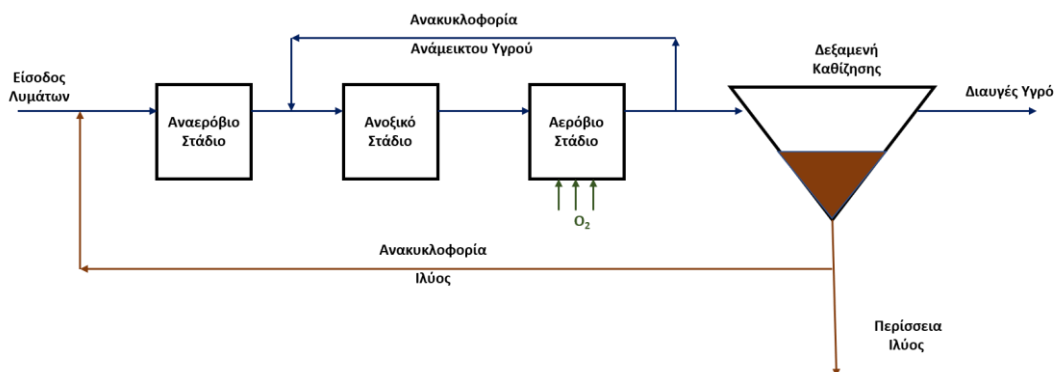


## WP4. Πειραματική επεξεργασία της εκροής του χωνευτήρα σε έναν αντιδραστήρα διαδοχικού διαλείποντος έργου (SBR - Sequencing Batch Reactor)

### D.4.1. Σχεδιασμός και κατασκευή του SBR

Σκοπός του πακέτου εργασίας 4 είναι η ανάπτυξη μιας διεργασίας ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αζώτου και φωσφόρου. Η απομάκρυνση οργανικού φορτίου λαμβάνει χώρα υπό αερόβιες συνθήκες μέσω βιολογικής οξείδωσης της οργανικής ύλης από ετερότροφους μικροοργανισμούς. Η απομάκρυνση του αζώτου βασίζεται στην εναλλαγή μεταξύ αερόβιων και ανοξικών συνθηκών με στόχο την μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου αρχικά σε νιτρικά ιόντα ( νιτροποίηση) και μετέπειτα σε αέριο άζωτο (απονιτροποίηση). Η απομάκρυνση του φωσφόρου βασίζεται στην δέσμευση του από συγκεκριμένη ομάδα φωσφοροβακτηρίων υπό αναερόβιες συνθήκες.

Η συμβατική μονάδα διαχείρισης αστικών αποβλήτων αποτελείται από διακριτούς χώρους, δεξαμενές σε κάθε μια από τις οποίες επικρατούν φυσικοχημικές συνθήκες που ευνοούν μια εκ των παραπάνω διεργασιών. Η εναλλαγή λοιπόν ανάμεσα σε ανοξικές, αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες επιτυγχάνεται μέσω χωρικού διαχωρισμού. Στο σχήμα 56 παρουσιάζεται μια διάταξη ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικών, αζώτου και φωσφόρου.



Σχήμα 56 Συμβατική διάταξη ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικών, αζώτου και φωσφόρου

