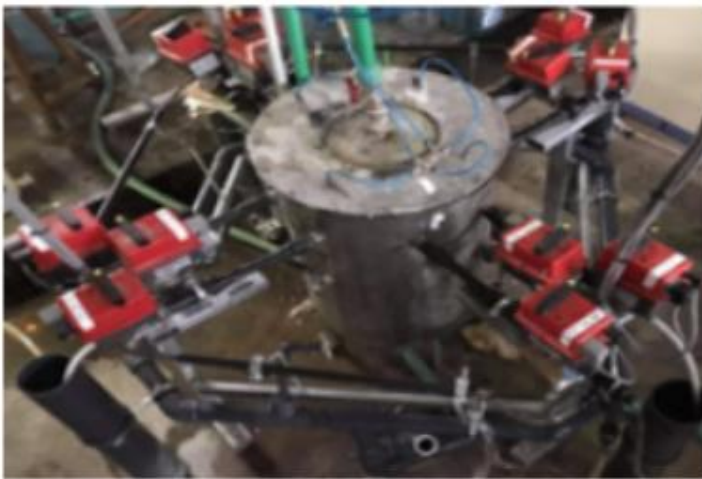
Το πρώτο στάδιο της μελέτης περιλαμβάνει την συλλογή και ξήρανση των τροφικών υπολειμμάτων και στην συνέχεια τον χαρακτηρισμό του υγρού συμπυκνώματος αυτής. Τα τροφικά υπολείμματα που χρησιμοποιήθηκαν συλλέχθηκαν από το εστιατόριο της

φοιτητικής λέσχης του ΕΜΠ. Τα τροφικά απόβλητα αφού συλλέγονταν οδηγούνταν στον ξηραντήρα που απεικονίζεται στην Εικόνα 21 και ακολουθήσε ξήρανση με ταυτόχρονο τεμαχισμό. Στην συνέχεια πραγματοποιούνταν η συλλογή του FORBI και του condensate.

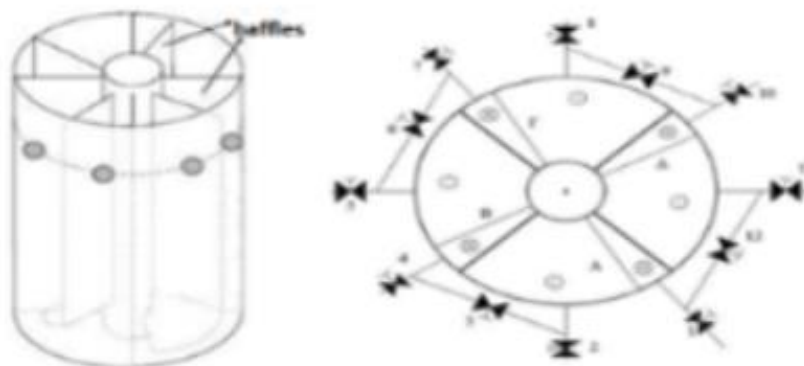
Στην συγκεκριμένη μελέτη αντί πραγματικών λυμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα συνθετικό απόβλητο που προσομοιάζει τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε τόσο για

λόγους σταθερότητας των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της τροφοδοσίας όσο και για υγειονομικούς λόγους.

Στην συγκεκριμένη διεργασία χρησιμοποιήθηκε ένας αντιδραστήρας τύπου PABR ενεργού όγκου 77 L, Εικόνα 22 και 23. Στον PABR έλαβε χώρα η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης του μίγματος συνθετικών αστικών λυμάτων και FMSW condensate. Οι λειτουργικές παράμετροι της διεργασίας αναφέρονται στον Πίνακα 1. Ο PABR τροφοδοτούνταν από ένα μίγμα με αναλογία 10% FMSW condensate και 90 % συνθετικό αστικό λύμα. Η αναλογία αυτή επιλέχθηκε με σκεπτικό την μέγιστη αξιοποίηση στην τροφοδοσία τα υγρά αστικά λύματα καθώς είναι το απόβλητο που εμφανίζει με μεγαλύτερη παραγωγή. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας του PABR απεικονίζονται στον Πίνακα 2. Στην Εικόνα 24 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του μηχανολογικού εξοπλισμού της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης.



Εικόνα 22. Ο αντιδραστήρας PABR που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 23. Πειραματική διάταξη PABR



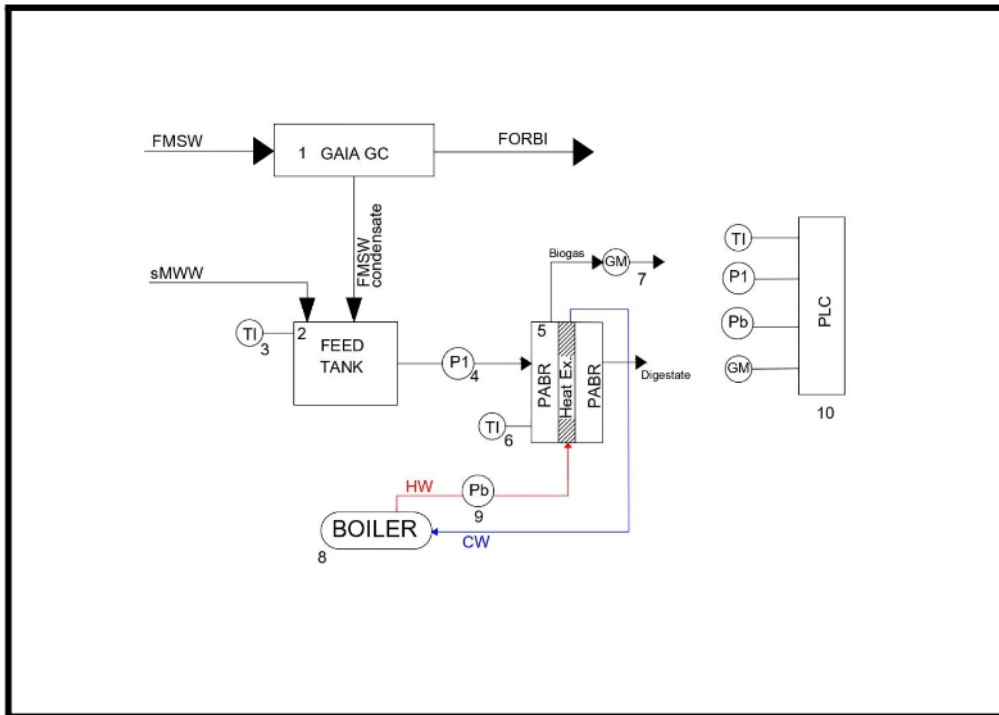
Πίνακας 1. Λειτουργικές παράμετροι διεργασίας αναερόβιας χώνευσης.

<b>Διάρκεια Πειραματικής Διαδικασίας</b>	230 d
<b>Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής HRT</b>	1 d
<b>Περίοδος Εναλλαγής T</b>	-
<b>Ρυθμός Οργανικής Φόρτισης OLR</b>	1,035 ( gCOD/L/d)
<b>Μέση Θερμοκρασία Δοχείου Τροφοδοσίας</b>	4 (°C)
<b>Μέση Θερμοκρασία Διεργασίας</b>	35 (°C)

Πίνακας 2. φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τροφοδοσίας PABR.

<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>Μέση Τιμή</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>
<b>COD mg/L</b>	1035	86
<b>TOC mg/L</b>	408.7	11.25
<b>TN mg/L</b>	46.53	0.83
<b>TP mg/L</b>	4.5	0.1
<b>pH</b>	8,0	0,3
<b>Alkalinity mg CaCO<sub>3</sub>/L</b>	1780	140

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 1 στην συγκεκριμένη πειραματική μελέτη δεν εφαρμόστηκε στον PABR περίοδος εναλλαγής. Αυτό σημαίνει πως καθ' όλη την διάρκεια της πειραματικής διεργασίας ο αντιδραστήρας προσομοίαζε την υδραυλική συμπεριφορά ενός αντιδραστήρα τύπου ABR τεσσάρων διαμερισμάτων συνδεδεμένων σε σειρά. Μετά την συλλογή του το FMSW condensate οδηγούνταν στην λεκάνη τροφοδοσίας όπου αναμιγνύεται με το συνθετικό αστικό λύμα σε αναλογία 10%-90%. Το δοχείο τροφοδοσίας διατηρούνταν με τη βοήθεια θερμοστοιχείου σε σταθερή θερμοκρασία 4°C. Στην συνέχεια μέσω αντλίας το μίγμα τροφοδοσίας οδηγούνταν στον αντιδραστήρα. Η θερμοκρασία του αντιδραστήρα παρέμενε σταθερή κατά την διάρκεια των πειραμάτων στους 35°C. Η λειτουργία του αντιδραστήρα ήταν πλήρως αυτοματοποιημένη και ελεγχόμενη από σύστημα τύπου PLC, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24. Διάγραμμα ροής διεργασίας. 1) Ξηραντήρας αποβλήτων τύπου GAIA GC 600. 2) Δοχείο αποθήκευσης τροφοδοσίας όγκου 120 L. 3) Ρυθμιστής Θερμοκρασίας δοχείου τροφοδοσίας. 4) Περισταλτική αντλία τροφοδότησης αντιδραστήρα. 5) Αντιδραστήρας PABR 77 L. 6) Θερμοστοιχείο ελέγχου θερμοκρασίας PABR. 7) Σύστημα μέτρησης παραγόμενου βιοαερίου. 8) Boiler. 9) Αντλία Ζεστού νερού. 10) Μονάδα PLC

Η εκροή του PABR οδηγούνταν προς επεξεργασία σε έναν αντιδραστήρα τύπου SBR όπου επιβαλλόταν σε διεργασίας βιολογικής οξείδωσης με ταυτόχρονη απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως παρότι ο αρχικός σχεδιασμός του συστήματος περιλαμβάνει την απευθείας επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος από τον SBR τα πειραματικά αποτελέσματα οδήγησαν στην απόφαση η εκροής του PABR να αναμιχθεί εκ νέου με FMSW condensate πριν οδηγηθεί στον SBR. Η συγκεκριμένη απόφαση κρίθηκε αναγκαία καθώς, όπως παρουσιάζεται και στα αποτελέσματα η εκροή του PABR παρουσίαζε σημαντικές συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου αλλά ισχνή συγκέντρωση οργανικού φορτίου. Το γεγονός αυτό καθιστούσε αναγκαία την προσθήκη εξωτερικής πηγής οργανικού άνθρακα στον SBR ώστε να αναπτυχθούν κατάλληλες συνθήκες απονιτροποίησης με τελικό στόχο την απομάκρυνση του αζώτου. Ως εξωτερική πηγή άνθρακα επιλέχθηκε το FMSW condensate καθώς αποτελεί απόβλητο και δεν αυξάνει το λειτουργικό κόστος της διεργασίας. Χρησιμοποιήθηκε αντιδραστήρας SBR 15 L, Εικόνα 25. Τα 2/3 του όγκου του SBR τροφοδοτούνταν με απόβλητο ενώ το 1/3 καταλαμβάνονταν μόνιμως από την ενεργό ιλύ. Σκοπός του SBR ήταν η ανάπτυξη συνθηκών για ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αζώτου και φωσφόρου σε τιμές κάτω των προβλεπόμενων περιβαλλοντικών ορίων. Η φάση αντίδρασης του SBR περιλάμβανε σε αλληλουχία μεταξύ τους αναερόβιες, αερόβιες και ανοξικές συνθήκες. Ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους με τον εξωτερικό να λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας. Αερόβιες συνθήκες επιτυγχάνονταν με τη χρήση μηχανικού αερισμού μέσω διάταξης φυσητήρα. Στην Εικόνα 25 απεικονίζεται ο αντιδραστήρας SBR που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη και στην Εικόνα 26 το διάγραμμα ροής του μηχανολογικού εξοπλισμού που απαρτίζει το σύστημα. Στους Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται οι λειτουργικές παράμετροι της διεργασίας στον SBR και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας του.



Εικόνα 25. Πειραματική διάταξη SBR.

Κάθε κύκλος λειτουργίας του SBR αποτελούνταν από τέσσερα διακριτά στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο τα 2/3 του αντιδραστήρα τροφοδοτούνταν μέσω περισταλτικής αντλίας, με το προς επεξεργασία απόβλητο. Η τροφοδοσία του SBR όπως αναφέρθηκε αποτελούνταν από μίγμα χωνεμένου υπολείμματος PABR και FMSW condensate. Η αναλογία ανάμιξης που επιλέχθηκε ήταν 15% FMSW condensate και 85% εκροή PABR. Τα κριτήρια επιλογής της συγκεκριμένης αναλογίας αποσκοπούν στην ελάχιστη χρήση condensate ώστε η συγκέντρωση σε οργανικό φορτίο του τελικού μίγματος να είναι επαρκής για τις ανάγκες της απονιτροποίησης σε άνθρακα. Κατά το στάδιο της τροφοδοσίας το οποίο διαρκούσε 30 λεπτά της ώρας, μια δεύτερη περισταλτική αντλία ανακυκλοφορούσε ενεργό ιλύ από τον πυθμένα του αντιδραστήρα στην κορυφή του με σκοπό την επίτευξη συνθηκών ανάδευσης. Μετά το πέρας του σταδίου τροφοδοσίας ακολουθούσε το στάδιο της αντίδρασης. Το στάδιο της αντίδρασης αποτελούνταν από τρεις διακριτές φάσεις. Κατά την πρώτη φάση επικρατούσαν στον αντιδραστήρα αναερόβιες συνθήκες, κατά την δεύτερη φάση με την βοήθεια του φυσητήρα επιβαλλόταν στον SBR αερισμός με παροχή ικανή να διατηρεί την συγκέντρωση του διαλυτού οξυγόνου στα 2.0 mg/L. Στην συνέχεια ακολουθούσε η ανοξική φάση όπου ο αερισμός σταματούσε. Η επίτευξη ανοξικής φάση προϋποθέτει την επαρκή νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου κατά το στάδιο του αερισμού. Συνεπώς οι ανοξικές συνθήκες επαληθεύονταν μέσω μετρήσεων νιτρικών ιόντων στο ανάμικτο υγρό του SBR.