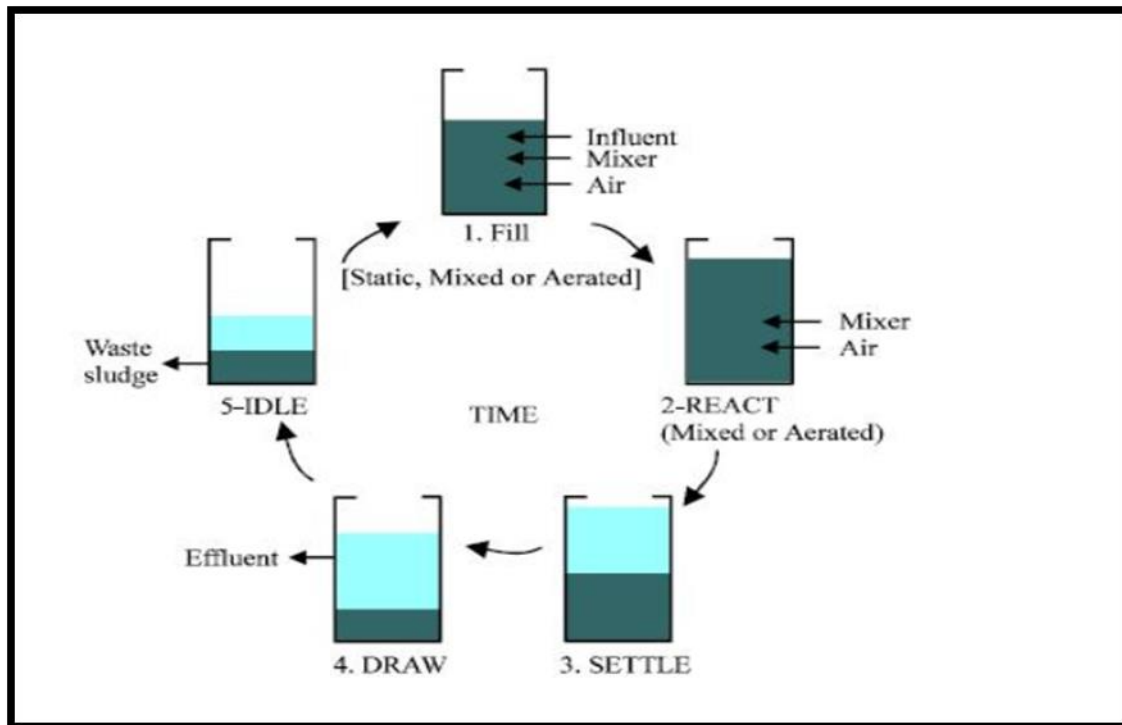
Σύμφωνα με την διάταξη του σχήματος 56 κατά την ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών ουσιών το απόβλητο αρχικά υπόκειται σε αναερόβια επεξεργασία. Η συγκεκριμένη

διεργασία δεν πρέπει να συγχέεται με την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, καθώς τα ενεργά βακτήρια στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μια ομάδα βακτηρίων τα οποία ονομάζονται φωσφοροβακτήρια. Τα συγκεκριμένα βακτήρια έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν να προσροφούν και να συσσωρεύουν ενδοκυτταρικά περισσότερο φώσφορο από όσο απαιτείται για την κυτταρική ανάπτυξη και συντήρηση. Εμπλουτισμός των μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων με φωσφοροβακτήρια επιτυγχάνεται με έκθεση της ενεργού ιλύος σε αναερόβιες και αερόβιες συνθήκες. Η εναλλαγή συνθηκών επιτυγχάνεται με ανακυκλοφορία περίσσειας ιλύος στο σύστημα. Στην συνέχεια επέρχεται το ανοξικό στάδιο κατά το οποίο πραγματοποιείται η απονιτροποίηση των νιτρικών ιόντων προς αέριο άζωτο. Η διεργασία της απονιτροποίησης βασίζεται στην ικανότητα μια συγκεκριμένης ομάδας βακτηρίων να χρησιμοποιούν απουσία οξυγόνου τον ιόν οξυγόνου των νιτρικών ιόντων ώστε να οξειδώσουν τον διαθέσιμο οργανικό άνθρακα. Τα νιτρικά ιόντα παράγονται κατά την διεργασία νιτροποίησης του αμμωνιακού αζώτου που λαμβάνει χώρα στην δεξαμενή αερισμού. Κατά τον αερισμό πέραν της οξείδωσης της οργανικής ύλης λαμβάνει χώρα και η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό. Η ανάπτυξη ανοξικών συνθηκών επιτυγχάνεται μέσω ανακυκλοφορίας ανάμεικτου υγρού από το αερόβιο στάδιο στο ανοξικό. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την διεργασία της νιτροποίησης απαιτείται πέρα από την ανάπτυξη ανοξικών συνθηκών και πηγή οργανικού άνθρακα. Στην συνέχεια, και ενώ τα λύματα έχουν υποβληθεί βιολογική οξείδωση κατά το αερόβιο στάδιο στην δεξαμενή αερισμού ακολουθεί η φυσική διεργασία της καθίζησης. Η καθίζηση στο τέλος της βιολογικής επεξεργασίας είναι απαραίτητη για τον διαχωρισμό του σταθεροποιημένου πλέον αποβλήτου από την ενεργό ιλύ που συμπαρασύρει κατά την έξοδο από την δεξαμενή αερισμού. Ένα μέρος της ενεργού ιλύς ανατροφοδοτείται στο σύστημα με σκοπό την διατήρηση των επιθυμητών συνθηκών και το υπόλοιπο αποβάλλεται και οδηγείτε προς επεξεργασία.