Το στάδιο της αντίδρασης διαρκούσε επτά ώρες. Επόμενο στάδιο του κύκλου λειτουργίας ήταν το στάδιο της καθίζησης. Κατά αυτό το στάδιο σταματούσε να επιβάλλεται ανακυκλοφορία στον αντιδραστήρα και μέσω καθίζησης γινόταν διαχωρισμός του διαυγούς, επεξεργασμένου πλέον, αποβλήτου και της ενεργού ιλύος του συστήματος. Κατά αυτό το στάδιο ο SBR προσομοίαζε την λειτουργία μιας τυπικής δεξαμενής καθίζησης. Η καθίζηση διαρκούσε 3 ώρες. Τελευταίο στάδιο της

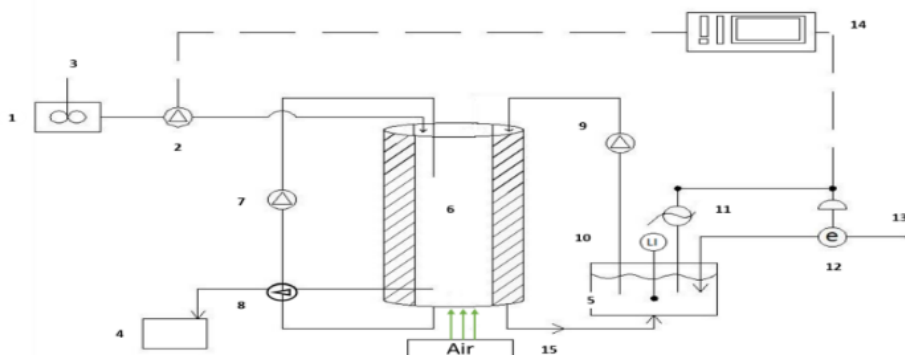
λειτουργίας του SBR ήταν αυτό της εκροής. Κατά αυτό το στάδιο απομακρύνονταν τα 2/3 του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα. Η εκροή του SBR αποτελούνταν κυρίως από το διαυγές υγρό και ελάχιστες ποσότητες περίσσειας ιλύος που παραγόταν στο σύστημα κατά την διεργασία της βιολογικής οξείδωσης. Συνολικά ο κύκλος λειτουργίας είχε διάρκεια έντεκα ώρες, όπως φαίνεται και από τα στοιχεία του Πίνακα 3. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας του SBR.

Πίνακας 3 Στάδια λειτουργίας του SBR και η διάρκεια τους.

Τροφοδοσία (Ωρες)	Αναερόβιο Στάδιο (ώρες)	Αερόβιο Στάδιο (ώρες)	Ανοξικό Στάδιο (ώρες)	Καθίζηση (Ωρες)	Άδειασμα (Ωρες)	Διάρκεια Κύκλου (Ωρες)
0,5	2	3	2	3	0,5	11

Πίνακας 4. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μίγματος τροφοδοσίας SBR

Χαρακτηριστικά	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
COD mg/L	817.72	32
TN mg/L	45.78	3.0
TP mg/L	4.21	0.2
pH	7.29	0,5
Alkalinity mg CaCO <sub>3</sub> /L	1330	160



Εικόνα 26. 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) Αντλία ανακυκλοφορίας ανάμικτου υγρού, (8) Αντλία εκρόης SBR (9) Υποβρύχια αντλία ανακυκλοφορίας νερού για το λουτρό στα τοιχώματα και πίσω στη δεξαμενή νερού, (10) Όργανο μέτρησης στάθμης (level indicator), (11) Ηλεκτρική αντίσταση, (12) Ηλεκτρική βάννα για απώλειες νερού στη δεξαμενή νερού, (13) Παροχή νερού από δίκτυο ύδρευσης, (14) Πίνακας ελέγχου (control panel) για ρυθμίσεις αυτοματισμού σε ολόκληρο το σύστημα, (15) Αντλία μηχανικού αερισμού συστήματος.

Η παροχή οξυγόνου (μέσω αερισμού) στον αντιδραστήρα ελεγχόταν από ηλεκτρόδιο μέτρησης DO (Dissolved Oxygen), η θερμοκρασία διατηρήθηκε σταθερή στους 27 °C. Η όλη διεργασία ελεγχόταν από αυτοματοποιημένο σύστημά PLC όπως φαίνεται στην Εικόνα 26.

### **Αναλυτικές μέθοδοι**

Για τον έλεγχο της λειτουργίας και της αποδοτικότητας των αντιδραστήρων (PABR,SBR) αλλά για και τον χαρακτηρισμό της τροφοδοσίας πραγματοποιήθηκε μια σειρά από συγκεκριμένες αναλυτικές τεχνικές. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον καθημερινό έλεγχοι των διεργασιών είναι βασισμένες στις μεθόδους που προτείνονται από το εγχειρίδιο Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

### **Μέτρηση pH**

Η μέτρηση του pH των δειγμάτων πραγματοποιείται με τον εμβαπτισμό του ηλεκτροδίου της συσκευής του pH-μέτρου στο δείγμα και την καταγραφή της τιμής για την οποία σταθεροποιείται το όργανο μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα. Αφού πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση της συσκευής, είναι έτοιμη για να ληφθεί η αντίστοιχη μέτρηση προς καταγραφή. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είναι ένα φορητό ηλεκτρονικό pH-μετρό τύπου inoLab WTWseriesPHS-3DMeter.



*Εικόνα 27. Εργαστηριακή διάταξη μέτρησης pH.*

## Ολική αλκαλικότητα

Η Ολική Αλκαλικότητα (Total Alkalinity, TA) εκφράζει την αντίσταση ενός διαλύματος στην όξινη μεταβολή του pH του.. Εκφράζει την ικανότητα ενός διαλύματος να εξουδετερώσει οξέα και αντιστοιχεί στο άθροισμα ούλων των βασικών αλάτων στο διάλυμα. Στα υγρά απόβλητα η αλκαλικότητα ουσιαστικά επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από την παρουσία ανθρακικών ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), όξινων ανθρακικών ( $\text{HCO}_3^-$ ), καθώς και ιόντων υδροξυλίου ( $\text{OH}^-$ ). Επιπλέον, άλλες ενώσεις που μπορούν να συνεισφέρουν στην αλκαλικότητα μπορούν να είναι βορικά, πυριτικά και φωσφορικά άλατα. Για τη μέτρηση της αλκαλικότητας, απαιτείται τιτλοδότηση γνωστής ποσότητας δείγματος υπό συνεχή ανάδευση με πρότυπο διάλυμα θειικού οξέος ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) μέχρι όπου το pH λάβει τιμή ίση με το ισοδύναμο σημείο του 4,5. Στη συνέχεια, καταγράφεται η ποσότητα του προτύπου διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε.

Η τιμή της ολικής αλκαλικότητας (εκφρασμένη σε mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ), που προήλθε από τιτλοδότηση με διάλυμα θειικού οξέος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\text{Ολική Αλκαλικότητα} = \frac{A \times N \times 5000}{V} \qquad \text{Εξίσωση [27]}$$

Οπού:

**A:** η ποσότητα (mL) του οξέος που χρησιμοποιήθηκε για την τιτλοδότηση

**N:** η κανονικότητα του οξέος

**V:** ο όγκος του δείγματος (mL)

## Προσδιορισμός Ολικών και Πτητικών Αιωρούμενων στερεών (TSS , VSS):

Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (Total Suspended Solids) χαρακτηρίζονται ως τα μη διηθούμενα στερεά τα οποία εμπεριέχονται στο δείγμα και αποτελούν μέρος των ολικών στερεών μαζί με τα ολικά διαλυμένα στερεά. Για τον υπολογισμό των ολικών αιωρούμενων στερεών αξιοποιείται γνωστή ποσότητα όγκου επαρκώς αναμειγμένου δείγματος (10ml) το οποίο διηθείται σε προ ζυγισμένο φίλτρο από ίνες υάλου. Για την απομάκρυνση της υγρασίας από το φίλτρο, αυτό εισάγεται σε φούρνο σταθερής θερμοκρασίας 550°C για διάστημα 15-20 λεπτών. Μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος, ψύχεται σε ξηραντήρα απουσία υγρασίας και στη συνέχεια καταγράφεται το βάρος του. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η διήθηση υπό κενό. Τέλος, το φίλτρο εισάγεται σε φούρνο σταθερής θερμοκρασίας 105°C για 24 ώρες προκειμένου να ξηραθεί.



Εικόνα 28. Φούρνος σταθερής θερμοκρασίας 105 °C (αριστερά), αναλυτικός ζυγός δεξιά.

Στην συνέχεια αφού έχει ολοκληρωθεί η διήθηση το φίλτρο με το υπόλειμμα οδηγούνται στον φούρνο σταθερής θερμοκρασίας (105 °C). Μετά την παραμονή του για τουλάχιστον 16 ώρες στους 105 °C το φίλτρο ζυγίζεται στον αναλυτικό ζυγό. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά υπολογίζονται από την Εξίσωση 28.

$$\text{Ολικά αιωρούμενα στερεά: TSS } \left( \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \text{ ή } \frac{\text{g}}{\text{L}} \right) = \frac{A - B}{V} \times 1000 \quad \text{Εξίσωση [28]}$$

Όπου:

A: το αρχικό βάρος του φίλτρου + το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 105 (σε g),

B: το αρχικό βάρος του φίλτρου (σε mg)

V: ο όγκος του δείγματος (σε mL)

Τα πτητικά αιωρούμενα στερεά (Volatile Suspended Solids, VSS) αποτελούν κλάσμα των ολικών αιωρούμενων στερεών ,τα οποία αναφλέγονται στους 550°C. Για τον προσδιορισμό τους , σε συνέχεια της προηγούμενης διαδικασίας αφού υπολογιστούν τα αιωρούμενα ολικά στερεά το φίλτρο μεταφέρεται σε φούρνο στους 550°C για 15min όπου τα πτητικά στερεά πυρακτώνονται, κατόπιν ψύχεται σε ξηραντήρα και τέλος ζυγίζεται. Τα πτητικά αιωρούμενα στερεά προκύπτουν από την Εξίσωση 29

$$\text{Πτητικά αιωρούμενα στερεά: VSS } \left( \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \text{ ή } \frac{\text{g}}{\text{L}} \right) = \frac{A - C}{V} \times 1000 \quad \text{Εξίσωση [29]}$$

Όπου:

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

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

V: ο όγκος του δείγματος (σε mL)

## Προσδιορισμός ολικών και πτητικών στερεών

### ΟλικάΣτερεά (TS, Total Solids)

Καλώς αναμειγμένη ποσότητα δείγματος όγκου 20 mL προστίθεται σε προ ζυγισμένη κάψα και ξηραίνεται μέχρι σταθερού βάρους στο φούρνο στους 105°C για περίπου 24h στη συνέχεια οδηγείται στο ξηραντήρα για περίπου 15min ως ότου να κρυώσει και ζυγίζεται. Η αύξηση του βάρους σε σχέση με αυτό της αδείας κάψας αντιπροσωπεύει τα Ολικά Στερεά (Total Solids, TS). Ο υπολογισμός τους μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας την παρακάτω σχέση:

$$\text{Συνολικά στερεά: TS } \left( \frac{mg}{mL} \text{ ή } \frac{g}{L} \right) = \frac{A - B}{V} \times 1000 \quad \text{Εξίσωση [30]}$$

Όπου:

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

B: το αρχικό βάρος της κάψας (σε mg)

V: ο όγκος του δείγματος (σε mL)

### ΠτητικάΣτερεά (VS, Volatile Solids)

Τα πτητικά αιωρούμενα στερεά (Volatile Solids, VS) αποτελούν κλάσμα των ολικών στερεών (TS), τα οποία αναφλέγονται στους 550°C. Για τον προσδιορισμό τους, σε συνέχεια της προηγούμενης διαδικασίας αφού υπολογιστούν τα ολικά στερεά η κάψα μεταφέρεται σε φούρνο στους 550°C για 2hours όπου τα πτητικά στερεά πυρακτώνονται, κατόπιν ψύχεται σε ξηραντήρα και τέλος ζυγίζεται. Συνήθως, απαιτείται ανάφλεξη 15-20min για 200mg υπολείμματος. Ωστόσο, για βαρύτερα κατάλοιπα, όπως στη δική μας περίπτωση, μπορεί να απαιτήσουν μεγαλύτερους χρόνους ανάφλεξης. Μετά το πέρας της ζύγισης, τα μη Πτητικά Στερεά (Fixed Solids, FS), αντιπροσωπεύουν τα στερεά που ενυπάρχουν στη κάψα, ενώ το βάρος που χάνεται κατά την ανάφλεξη είναι τα Πτητικά Στερεά (Volatile Solids, VS). Ο προσδιορισμός τους είναι χρήσιμος στον έλεγχο της λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων, επειδή προσφέρει μια προσέγγιση της ποσότητας της οργανικής ύλης που εμπεριέχεται στο στερεό κλάσμα των λυμάτων.

$$\text{Πτητικά στερεά: VS } \left( \frac{mg}{mL} \text{ ή } \frac{g}{L} \right) = \frac{A - B}{V} \times 1000 \quad \text{Εξίσωση [31]}$$

Όπου:

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

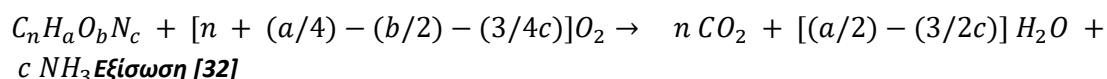
B: το αρχικό βάρος της κάψας + το αποξηραμένο υπόλειμμα από τους 550 (σε mg) δηλαδή, μετά την ανάφλεξη



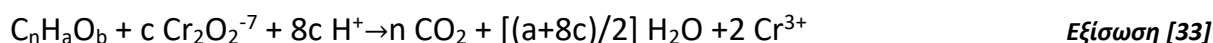
V: ο όγκος του δείγματος (σε mL)

### Προσδιορισμός Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου

Ο προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της οργανικής ισχύος και αντιστοιχεί στη συνολική ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξείδωση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Βασίζεται στο γεγονός ότι όλες οι οργανικές ενώσεις εκτός κάποιων εξαιρέσεων, μπορούν να οξειδωθούν με τη δράση κάποιου ισχυρά οξειδωτικού μέσου σε όξινο περιβάλλον. Η οξείδωση του οργανικού υλικού ενός διαλύματος γίνεται από περίσσεια δίχρωμου κάλιου ( $K_2Cr_2O_7$ ) με θέρμανση στους 141-143 °C και σε ισχυρά όξινη συνθήκες (παρουσία  $H^+$ ). Ως καταλυτής, για την οξείδωση των οργανικών ενώσεων, χρησιμοποιείται θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ). Η αρχική διαδικασία περιλαμβάνει την προσθήκη σε ειδικά φιαλίδια 2,8mL καταλυτή  $H_2SO_4$ , 1,2mL οξειδωτικού  $K_2Cr_2O_7$  και 2mL δείγματος.