Η τεχνολογία του SBR, ως σύστημα ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικών και θρεπτικών βασίζεται στην ανάπτυξη των ανωτέρω φυσικοχημικών συνθηκών στην ίδια δεξαμενή. Αυτό συμβαίνει με την μεταβολή των συνθηκών χρονικά. Η λειτουργία του SBR βασίζεται σε μια αλληλουχία σταδίων που αποτελούν ένα κύκλο λειτουργίας. Το πρώτο στάδιο κάθε κύκλου είναι το στάδιο της Τροφοδοσίας (*Feeding*), όπου ο SBR τροφοδοτείται με το προς επεξεργασία απόβλητο. Συνήθως επιλέγεται η αναλογία 2:1 για τον λόγο Όγκος Αποβλήτου/Όγκος Ενεργού ιλύος. Η ενεργός ιλύς δηλαδή τα βακτήρια που είναι υπεύθυνα για τις διεργασίες σταθεροποίησης του αποβλήτου, βρίσκονται μονίμως μέσα στον αντιδραστήρα. Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται και η αύξηση της ηλικίας ιλύος, που είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των διάφορων ομάδων βακτηρίων που την αποτελούν (πχ, φωσφοροβακτήρια). Στην συνέχεια και αφού ο αντιδραστήρας τροφοδοτήθηκε, ξεκινάει το στάδιο της αντίδρασης (*React*), κατά το οποίο στον αντιδραστήρα επιβάλλονται διαφορετικές φυσικοχημικές συνθήκες για συγκεκριμένο χρόνο ανάλογα τους στόχους της μελετώμενης διεργασίας. Μετά το στάδιο της αντίδρασης ακολουθεί το στάδιο της καθίζησης (*Settle*), όπου το απόβλητο το οποίο τροφοδοτήθηκε και υποβλήθηκε στις διαδοχικές βιοχημικές αντιδράσεις του προηγούμενου σταδίου διαχωρίζεται από τους μικροοργανισμούς που βρίσκονται εντός του αντιδραστήρα. Τα δύο τελικά στάδια του κύκλου λειτουργίας ενός SBR είναι η απομάκρυνση του επεξεργασμένου αποβλήτου (*Draw*) και η απομάκρυνση της περίσσειας ιλύος που αναπτύχθηκε (*Idle*). Η διαδικασία εναλλαγής σταδίων που περιεγράφηκε απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 57.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου αντιδραστήρα είναι η ανάμιξη του αποβλήτου με την ενεργό ιλύ. Η ανάμιξη επιτυγχάνεται είτε μέσω μηχανικής ανάδευσης είτε μέσω επιβολής ανακυκλοφορίας στον αντιδραστήρα.

Στο παραδοτέο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας αντιδραστήρας τύπου SBR ενεργού όγκου 15L, Σχήμα 58H διάταξη του SBR αποτελείται από δυο ομόκεντρους κυλίνδρους με τον εσωτερικό να αποτελεί τον ενεργό του όγκο και τον εξωτερικό να λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας. Ο χώρος ανάμεσα στον εξωτερικό και τον εσωτερικό κύλινδρο καταλαμβάνεται από νερό θερμοκρασίας 27°C. Η ενεργός υλός καταλάμβανε το 1/3 του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα, δηλαδή 5 L. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας ο αντιδραστήρας τροφοδοτούνταν με 10 L ανεπεξέργαστου αποβλήτου. Κατά το στάδιο του Feeding στον αντιδραστήρα επιβαλλόταν ανακυκλοφορία ανάμεικτου υγρού από τον πυθμένα στην κορυφή για την επίτευξη βέλτιστης επαφής λάσπης – αποβλήτου. Αφού ολοκληρωνόταν το Feeding ξεκινούσε το στάδιο React όπου στον αντιδραστήρα επιβάλλονταν αρχικά αναερόβιες, στην συνέχεια αερόβιες και τελικώς ανοξικές συνθήκες. Η συγκεκριμένη διεργασία επιτεύχθηκε με την χρήση μετρητή διαλυτού οξυγόνου, ο οποίος ρύθμιζε την παροχή αέρα μέσω μηχανικού αερισμού στο σύστημα. Μετέπειτα ακολουθούσε το στάδιο της καθίζησης όπου διακόπτονταν και ο αερισμός και η ανακυκλοφορία. Τέλος ακολουθούσε το τελευταίο στάδιο αδειάσματος του αντιδραστήρα όπου Draw και Idle λάμβαναν χώρα ταυτόχρονα. Κατά το στάδιο του αδειάσματος το οποίο χάριν ευκολίας αποκαλείται Discharge από τον αντιδραστήρα απομακρύνονταν συνεχώς το επεξεργασμένο απόβλητο και μικρή ποσότητα βιο-στερεών



Σχήμα 57 Απεικόνιση εναλλαγής σταδίων του κύκλου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα SBR