όπου:  $c = (2/3)n + (1/6)n - (1/3)b$

Γενικότερα, η μέθοδος βασίζεται στη φωτομέτρηση των ιόντων  $Cr^{3+}$ , τα οποία προκύπτουν από την οξείδωση του οργανικού φορτίου με το δίχρωμο κάλιο. Επομένως, όσο μεγαλύτερη ποσότητα δίχρωμου κάλιου έχει αντιδράσει τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η απορρόφηση που θα λαμβάνεται κατά τη φωτομέτρηση. Για τον υπολογισμό του ολικού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Total Chemical Oxygen Demand), το δείγμα που θα αναλυθεί δεν έχει υποστεί διήθηση. Αντιθέτως, για τον υπολογισμό του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Soluble Chemical Oxygen Demand) το δείγμα διηθείται και απομακρύνονται από αυτό τα αιωρούμενα στερεά του. Ο προσδιορισμός των δυο αυτών παραμέτρων (tCOD, sCOD) πραγματοποιείται με φωτομέτρηση σε μήκος κύματος 600nm σε ηλεκτρονικό φωτόμετρο (Hach DR/2010). Ο ποσοτικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης του διαλυτού ΧΑΟ γίνεται με την αναγωγή της απορρόφησης σε συγκέντρωση, με τη βοήθεια “πρότυπης καμπύλης” βαθμονόμησης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει με τη φωτομέτρηση προτύπων δειγμάτων γνωστού διαλυτού ΧΑΟ.



Εικόνα 29. Ειδικός φούρνος στους 150°C για την εξώθερμη αντίδραση μέτρησης των COD.

### Αέριος Χρωματογραφία

Για τον προσδιορισμό των λιπαρών πτητικών οξέων (Volatile Fatty Acids, VFAs) και της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο αξιοποιούνται χρωματογραφικές μέθοδοι και πιο συγκεκριμένα η τεχνική της αέριος χρωματογραφίας. Η χρωματογραφία αποτελείται από ένα πλήθος μεθόδων ανάλυσης και τεχνικών διαχωρισμού που βασίζονται στη διαφορετική κατανομή των συστατικών ενός μίγματος μεταξύ μιας κινητής φάσης, η οποία μπορεί να είναι υγρή ή αέρια, και μιας στατικής η οποία μπορεί να είναι υγρή ή στερεή.

Η αρχή της GC ( Gas Chromatography ) βασίζεται στον διαχωρισμό ενός μίγματος δείγματος μεταξύ μιας σταθερής φάσης και μιας κινητής φάσης. Η σταθερή φάση είναι μια στερεή ή υγρή επίστρωση σε μια στήλη στο εσωτερικό του οργάνου, ενώ η κινητή φάση είναι ένα αέριο, συνήθως ήλιο ή άζωτο ή υδρογόνο. Το μίγμα δείγματος εισάγεται στη στήλη και παρασύρεται από το αέριο, το οποίο κινείται μέσω της στήλης με ελεγχόμενο ρυθμό. Καθώς το μείγμα ταξιδεύει μέσω της στήλης, τα διάφορα συστατικά κατανέμονται μεταξύ της σταθερής και της κινητής φάσης, με βάση τις χημικές τους ιδιότητες. Τα συστατικά που έλκονται πιο έντονα από τη στατική φάση θα κινηθούν πιο αργά μέσω της στήλης, ενώ εκείνα που έλκονται λιγότερο έντονα θα κινηθούν πιο γρήγορα. Η λειτουργία του GC ξεκινά με την εισαγωγή του μίγματος σε υγρή ή αέρια φάση και στη συνέχεια το δείγμα εξατμίζεται και αναμιγνύεται με το φέρον αέριο. Το δείγμα παρασύρεται στη στήλη η οποία είναι τοποθετημένη σε θερμοστατούμενο φούρνο. Ο διαχωρισμός των συστατικών στο αέριο μείγμα βασίζεται στη διαφορά που εμφανίζουν ως προς τη συγκράτησή τους από τη στατική και κινητή φάση αντίστοιχα. Έτσι, κάποια συστατικά τείνουν να συγκρατούνται από την κινητή φάση και κάποια αλλά από τη στατική.

## **Προσδιορισμός Πτητικών Λιπαρών Οξέων (Volatile Fatty Acids, VFAs)**

Η αναερόβια χώνευση και η ευστάθεια του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από τη συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων. Για την παρακολούθηση, επόμενο, της διεργασίας και της διασφάλισης της ομαλής λειτουργίας της είναι σημαντικό να υπάρχει συνεχής παρακολούθηση των επίπεδων συγκέντρωσης των VFAs στον αντιδραστήρα. Για την μέτρηση των πτητικών λιπαρών οξέων χρησιμοποιείται αέριος χρωματογράφος τύπου Shimadzu GC2010 με τριχοειδή στήλη διαχωρισμού (Hewlett Packard FFAP με μήκος 30m, εσωτερικής διαμέτρου 0,53mm και φιλμ 1μm), ανιχνευτή φλόγας ιονισμού και φέρον αέριο ήλιο υψηλής καθαρότητας.

Κατά την προετοιμασία του δείγματος, χρησιμοποιείται 1mL διηθημένου δείγματος στο οποίο προστίθενται 30μL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20% v/v. Το μίγμα αναδεύεται και κατόπιν φιλτράρεται για την απομάκρυνση των σχηματιζόμενων θειικών ιζημάτων ενώ τέλος εισάγεται σε συγκεκριμένο φιαλίδιο (septum vial) και τοποθετείται στην υποδοχή του χρωματογράφου. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των οξέων γίνεται με την βοήθεια προτύπων καμπυλών που έχουν προκύψει από μετρήσεις σε πρότυπα διαλύματα οξέων πολύ υψηλής καθαρότητας για διάφορες αραιώσεις.

## **Προσδιορισμός Περιεκτικότητας Μεθανίου (%)**

Με σκοπό να αξιολογείται η αποτελεσματικότητα και η σωστή λειτουργία του συστήματος, είναι σημαντικό να προσδιορίζεται και να παρακολουθείται η περιεκτικότητα του παραγομένου βιοαερίου σε μεθάνιο. Για τον υπολογισμό του παράγοντα αυτού, λαμβάνεται δείγμα από τον αντιδραστήρα με ένεση και εισάγεται σε χρωματογράφο τύπου Shimadzu GC-2014 με φέρον αέριο τη ήλιο. Η χρωματογραφική στήλη (Carboxen 1000) έχει μήκος 5m και εσωτερική διάμετρο 2,1mm. Χρησιμοποιείται θερμοκρασιακό πρόγραμμα, με αρχική θερμοκρασία στήλης στους 40°C η οποία αυξάνεται σταδιακά με ρυθμό 10°C/min μέχρι τη θερμοκρασία των 185°C όπου και μένει σταθερή για 5 λεπτά. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των αερίων γίνεται με τη βοήθεια προτύπων καμπυλών οι οποίες έχουν προκύψει από μετρήσεις σε πρότυπα διαλύματα αερίων με διαφορετικές συγκεντρώσεις σε μεθάνιο.

Στην Εικόνα 30 διακρίνονται η χρωματογραφική διάταξη Shimadzu GC 2010 που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό των VFAs και η χρωματογραφική διάταξη Shimadzu GC-2014 που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ποσοστού μεθανίου στο παραγόμενο από τον PABR βιοαέριο.



Εικόνα 30. Χρωματογράφος Shimadzu GC-2010 (αριστερά), χρωματογράφος Shimadzu GC 2014 (δεξιά).

### **Ποσοτικός προσδιορισμός Ολικού διαλυτού αζώτου και ολικού διαλυτού οργανικού άνθρακα.**

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του διαλυτού 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). Μέσω της ίδια συσκευής αναλύεται και η περιεκτικότητα του δείγματος δε διαλυτό οργανικό άνθρακα.

### **Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου.**

Ο προσδιορισμός της παροχής του βιοαερίου, που παράγεται εξαιτίας της πραγματοποίησης της αναερόβιας χώνευσης μέσα στον αντιδραστήρα, είναι καθοριστικής σημασίας, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η καλή λειτουργία του.

Για αυτό το λόγο πραγματοποιείται συνεχής μέτρηση της παροχής του βιοαερίου. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται μία ειδική διάταξη με τη βοήθεια της οποίας, σε συνδυασμό με ορισμένους απλούς υπολογισμούς, μετριέται η ημερήσια παροχή του αντιδραστήρα σε βιοαέριο. Η διάταξη αυτή, η οποία ονομάζεται κλικογράφος, αποτελείται από έναν γυάλινο σωλήνα σχήματος «U», ο οποίος περιέχει συγκεκριμένη ποσότητα ορυκτελαίου, από ένα φωτοκύτταρο και μία τρίοδη βάνα, η οποία συνδέεται με τον Πίνακα Ελέγχου του συστήματος.

Όλο το βιοαέριο, που παράγεται μέσα στον αντιδραστήρα, είναι αναγκασμένο να διέλθει μέσω ειδικών σωληνώσεων και να φτάσει στο γυάλινο σωλήνα. Όταν μία ποσότητα βιοαερίου εισέλθει στην δεξιά πλευρά του γυάλινου σωλήνα εκτοπίζει σταδιακά το ορυκτέλαιο προς την πλευρά του φωτοκύτταρου. Όταν η στάθμη του ορυκτελαίου φτάσει σε ένα συγκεκριμένο σημείο και εντοπιστεί από το φωτοκύτταρο, τότε ο Πίνακας Ελέγχου καταγράφει ένα κλικ και ταυτόχρονα η τρίοδη βάνα ανοίγει την είσοδο προς το περιβάλλον και απελευθερώνει αυτή την ποσότητα του βιοαερίου στο περιβάλλον. Τότε, το ορυκτέλαιο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Ο όγκος του βιοαερίου, που αντιστοιχεί σε ένα κλικ, προκύπτει έπειτα από βαθμονόμηση και επιλέγεται να είναι σταθερά ίσος με 0,6 mL. Με αυτό τον τρόπο, καταγράφονται τα κλικ που έχουν πραγματοποιηθεί κάθε ημέρα και υπολογίζεται η παροχή του βιοαερίου για κάθε 24 ώρες, πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των κλικ, που αναγράφονται στον Πίνακα Ελέγχου στο τέλος της ημέρας, με την ποσότητα του

βιοαερίου, που αντιστοιχεί σε ένα κλικ. Είναι εφικτό, κάθε μέρα μετά την καταγραφή των κλικ, αυτά να μηδενίζονται προκειμένου να γίνεται ευκολότερα η καταγραφή των κλικ της επόμενης ημέρας.

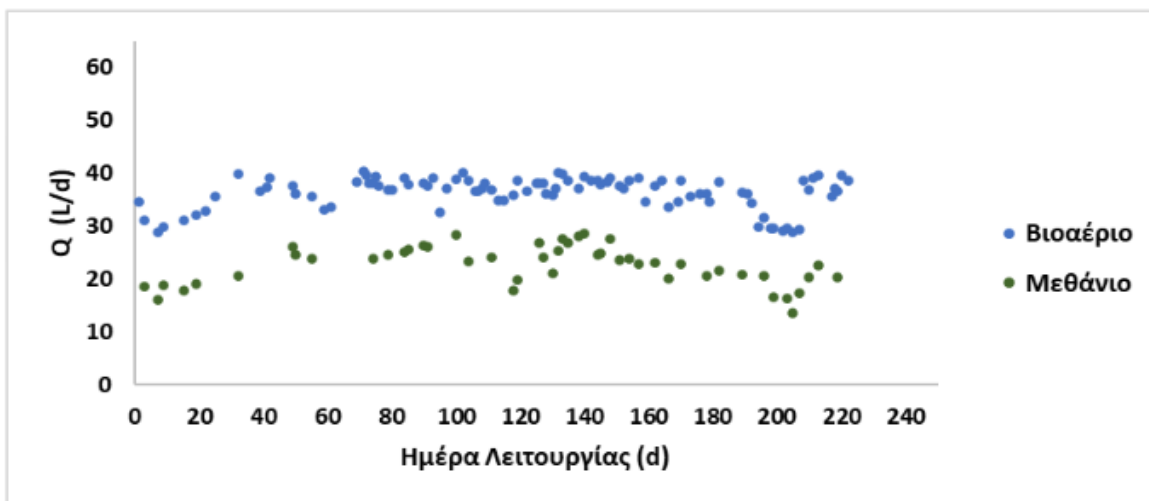
## 6. Αποτελέσματα Πειραματικής μελέτης

Η πειραματική μελέτη της διεργασίας παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου η οποία κυμάνθηκε στο ποσοστό του 94 % . Η απόδοση της διεργασίας λοιπόν ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου είναι ανάλογη της βιολογικής οξειδωσης χωρίς ωστόσο να καταναλώνεται το αντίστοιχο ποσοστό ενέργειας. Ωστόσο η απόδοση της διεργασίας ως προς την απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου ουσιών εξίσου επικίνδυνων περιβαλλοντικά με τον οργανικό άνθρακα, δεν είναι ικανοποιητική. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται συσσώρευση των δυο αυτών ουσιών στον αντιδραστήρα με αποτέλεσμα η εκροή του PABR να χρήζει περαιτέρω επεξεργασίας.

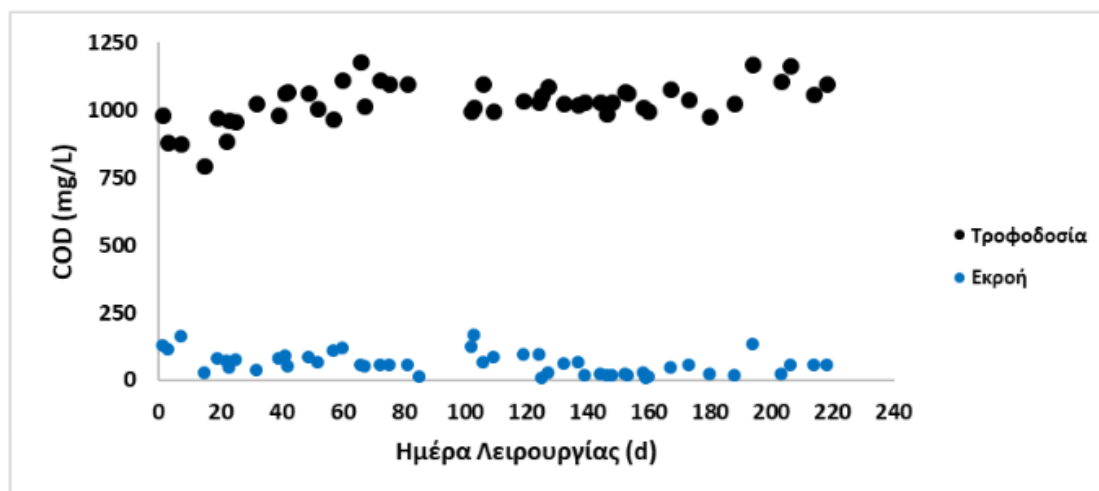
Σε αντίθεση με την βιολογική οξείδωση η αναερόβια χώνευση παρέχει και την δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας μέσω του βιο-μεθανίου που παράγεται. Η μέση παραγωγή μεθανίου για την διεργασία ανέρχεται στα 22,6 L/d. Η ποσότητα αυτή μεταφράζεται σε 0,29 L CH<sub>4</sub> ανά L επεξεργασμένου αποβλήτου. Η απόδοση της αναερόβιας χώνευσης ορίζεται επίσης με βάση τη μέγιστη θεωρητικά μετατροπή, η οποία ορίζεται ως η ποσότητα του μεθανίου που παράγεται εάν όλο το καταναλισκόμενο COD μετατρεπόταν σε μεθάνιο. Με βάση το συγκεκριμένο μέγεθος η απόδοση της αναερόβιας χώνευσης υπολογίστηκε στο 86%, γεγονός που δείχνει ότι το μίγμα FMSW condensate/ συνθετικό αστικό λύμα αποτελεί κατάλληλη τροφοδοσία για την διεργασία. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διεργασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Στην Εικόνα 31 παρουσιάζεται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και βιο-μεθανίου ενώ στην Εικόνα 32η ημερήσια συγκέντρωση του οργανικού φορτίου στην τροφοδοσία και την εκροή του αντιδραστήρα.

Πίνακας 5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναερόβιας συγχώνευσης FMSW condensate και συνθετικών αστικών λυμάτων.

Χαρακτηριστικά	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Παραγωγή Βιοαερίου	36,3 L/d	3.1
Παραγωγή Μεθανίου	22.6 L/d	3.6
Ποσοστό Μεθανίου	63.1 %	6.5
Απόδοση Μεθανογένεσης	86%	12.0
Απομάκρυνση οργανικού φορτίου	94%	4.0
COD Εκροής	62,27 mg/L	39,8
TOC Εκροής	5.36 mg/L	1.42
TN Εκροής	57.96 mg/L	2.65
TP Εκροής	4.7 mg/L	0.23
pH Εκροής	7.41	0.21
Alkalinity mg CaCO <sub>3</sub> /L Εκροής	1775 mg/L	257.3

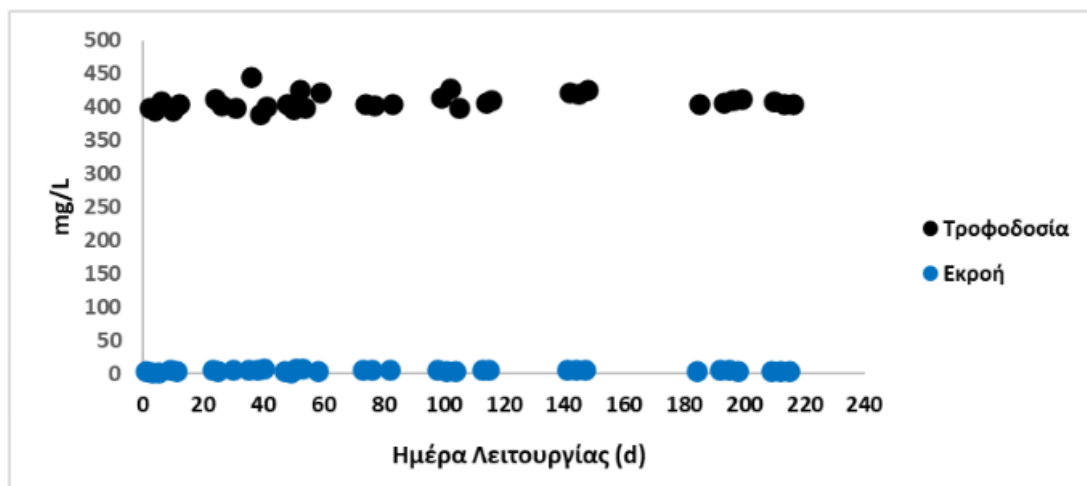


Εικόνα 31. Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου σε L/d στον PABR.



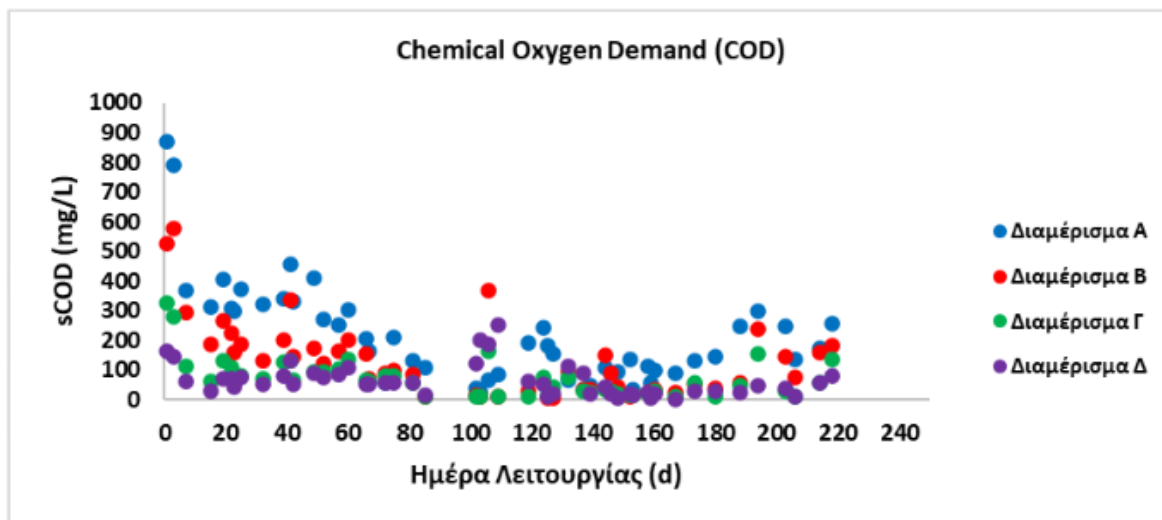
Εικόνα 32. Ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης οργανικού φορτίου στην είσοδο και στην έξοδο του αντιδραστήρα PABR σε μονάδες mg/L sCOD.

Είναι φανερό πως από τις πρώτες κιόλας μέρες της λειτουργίας η διεργασία παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου. Το ολικό COD της διεργασίας βρίσκεται κάτω από το περιβαλλοντικό όριο των 120 mg/L που ορίζει για τα λύματα η νομοθεσία. Η ανωτέρω μείωση του οργανικού φορτίου επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις διαλυτού οργανικού άνθρακα σε μονάδες TOC (mg C/L) όπως φαίνεται στην Εικόνα 35. Η μέθοδος προσδιορισμού του TOC είναι καταλληλότερη και πιο αξιόπιστη για την συγκεκριμένη τάξη μεγέθους.

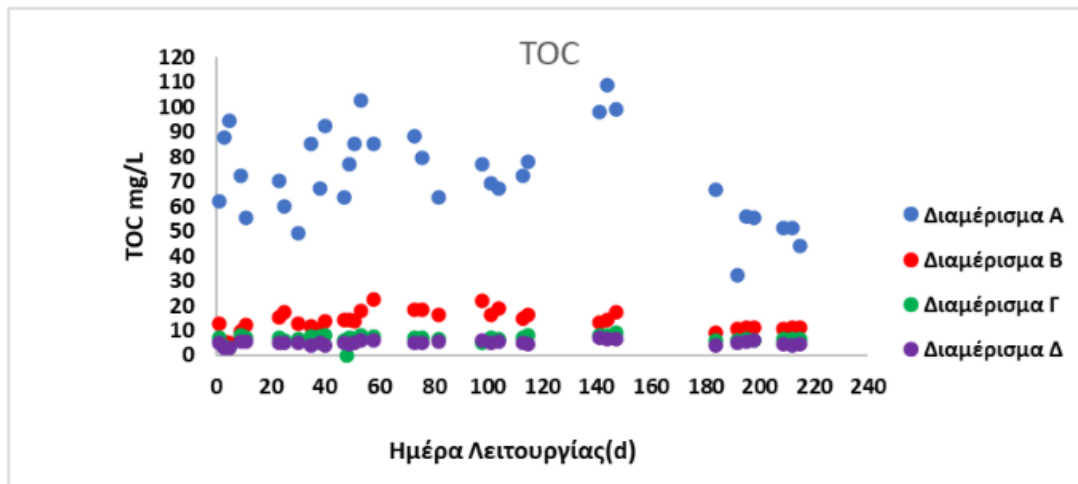


Εικόνα 33. Ημερήσια διακύμανση οργανικού φορτίου στην είσοδο και την έξοδο του PABR σε μονάδες mg/L διαλυτού οργανικού άνθρακα.

Η κατανομή του οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR παρουσίαζε γραμμική μείωση από το διαμέρισμα τροφοδοσίας στο διαμέρισμα εκροής. Η συγκεκριμένη κατανομή διακρίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 34 όπου φαίνεται η ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου σε μονάδες COD στον PABR καθώς και στο διάγραμμα της Εικόνας 35 όπου παρουσιάζεται η αντίστοιχη συγκέντρωση σε μονάδες TOC.

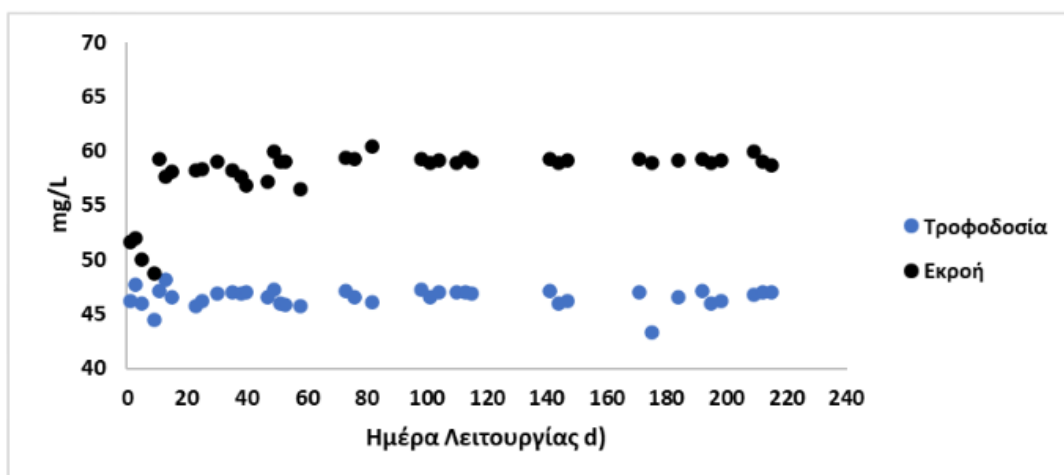


Εικόνα 34. Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR σε μονάδες sCOD.