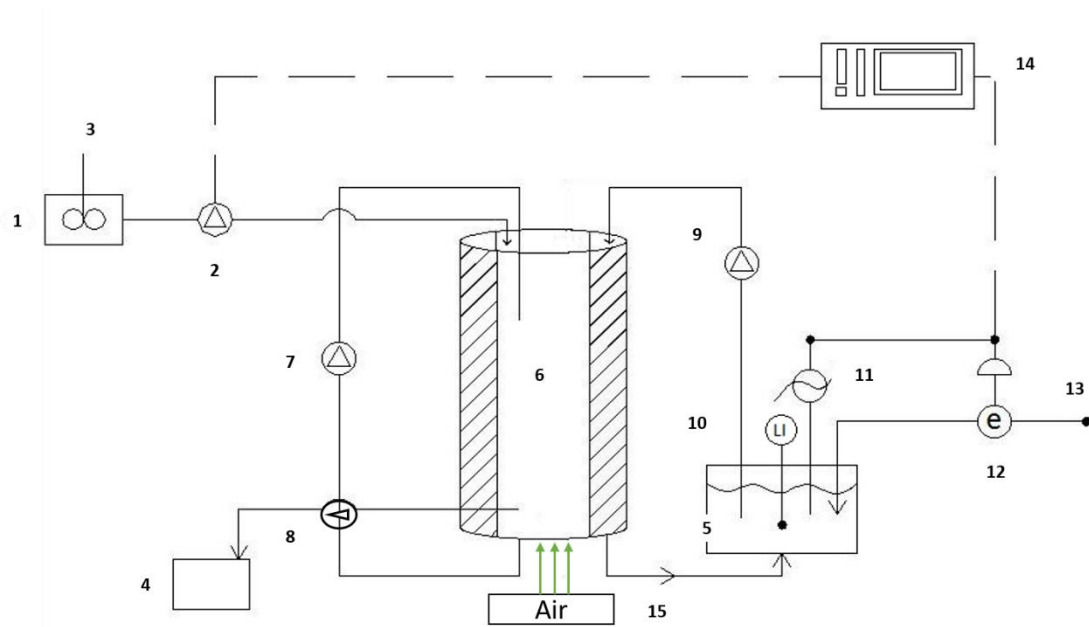


Σχήμα 58 Πειραματική διάταξη SBR

#### **D.4.2. Έκθεση για την συν-διαχείριση της εκροής του PABR και του συμπυκνώματος για την βέλτιστη απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών (αζώτου και φωσφόρου) καθώς και του Χημικώς Απαιτούμενο Οξυγόνου σε αντιδραστήρα SBR**

Σκοπός του συγκεκριμένου πακέτου εργασίας ήταν η επεξεργασία της εκροής του αναερόβιου αντιδραστήρα PABR με τελικό στόχο την ασφαλή απόρριψη της στο περιβάλλον, ολοκληρώνοντας κατά αυτό τον τρόπο την καινοτόμα διαδικασία συν-διαχείρισης του συμπυκνώματος τροφικών υπολειμμάτων και υγρών αστικών αποβλήτων.

Αρχικά εξετάσθηκε η ικανότητα του SBR στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου σε διάφορους χρόνους παραμονής. Για την μελέτη της συγκεκριμένης διεργασίας χρησιμοποιήθηκε ως τροφοδοσία συνθετικό αστικό λύμα παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην τροφοδοσία του PABR. Συγκεκριμένα κατά το στάδιο της αντίδρασης react εφαρμόσθηκαν μόνο αερόβιες συνθήκες. Η συγκεκριμένη μελέτη αποτελείται από τέσσερις διαδοχικές πειραματικές φάσεις. Κάθε φάση διαφέρει από την επόμενη ως προς την διάρκεια του αερόβιου σταδίου. Συγκεκριμένα στη 1<sup>η</sup> πειραματική φάση εφαρμόζονται στον SBR αερόβιες συνθήκες για διάστημα τεσσάρων ωρών, στην 2<sup>η</sup> πειραματική φάση για διάστημα τριών ωρών και στην 3<sup>η</sup> πειραματική φάση για διάστημα δύο και μίας ώρας αντίστοιχα. Στο Σχήμα 59 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της διεργασίας και στον Πίνακα 32 τα στάδια των κύκλων λειτουργίας κάθε φάσης και η χρονική τους διάρκεια.



Σχήμα 59 Διάγραμμα ροής πειραματικής διάταξης. (1) Δοχείο τροφοδοσίας-influent (παγολεκάνη, influent tank), (2) Αντλία τροφοδοσίας (lift rump), (3) Αναδευτήρας δοχείου τροφοδοσίας (stirrer) με θερμοστοιχείο – το οποίο δεν αναπαρίσταται σχηματικά–, (4) Δοχείο συλλογής εκρόης-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.

Πίνακας 32 Διάρκεια σταδίων λειτουργίας SBR ανά πειραματική φάση.

Πειραματική φάση	Τροφοδοσία (Ωρες)	Αντίδραση (*Αερισμός) (ώρες)	Καθίζηση (Ωρες)	Άδειασμα (Ωρες)	Διάρκεια Κύκλου (Ωρες)
1 <sup>η</sup>	0,5	4	3	0,5	8
2 <sup>η</sup>	0,5	3	3	0,5	7

3 <sup>η</sup>	0,5	2	3	0,5	6
4 <sup>η</sup>	0,5	1	3	0,5	5

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

Στον Πίνακα 33 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε πειραματική φάση.