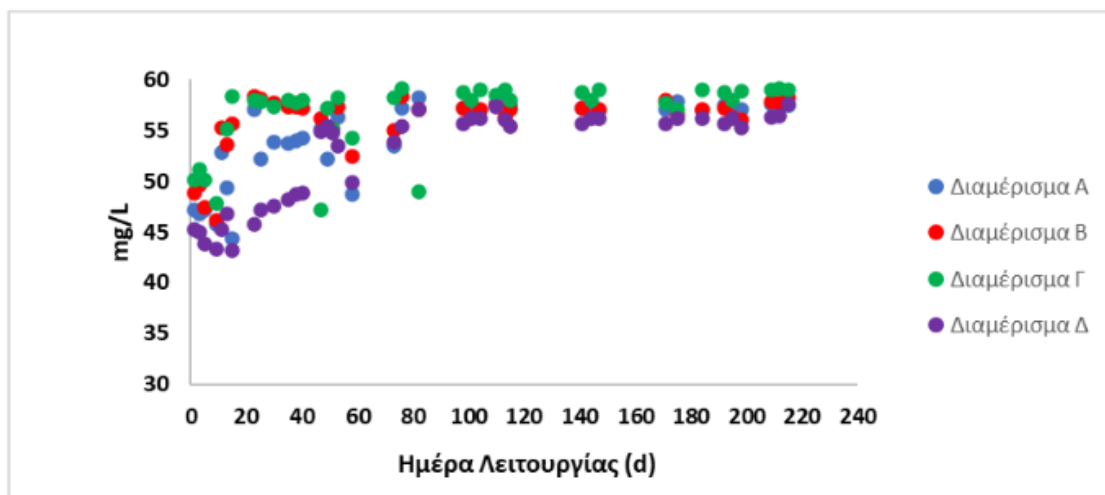
Εικόνα 35. Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR σε μονάδες TOC.

Είναι προφανές πως η διεργασία παρουσιάζει ικανοποιητικά επίπεδα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, εφάμιλλα αυτών της βιολογικής οξείδωσης. Επιπλέον από την κατανομή της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου στον PABR είναι αντιληπτό πως η ρεολογική του συμπεριφορά προσομοιάζει την αναμενόμενη. Ο PABR συμπεριφέρεται όπως ένας αντίστοιχος ABR αντιδραστήρας με τέσσερα διαδοχικά και διακριτά διαμερίσματα. Ωστόσο όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 5 καθώς και από το διάγραμμα της Εικόνας 36 δεν συμβαίνει το ίδιο με την συγκέντρωση του ολικού αζώτου. Συγκεκριμένα το άζωτο είναι σχεδόν τετραπλάσιο του περιβαλλοντικού ορίου των 12mg/L και στο συντριπτικό του ποσοστό είναι αμμωνιακής φύσης. Επιπροσθέτως η διεργασία παρουσιάζει συσσώρευση αζώτου καθώς στον αντιδραστήρα εντοπίζονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από ότι στην τροφοδοσία. Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση αζώτου στα Διαμερίσματα του PABR.



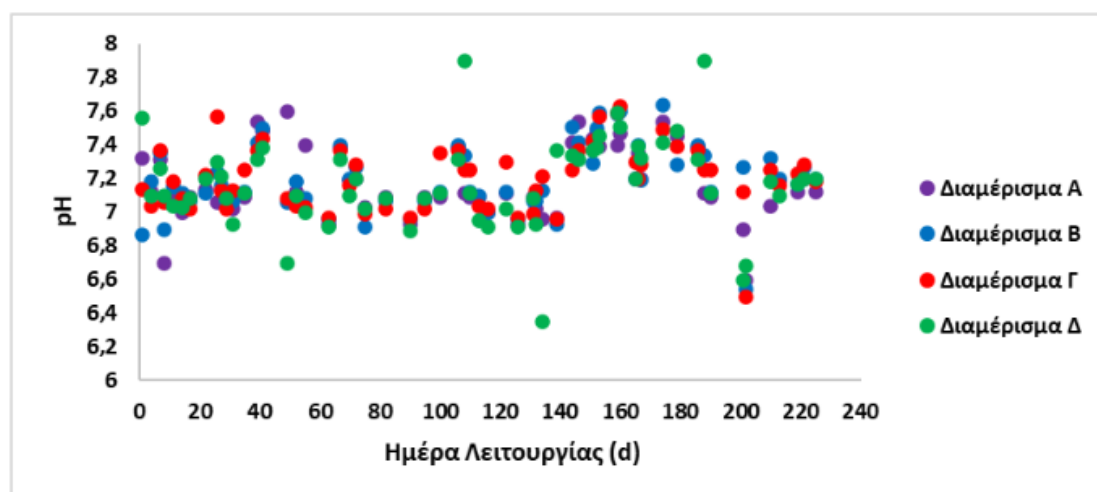
Εικόνα 36. Ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου στην τροφοδοσία και στην εκροή του PABR.



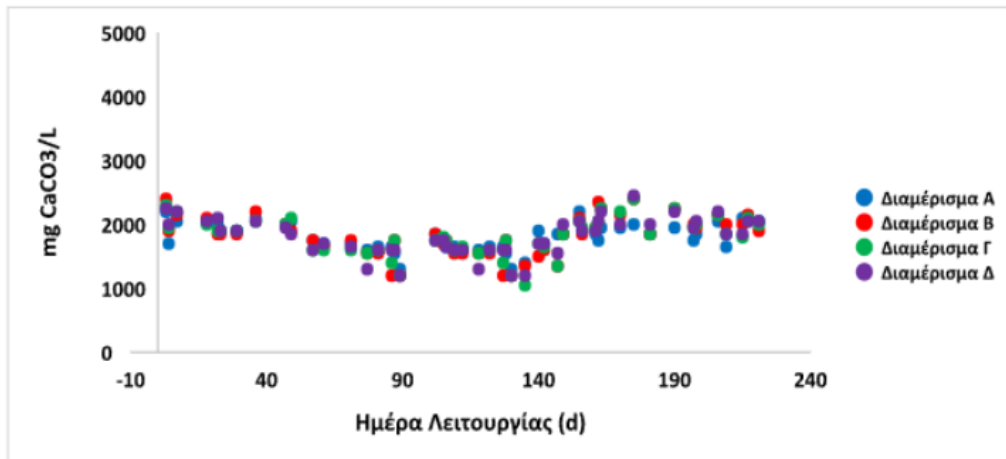


Εικόνα 37. Ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου στα διαμερίσματα του PABR.

Το pH της διεργασίας παρουσίασε σταθερότητα χωρίς διακυμάνσεις. Η τιμή του pH παρέμεινε στο εύρος 7,0 – 7,5 καθ’ όλη την πειραματική φάση. Η αλκαλικότητα της διεργασίας παρουσίασε τάση μείωσης κατά την πειραματική φάση, ωστόσο με κατάλληλη προσθήκη  $\text{NaHCO}_3$  επανήλθε στα επιθυμητά επίπεδα. Στις Εικόνες 38 και 39 παρουσιάζονται η ημερήσια τιμή του pH στα διαμερίσματα του PABR και η ημερήσια τιμή της ολικής αλκαλικότητας αντίστοιχα. Η μέση τιμή του pH και της ολικής αλκαλικότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

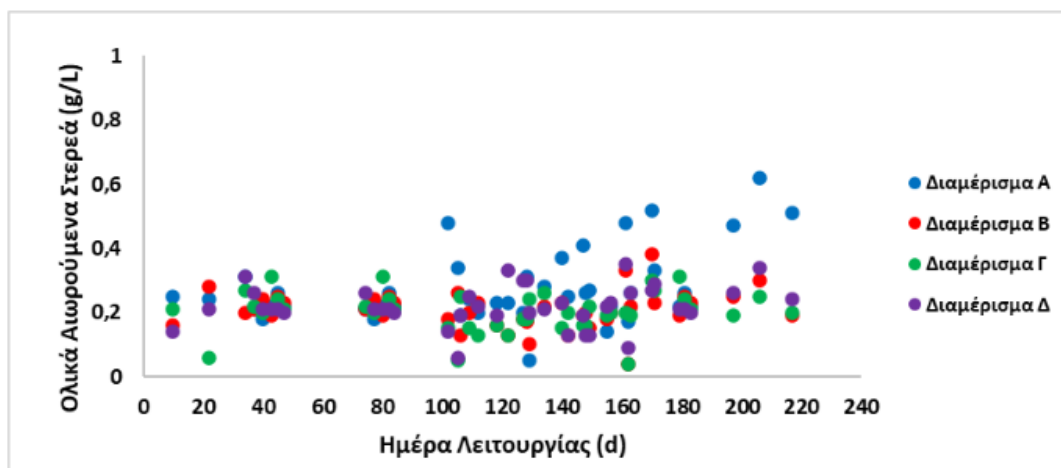


Εικόνα 38. Ημερήσια τιμή pH στα διαμερίσματα του PABR.

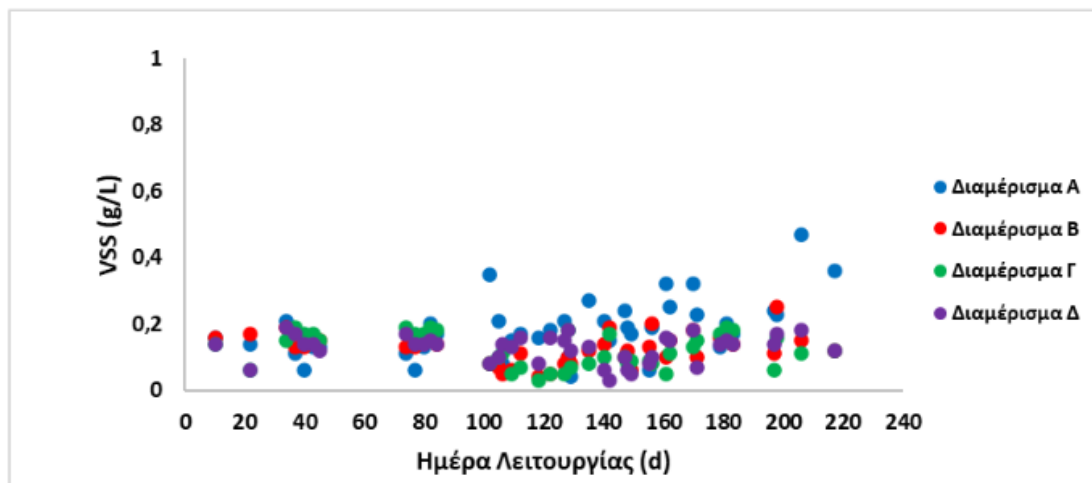


Εικόνα 39. Ημερήσια τιμή της ολικής αλκαλικότητας στα διαμερίσματα του PABR.

Μια τάση που εμφανίστηκε κατά την περιγραφόμενη πειραματική διεργασία είναι η τάση αύξησης της συγκέντρωσης των στερεών στον 1<sup>ο</sup> τη σειρά διαμέρισμα του PABR (Διαμέρισμα Α) σε σχέση με τα υπόλοιπα τρία διαμερίσματα. Η μέση συγκέντρωση TSS και VSS στα διαμερίσματα του PABR αναφέρεται στον Πίνακα 6. Στις Εικόνες 40 και 41 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών και πηκτικών αιωρούμενων στερεών στα διαμερίσματα του PABR.

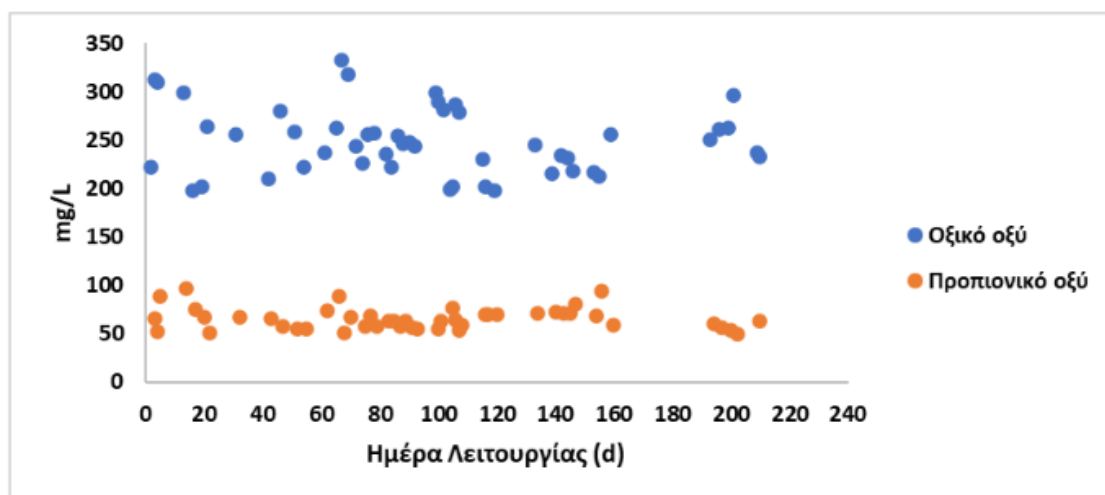


Εικόνα 40. Ημερήσια συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στα διαμερίσματα του PABR.

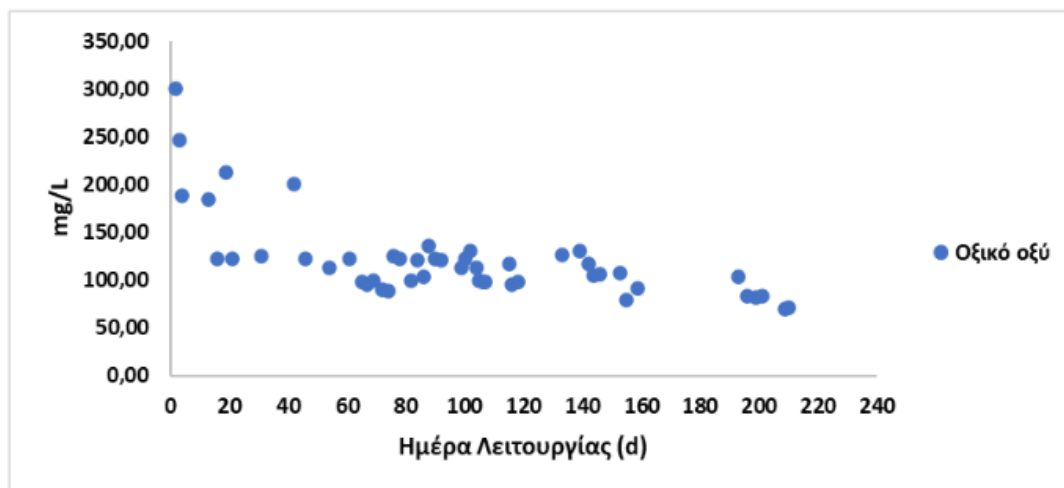


Εικόνα 41. Ημερήσια συγκέντρωση πτητικών αιωρούμενων στερεών στα διαμερίσματα του PABR.

Όσον αφορά την συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων στον PABR σημαντικές ποσότητες VFAs ανιχνεύονται στην τροφοδοσία του PABR, τα οποία προέρχονται από την συμμετοχή του FMSW condensate σε αυτήν. Ωστόσο η συγκέντρωσή τους είναι σημαντικά χαμηλότερη λόγω της ανάμιξης με το συνθετικό αστικό απόβλητο. Επιπλέον κατά την πειραματική διεργασία δεν ανιχνεύθηκαν VFAs στα διαμερίσματα του PABR, πέραν του 1<sup>ου</sup> κατά σειρά εισόδου στον PABR διαμέρισμα. Στην τροφοδοσία του PABR ανιχνεύθηκαν οξικό και προπιονικό οξύ, με το οξικό να είναι κυρίαρχο ενώ στο 1<sup>ο</sup> διαμέρισμα του PABR ανιχνεύθηκε μόνο οξικό οξύ. Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην τροφοδοσία του PABR, ενώ στην Εικόνα 43 η αντίστοιχη συγκέντρωση στο 1<sup>ο</sup> διαμέρισμα του PABR.



Εικόνα 42. Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην τροφοδοσία του PABR.



Εικόνα 43. Συγκέντρωση οξικού οξέος στο 1<sup>ο</sup> κατά σειρά εισόδου διαμέρισμα του PABR.

Τα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από την πειραματική μελέτη της διεργασίας οδηγούν στο συμπέρασμα πως η διεργασία είναι κατάλληλη για την άμεση επεξεργασία του μίγματος FMSW condensate και αστικών λυμάτων. Συγκεκριμένα τόσο ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και ως προς την παραγωγή μεθανίου το συγκεκριμένο μοντέλο διαχείρισης παρουσιάζει αισιόδοξα αποτελέσματα. Επιπλέον επιβεβαιώνεται ότι η υπάρχουσα τεχνολογία ταχύρρυθμων αναερόβιων συστημάτων είναι ικανή να αντικαταστήσει την βιολογική οξείδωση. Η διεργασία παρουσίασε σταθερότητα καθ' όλη την διάρκεια της.

Ωστόσο, η εκροή του PABR δεν αποτελεί ένα σταθεροποιημένο απόβλητο το οποίο μπορεί να απορριφθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα το ολικό άζωτο της εκροής του PABR είναι σημαντικά υψηλότερο από το επιτρεπτό περιβαλλοντικό όριο. Επίσης ο ολικός φώσφορος στην εκροή του αντιδραστήρα είναι υπερδιπλάσιος από το επιτρεπτό όριο των 2,0 mg/L για αστικές περιοχές με έως και 100000 κατοίκους.

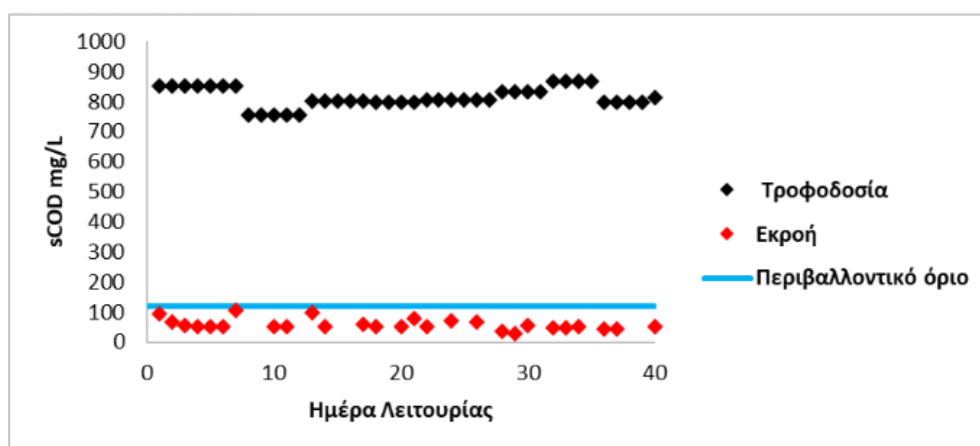
Παρ' όλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί πως η απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου με βάση την υφιστάμενη διεργασία επεξεργασίας των αστικών λυμάτων δεν λαμβάνει χώρα στην δεξαμενή της βιολογικής οξείδωσης. Ειδικότερα για την ταυτόχρονη απομάκρυνση αζώτου, φωσφόρου και οργανικού άνθρακα είναι αναγκαία η ύπαρξη αναερόβιων, αερόβιων και ανοξικών συνθηκών. Συνεπώς η διεργασία που μελετήθηκε θα μπορούσε να συμβάλλει στην μείωση της ενέργειας της βιολογικής οξείδωσης εάν εκείνη δέχεται ως υπόστρωμα ένα σημαντικό κλάσμα αστικών λυμάτων. Με αυτό τον τρόπο θα επιτευχθεί αντίστοιχη απομάκρυνση οργανικού φορτίου, με σαφώς χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Για την ολοκλήρωση του προτεινόμενου πλάνου συν-διαχείρισης FMSW condensate και MWW προστίθεται στην έξοδο του συστήματος αναερόβιας χώνευσης μια διεργασία ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αζώτου και φωσφόρου η οποία μελετάτε στην συνέχεια.

Πίνακας 6. Μέση τιμή αναλυόμενων παραμέτρων της αναερόβιας χώνευσης στα διαμερίσματα του PABR.

	Διαμέρισμα Α	Διαμέρισμα Β	Διαμέρισμα Γ	Διαμέρισμα Δ
<b>COD mg/L</b>	217.8	128.6	70.0	64.8
<b>TOC mg/L</b>	72.7	13.9	6.8	5.1
<b>TN mg/L</b>	54.6	55.8	56.7	52.4
<b>pH</b>	7.2	7.2	7.1	7.2
<b>Alkalinity mg/L</b>	1974	1971	1976	1949
<b>TSS g/L</b>	0.35	0.28	0.27	0.29
<b>VSS g/L</b>	0.21	0.18	0.17	0.17
<b>Acetic Acid mg/L</b>	120.6	-	-	-

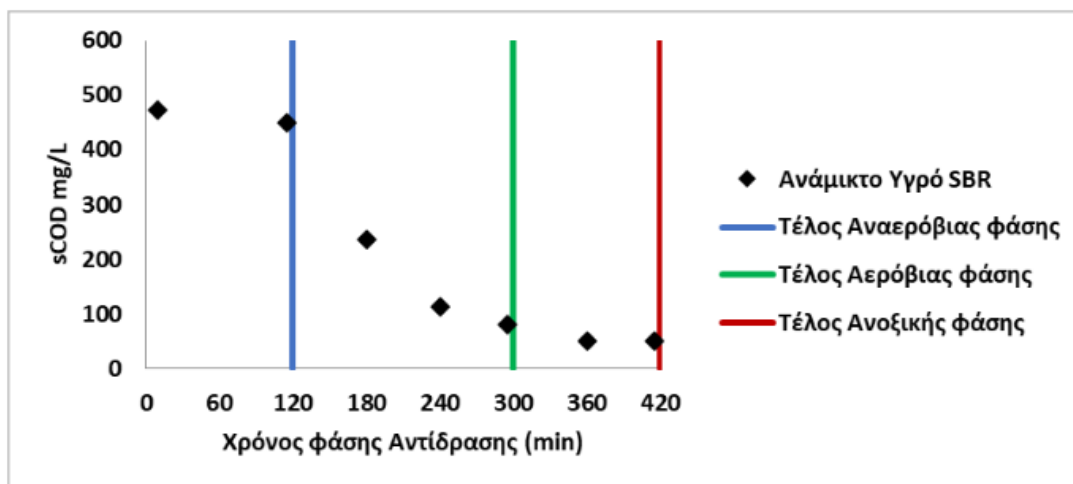
Ο κύκλος λειτουργίας που σχεδιάστηκε για την επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος, ο οποίος περιλαμβάνει αναερόβιο, αερόβιο και ανοξικό στάδιο έδειξε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ικανότητα επεξεργασίας της εκροής του PABR, αφού αναμιχθεί με FMSW condensate. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί, ότι στην προκειμένη περίπτωση μπορεί αντί της ανάμιξης της εκροής του PABR με FMSW condensate, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εξωτερική πηγή άνθρακα στον SBR, κατά το ανοξικό στάδιο, ωστόσο κάτι τέτοιο θα αύξανε σημαντικά το λειτουργικό κόστος της διεργασίας. Στην Εικόνα 44 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση της τροφοδοσίας του SBR και της εκροής του. Να σημειωθεί πως κάθε κύκλο λειτουργίας διαρκεί 11 ώρες, με αποτέλεσμα ο SBR να ολοκληρώνει 2 κύκλους λειτουργίας την ημέρα. Κατά την μελέτη της επεξεργασίας εκροής αναερόβιου αντιδραστήρα PABR, ο αντιδραστήρας SBR λειτούργησε για 80 πλήρεις κύκλους.



Εικόνα 44. Ημερήσια συγκέντρωση τροφοδοσίας και εκροής αντιδραστήρα SBR. Η τροφοδοσία αποτελείται από εκροή αναερόβιου αντιδραστήρα PABR και FMSW condensate.

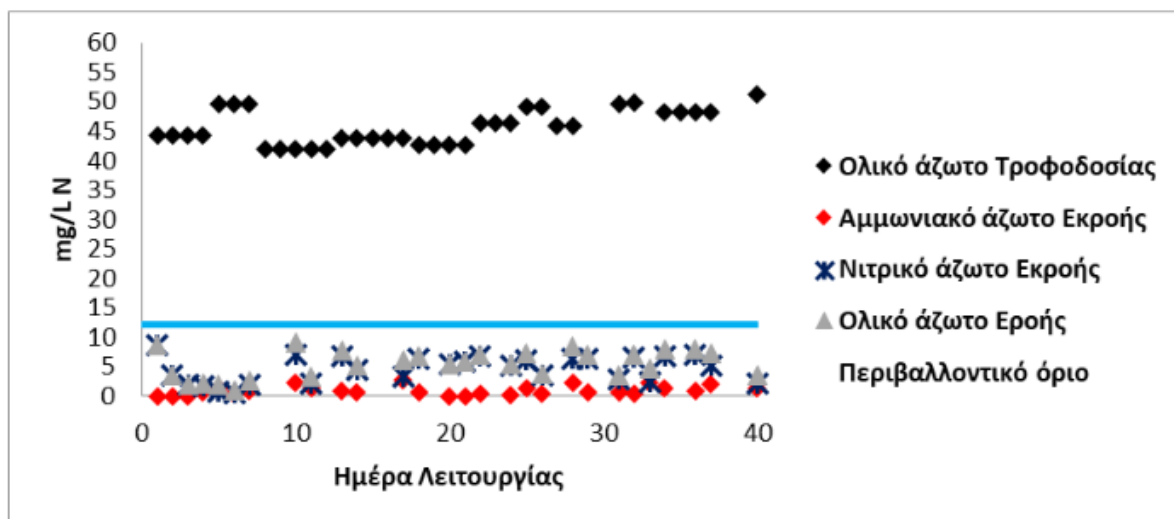
Όπως ήταν αναμενόμενο και από τις προηγούμενες πειραματικές φάσεις ο αντιδραστήρας επέδειξε ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου. Συγκεκριμένα από τις

πρώτες ημέρες λειτουργίας παρατηρείται επαρκής απομάκρυνση COD στα επιθυμητά επίπεδα. Η συγκέντρωση της εκροής δεν παρουσίασε σημαντικές διακυμάνσεις και βρισκόταν συνεχώς κάτω του περιβαλλοντικού ορίου των 120 mg COD/L. Σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο της διεργασίας απομάκρυνση COD επιτυγχάνεται τόσο στην αερόβια φάση μέσω της βιολογικής οξειδωσης, όσο και κατά το ανοξικό στάδιο ως αποτέλεσμα της μετατροπής των νιτρικών σε αέριο άζωτο, όπως περιγράφηκε προηγουμένως κατά την διαδικασία της απονιτροποίησης. Για να μελετηθεί σε μεγαλύτερο βάθος η διεργασία διενεργήθηκαν αναλύσεις sCOD στο ανάμικτο υγρό του αντιδραστήρα κατά το στάδιο της αντίδρασης. Στην Εικόνα 45 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου του ανάμικτου υγρού μέσα στον αντιδραστήρα. Τα δεδομένα συγκέντρωσης που αναφέρονται προήλθαν ως η μέση τιμή της συγκέντρωσης τεσσάρων σειρών μετρήσεων που διεξάγονταν στον αντιδραστήρα ανά 10 ημέρες.



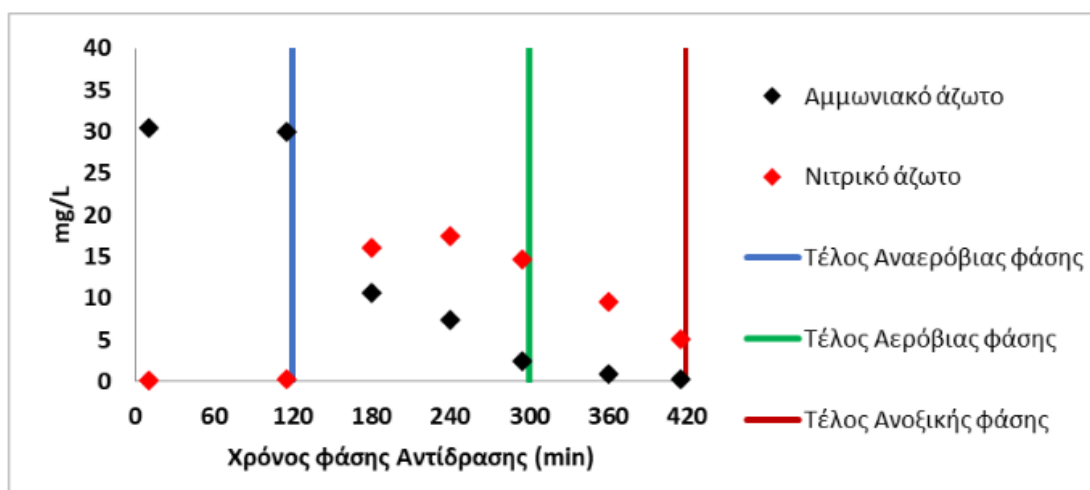
Εικόνα 45. Συγκέντρωση διαλυτού οργανικού φορτίου στο ανάμικτο υγρό του SBR κατά το στάδιο της αντίδρασης.

Αρχικά παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μείωση του οργανικού φορτίου κατά την διάρκεια της αναερόβιας φάσης της αντίδρασης. Στην συνέχεια επιβεβαιώνεται πως η μεγαλύτερη και σημαντικότερη απομάκρυνση οργανικού φορτίου επέρχεται κατά την αερόβια φάση. Επιπλέον παρατηρείται μικρή μείωση οργανικού φορτίου στον SBR κατά την ανοξική φάση της αντίδρασης. Σημαντικότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει στην συγκεκριμένη μελέτη η εξέταση της αντίστοιχης συγκέντρωσης του αζώτου. Κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης πειραματικής φάσης η μελέτη του αζώτου είναι πέραν από ποσοτική και ποιοτική. Συγκεκριμένα εξετάζεται και η μορφή στην οποία βρίσκεται το άζωτο στον αντιδραστήρα, καθώς και στην εκροή του. Σημαντικό ρόλο παίζει στην διεργασία η ανίχνευση των νιτρικών ιόντων, καθώς αυτό θα σημαίνει πως υλοποιείται στον SBR η αντίδραση της νιτροποίησης. Στην Εικόνα 46 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου της τροφοδοσίας καθώς και η ημερήσια συγκέντρωση αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου της εκροής του αντιδραστήρα.



Εικόνα 46. Συγκέντρωση ολικού αζώτου στην τροφοδοσία του SBR και στην εκροή του σε μορφή νιτρικών και αμμωνιακού

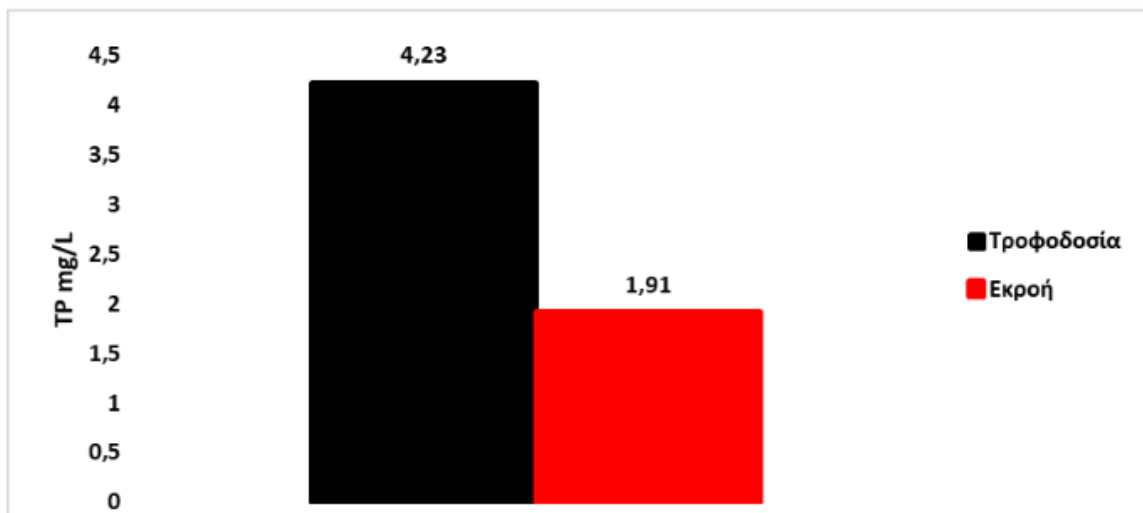
Παρατηρώντας το διάγραμμα της Εικόνας 46 γίνεται κατανοητό πως διεργασία παρουσιάζει επαρκή απομάκρυνση αζώτου. Επιπλέον φαίνεται πως το μεγαλύτερο ποσοστό της συγκέντρωσης αζώτου στην εκροή βρίσκεται σε μορφή νιτρικών ιόντων. Κατά την διεργασία δεν ανιχνεύθηκαν συγκεντρώσεις νιτρώδων ιόντων παρά μόνο νιτρικών. Το σύνολο του αζώτου στην εκροή του αντιδραστήρα σε όλες τις μορφές του είναι χαμηλότερο του περιβαλλοντικού ορίου των 12 mg/L. Ωστόσο, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της διακυμάνσεις των διάφορων μορφών αζώτου κατά το στάδιο της αντίδρασης στο ανάμικτο υγρό του αντιδραστήρα όπως έγινε για το οργανικό φορτίο. Στο διάγραμμα της Εικόνας 47 παρουσιάζεται η διακύμανση του αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου στον αντιδραστήρα κατά το στάδιο της αντίδρασης. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν την ίδια χρονική στιγμή με τις αντίστοιχες μετρήσεις του οργανικού φορτίου που παρουσιάστηκαν στο διάγραμμα της Εικόνας 45.



Εικόνα 47. Συγκέντρωση αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου στο ανάμικτο υγρό του SBR κατά το στάδιο της αντίδρασης.

Από τα στοιχεία του διαγράμματος της Εικόνας 47 γίνεται αντιληπτό πως η αντίδραση της νιτροποίησης λαμβάνει χώρα κατά την αερόβια φάση της διεργασίας. Στην αερόβια φάση παρατηρείται ταυτόχρονη μείωση αμμωνιακού και αύξηση νιτρικού αζώτου. Επίσης παρατηρείται πως η αντίδραση της απονιτροποίησης εκκινεί πριν το τέλος του αερόβιας φάσης. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στο γεγονός πως κατά την ανακυκλοφορία του ανάμικτου υγρού στον SBR, μέσω της αντλίας ανακυκλοφορίας, δημιουργούνται σε συγκεκριμένα σημεία ανοξικές συνθήκες στον αντιδραστήρα. Η διάχυση δηλαδή του διοχετευόμενου οξυγόνου μέσω του αερισμού δεν επιτελείται ομοιογενώς στον ενεργό όγκο του SBR. Στην ανοξική φάση της διεργασίας παρατηρείται όπως είναι αναμενόμενο μείωση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων αλλά όχι μηδενισμός της. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από την απουσία διαθέσιμου οργανικού φορτίου κατά την συγκεκριμένη φάση, όπως διακρίνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 45.

Όσον αφορά την συμπεριφορά του αντιδραστήρα ως προς την απομάκρυνση φωσφόρου δεν έχει επιτευχθεί επαρκής απομάκρυνση ωστόσο η συγκέντρωση του διαλυτού φωσφόρου στην έξοδο του SBR βρίσκεται αρκετά κοντά στο περιβαλλοντικό όριο των 2.0 mg/L.

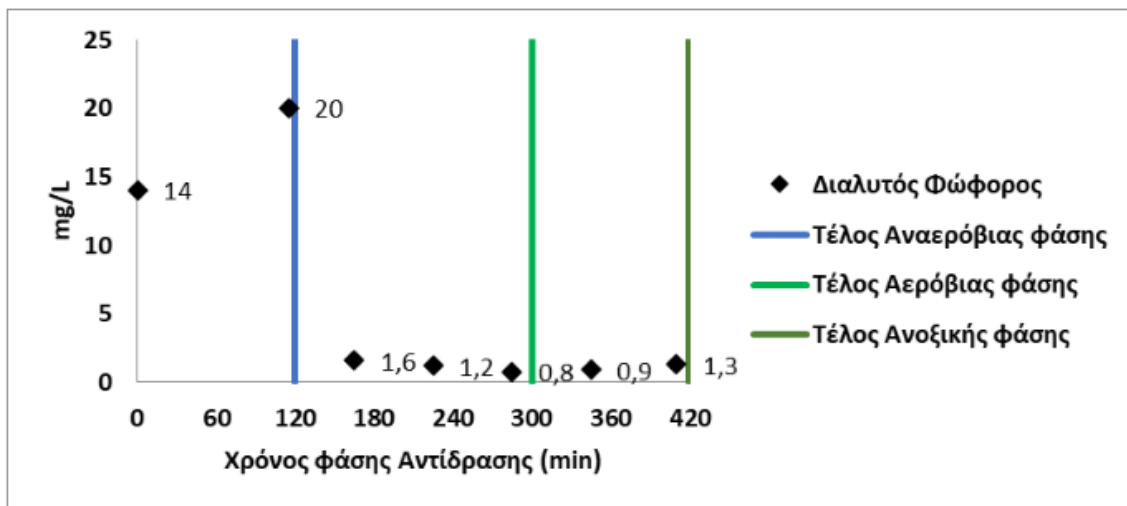


Εικόνα 48. Μέση συγκέντρωση διαλυτού φωσφόρου στην τροφοδοσία και στην εκροή του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια της διεργασίας

Από το διάγραμμα της Εικόνας 48 είναι εμφανές πως υπάρχει μέση μείωση του διαλυτού φωσφόρου του αποβλήτου κατά 55%. Ωστόσο η τελική συγκέντρωση του φωσφόρου στην εκροή του SBR είναι αρκετά κοντά στο περιβαλλοντικό όριο. Η μη ικανοποιητική απόδοση του συστήματος ως προς αυτή την διεργασία οφείλετε στην μη επαρκή ανάπτυξη φώσφορο βακτηρίων στην ενεργό λύ του συστήματος.

Στην Εικόνα 49 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης του φωσφόρου κατά την διάρκεια του σταδίου της αντίδρασης της διεργασίας.





Εικόνα 49. Μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυτού φωσφόρου στο ανάμικτο υγρό του SBR κατά την διάρκεια του σταδίου της αντίδρασης.

Αρχικά παρατηρείται πως ο διαλυτός φώσφορος είναι μεγαλύτερος κατά πολύ από την τροφοδοσία την χρονική στιγμή μηδέν. Η χρονική στιγμή μηδέν είναι το σημείο όπου ο αντιδραστήρας έχει τροφοδοτηθεί πλήρως και ξεκινάει το στάδιο της αντίδρασης. Η αυξημένη συγκέντρωση διαλυτού ολικού φωσφόρου στο ανάμικτο υγρό του αντιδραστήρα σημαίνει πως υπάρχει υψηλή ποσότητα διαλυτού φωσφόρου στην ενεργό ιλύ. Η ενεργός ιλύς αποτελεί το 1:3 του συνολικού όγκου του ανάμικτου υγρού. Η μείωση του φωσφόρου του διαλυτού φωσφόρου ξεκινάει στον αντιδραστήρα λίγο πριν την δεύτερη ώρα του αερισμού. Καθ' όλη την διάρκεια της φάσης αντίδρασης ο διαλυτός φώσφορος κυμαίνεται σε επίπεδα κάτω των 2,0 mg/L

Το συμπέρασμα που εξάγεται από την μελέτη της δυνατότητας του SBR να επεξεργαστεί κατάλληλα την αναερόβια εκροή του PABR έχει διπλή ερμηνεία. Εάν εξετασθεί η διεργασία ως προς την αποτελεσματικότητά της, τα δεδομένα είναι ικανοποιητικά. Ο οργανικός άνθρακας καταναλώνεται σε ποσοστά πάνω από 90% και η συγκέντρωση του ολικού αζώτου και του φωσφόρου στην έξοδο του συστήματος είναι κάτω από το περιβαλλοντικό όριο. Ωστόσο για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη διεργασία χρειάστηκε να προστεθεί στην τροφοδοσία του SBR και FMSW condensate πέραν από το χωνεμένο υπόλειμμα του PABR. Το γεγονός αυτό είναι αρκετά προβληματικό για το προτεινόμενο σενάριο συν-διαχείρισης υγρών αστικών λυμάτων και FMSW condensate. Το FMSW condensate παράγεται μέσω ξήρανσης τροφικών υπολειμμάτων. Η ποσότητα παραγωγής του είναι συγκεκριμένη και εξαρτάται από το πληθυσμιακό ισοδύναμο της περιοχής που συλλέγονται τα τροφικά απόβλητα. Συνεπώς η ανάγκη χρήσης του FMSW condensate στην τροφοδοσία του SBR μειώνει την διαθέσιμη προς αναερόβια χώνευση ποσότητα.

## 7. Συμπεράσματα

Η διερεύνηση της συν-επεξεργασίας των αστικών λυμάτων με συμπύκνωμα υγρών υπολείμματα τροφίμων (FMSW condensate) μέσω της διεργασίας αναερόβιας χώνευσης σε αντιδραστήρα PABR απέδωσε πολύτιμες γνώσεις και συμπεράσματα που έχουν σημασία τόσο για τις μεθοδολογίες επεξεργασίας λυμάτων όσο και για τη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας.

Η πειραματική μελέτη επέδειξε μια αξιοσημείωτη πτυχή της διεργασίας αναερόβιας χώνευσης με τη χρήση του αντιδραστήρα PABR - συγκεκριμένα, την ικανότητα επίτευξης εντυπωσιακού ποσοστού απομάκρυνσης οργανικού φορτίου 94%. Αυτή η απόδοση είναι συγκρίσιμη με εκείνη της βιολογικής οξείδωσης, το οποίο είναι ένα αξιοσημείωτο επίτευγμα από μόνο του. Αυτό που διαφοροποιεί τη διαδικασία αυτή είναι η ικανότητά της να επιτυγχάνει τέτοια ποσοστά απομάκρυνσης χωρίς να επιβαρύνεται με τη συνοδευτική κατανάλωση ενέργειας που χρειάζεται η βιολογική οξείδωση. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης παρουσίασε και προβλήματα, όπως είναι τα αυξημένα ποσοστά ενώσεων αζώτου και φωσφόρου στην εκροή του PABR. Τα στοιχεία αυτά είναι επιβλαβή όταν συσσωρεύονται στο περιβάλλον. Η συσσώρευση αζώτου και φωσφόρου στον αντιδραστήρα υπογράμμισε την αναγκαιότητα για περαιτέρω επεξεργασία των λυμάτων, έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί το εν λόγω πρόβλημα.

Σε αντίθεση με τη βιολογική οξείδωση, η οδός της αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζει ένα διπλό πλεονέκτημα: την αποτελεσματική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου σε συνδυασμό με ανάκτηση ενέργειας που εκδηλώνεται με την παραγωγή βιο-μεθανίου. Το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης καθόρισε ένα μέσο ημερήσιο ρυθμό παραγωγής μεθανίου 22,6 L ή 0,29 L CH<sub>4</sub> ανά L επεξεργασμένου λύματος. Η αξιολόγηση της απόδοσης της διεργασίας, χρησιμοποιώντας τη θεωρητική μέγιστη μετατροπή ως σημείο αναφοράς, αποκάλυψε μια εντυπωσιακή απόδοση 86%. Αυτό όχι μόνο ενισχύει τη βιωσιμότητα της αναερόβιας χώνευσης, αλλά υπογραμμίζει επίσης τις δυνατότητες για σημαντική παραγωγή ενέργειας σε αυτό το πλαίσιο.

Επιπλέον, η μελέτη ρίχνει φως σε διάφορες κρίσιμες παρατηρήσεις σχετικά με τη διαδικασία του PABR. Η μετρούμενη συνολική χημική απαίτηση οξυγόνου (COD) παρέμεινε σταθερά κάτω από το ρυθμιστικό όριο των 120 mg/L, γεγονός που αντανάκλα στην άμεση ικανότητα της διεργασίας για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από τις μετρήσεις ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) σε διάφορα διαμερίσματα του PABR. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν απτές αποδείξεις της αποτελεσματικής απομάκρυνσης του οργανικού άνθρακα.

Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι στη διεργασία εμφανίζονταν αυξημένα επίπεδα αζώτου, ιδίως με τη μορφή αμμωνιακού αζώτου, τα οποία υπερέβαιναν κατά πολύ τα περιβαλλοντικά όρια. Η μελέτη έφερε στο προσκήνιο τη διαπίστωση της συσσώρευσης αζώτου εντός του αντιδραστήρα, που ξεπερνούσε ακόμη και τα επίπεδα εισροής.

Επιπλέον ενώ το pH παρέμεινε σταθερό καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, η αλκαλικότητα της διεργασίας παρουσίασε τάση μείωσης κατά την πειραματική φάση, ωστόσο με κατάλληλη προσθήκη NaHCO<sub>3</sub> επανήλθε στα επιθυμητά επίπεδα.

Συνοπτικά, η πειραματική μελέτη ανέδειξε την αποτελεσματικότητα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης στο πλαίσιο του PABR για τη συνεπεξεργασία συμπυκνώματος FMSW και αστικών λυμάτων. Τα επιτεύγματα που σημειώθηκαν, περιλαμβάνουν την αποτελεσματική απομάκρυνση

του οργανικού φορτίου και την ταυτόχρονη παραγωγή μεθανίου, που σηματοδοτεί την παραγωγή ενέργειας με μειωμένο λειτουργικό κόστος σε σύγκριση με τη βιολογική οξείδωση. Παρ' όλα αυτά, η συνολική καταλληλότητα της εκροής του PABR για τη περιβαλλοντικά ασφαλή διάθεση των λυμάτων, διακυβεύεται και από τη παρουσία των επιπέδων αζώτου και φωσφόρου, που ξεπέρασαν τα προβλεπόμενα όρια που ορίζει ο νόμος. Αυτό οδήγησε στην εφαρμογή μιας πολύπλευρης προσέγγισης με στόχο την ταυτόχρονη απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, του αζώτου και του φωσφόρου. Έτσι αξιοποιήθηκε, στη συνέχεια, η βιολογική οξείδωση και ο αντιδραστήρας SBR. Μέσω της συγκεκριμένης διεργασίας παρατηρήθηκε, σημαντική μείωση του του αζώτου, σε όλες τις μορφές του, κάτω από το καθιερωμένο περιβαλλοντικό όριο, των 12 mg/L στην εκροή του SBR. Τέλος, ως μη ικανοποιητική αξιολογείται η μείωση των επιπέδων του φωσφόρου. Παρότι ο διαλυτός φώσφορος μειώνεται κατά 55% παραμένει πολύ κοντά στο περιβαλλοντικό όριο των 2 mg/L.

#### **Βιβλιογραφία:**

- [1] Manzoor Qadir, Pay Drechsel, Blanca Jimenez Cisneros, Younggy Kim, Amit Pramanik, Praem Mehta, Oluwabusola Olaniyan, Oluwabusola Olaniyan. (2019). Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source
- [2] United Nations World Water Development Report (2017), Wastewater The Untapped Resource.
- [3] World Urbanization Prospects. (2018). Population division of the department of economic and social affairs of the United Nations.
- [4] Eurostat. (2019). Data on generation and discharge of wastewater in volume in EU member countries, potential EU candidate countries and other European countries.
- [5] FAO-AQUASTAT. (2019). Global information system on water and agriculture.
- [6] GWI (Global Water Intelligence). (2015). Country-specific data on total volume of municipal wastewater produced at the national level.
- [7] Λυμπεράτος Γ., Βαγενάς Δ. (2016). Διαχείριση υγρών αποβλήτων. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [8] Verstraete, W., Van de Caveye, P., & Diamantis, V. (2009). Maximum use of resources presents in domestic “used water”. *Bioresource Technology*, 100(23), 5537–5545.
- [9] Frijns, J., Hofman, J., & Nederlof, N. (2013). The potential of (waste)water as energy carrier. *Energy Conversion and Management*, 65, 357–363.

- [10] Μαρκαντωνάτος Γ. (1990). Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων. Β Έκδοση.
- [11] Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources (Oxford University Press, New York)
- [12] European Environment Union. Beyond water quality — Sewage treatment in a circular economy. (2022). [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/beyond-water-quality-sewage-treatment>
- [13] European Commission. Waste Framework Directive. [Online]. Available: [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en)
- [14] European Commission. Circular Economy Implementation in Greece. [Online]. Available: [https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\\_proj\\_id=7404](https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=7404)
- [15] Eurostat. Food waste and food waste prevention - estimates. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food\\_waste\\_and\\_food\\_waste\\_prevention\\_-\\_estimates#In\\_the\\_supply\\_and\\_consumption\\_sectors.2C\\_food\\_waste\\_generation\\_may\\_represent\\_10\\_percent\\_of\\_food\\_supplied\\_in\\_the\\_EU](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food_waste_and_food_waste_prevention_-_estimates#In_the_supply_and_consumption_sectors.2C_food_waste_generation_may_represent_10_percent_of_food_supplied_in_the_EU)
- [16] Sonune A., & Ghatge R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. Desalination, 167, 55–63.
- [17] 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.
- [18] Metcalf, Eddy. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 3rd ed. McGraw Hill Education (I) Private Ltd.; 2012.
- [19] Östman M.(2018).Antimicrobials in sewage treatment plants. DOI:10.13140/RG.2.2.30958.87367
- [20] 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.
- [21] Minnesota Pollution Control Agency. (2011). Biological Nutrient Removal. [Online]. Available: <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-wwtp8-21.pdf>
- [22] Vives Fabregas MT, Balaguer i Condom MD, Colprim Galceran J, Universitat de Girona, Departament d'Enginyeria Química A i TA. SBR Technology for Wastewater Treatment Suitable Operational Conditions for a Nutrient Removal. Universitat de Girona; 2005. Accessed September 10, 2021. <http://www.tdx.cat/TDX-0201105-182136/>

- [23] Krampe J. Cycle-time determination and process control of sequencing batch membrane bioreactors. *Water Science and Technology*. 2013;67(9):2083-2090. doi:10.2166/wst.2013.096
- [24] Fazal S, Zhang B, Zhong Z, Gao L, Chen X. Industrial Wastewater Treatment by Using MBR (Membrane Bioreactor): A Review Study. Published online 2021.
- [25] Cicek N. (2003) A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater.
- [26] Κ. Σταματελάτου, Γ. Αντωνοπούλου and Γ. Λυμπεράτος, "Production of biogas via anaerobic digestion," in *Handbook of Biofuels Production*, Woodhead Publishing Limited, 2011, pp. 267-303.
- [27] Α.Βλυσίδης, Ε.Γρηγοροπούλου and Γ.Λυμπεράτος, "ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΛΑΣΠΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΡΡΙΜΑ ΤΩΝ," in *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ Σημειώσεις Παραδόσεων*, ΑΘΗΝΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2020, pp. 118-133.
- [28] Κ. Σιούλας, T. A. Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk and R. Janssen, in *ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ*, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, 2010.
- [29] C. Mao, Y. Feng, X. Wang and G. Ren, "Review on reasearch achievements of biogas from anaerobic d igestion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 45, pp. 540-555, 2015.
- [30] L. Appels, J. Baeyens, J. Degreve and R. Dewil, "Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge," *Progress in Energy and Combustion Science*, no. 34, pp. 755-781, 8 8 2008.
- [31] Χ. Φεσά, "Αναερόβιαχώνευσηαποβλήτωντυπογραφείου," Εθνικό ΜετσόβιοΠολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.
- [32] N. E. Ltd, "ΜελέτηΕκτίμησηςΕπιπτώσεωνστοΠεριβάλλοναπό τηνΑνέγερσηΣταθμού ΑναερόβιαςΕπεξεργασίαςΑποβλήτωντηςΕταιρείαςΜ.Αντωνιαδης
- [33] P. Sallis and S. Uyanik, Granule development in a split-feed anaerobic baffled reactor, *Bioresource Technology*, no. 89, pp. 255-265, 2003.
- [34] E. Hall, "Anaerobic treatment of wastewaters in suspended growth and fixed film processes," in *Water Quality Management Library*, Technomic Publishing Company, 1993.
- [35] TilleyE. Ulrich L. ,Luthi C., Reymond P. , Zurugg C. (2014). Publisher: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and technology (Eawag), Dübendorf, Switzerland. Edition: 2nd Revised Edition
- [36] Sivaram, N. M., & Barik, D. (2019). Toxic Waste from Leather Industries. Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation, 55–67. doi:10.1016/b978-0-08-102528-4.00005-5
- [37] I. Skiadas and G. Lyberatos, "THE PERIODIC ANAEROBIC BAFFLED REACTOR," *Water Science and Technology*, vol. 38, no. 8-9, pp. 401-408, 1998.

[38] Ι. Μιχαλόπουλος, *Ολοκληρωμένη αξιοποίηση στερεών οργανικών αποβλήτων προς παραγωγή βιοαερίου σε πιλοτική κλίμακα* Περιοδικό Αναερόβιο Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (PABR) και παραγωγή εδαφοβελτιωτικού (Διδακτορική διατριβή), 2017.

[39] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Basic Information about Landfills. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/landfills/basic-information-about-landfills>