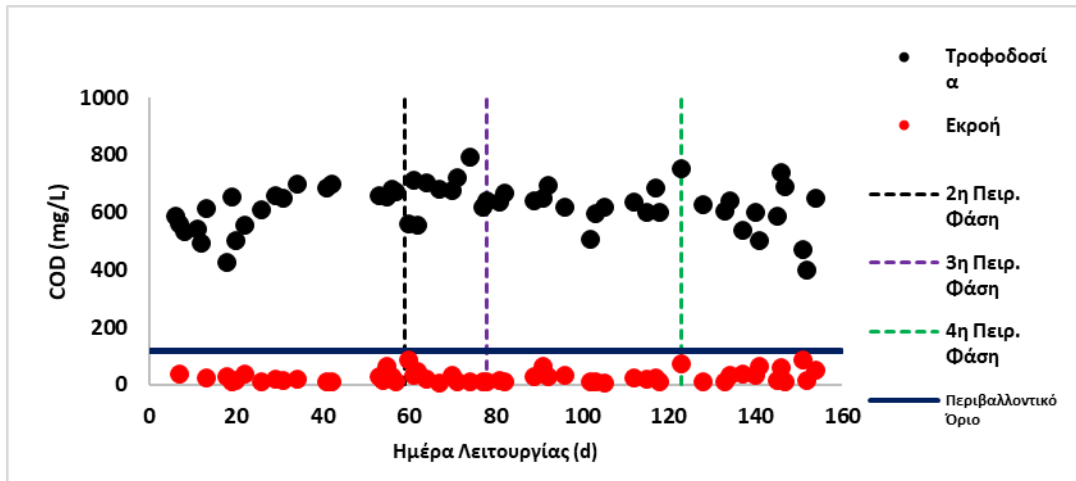
Πίνακας 33 Μέση τιμή φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τροφοδοσίας SBR κατά τις πειραματικές φάσεις 1 έως 4.

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

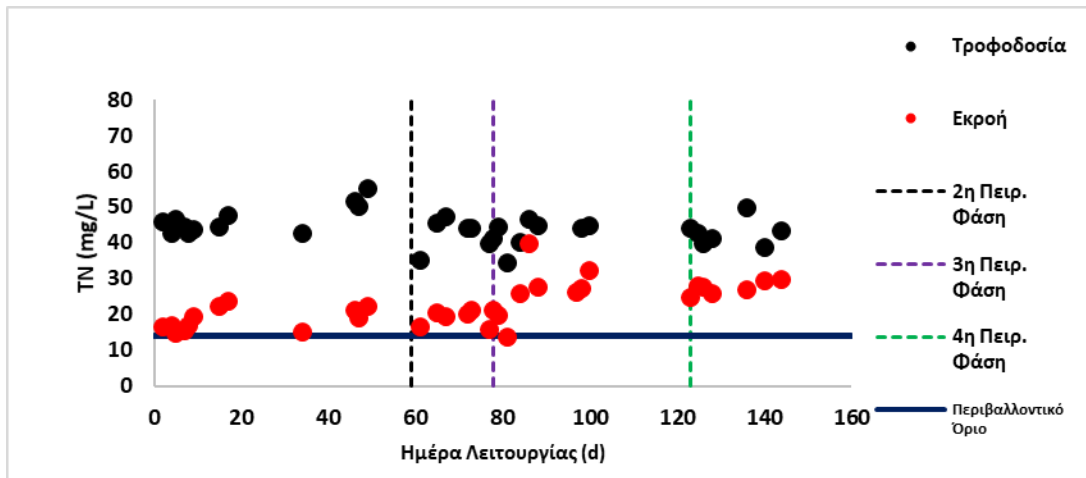
Το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) κυμαίνεται μεταξύ του εύρους 580 – 700 mg/L και το Ολικό Άζωτο (TN) μεταξύ 40 – 45 mg/L. Επίσης, το pH λαμβάνει σχεδόν σταθερές τιμές κοντά στο 7, με την αλκαλικότητα, που έχει ανιχνευτικό ρόλο σε πιθανά προβλήματα ελέγχου pH, να βρίσκεται εντός των επιπέδων 450 – 500 mg CaCO<sub>3</sub>/L. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην ανωτέρω τροφοδοσία οφείλονται κατά βάσει στην ποιότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε, καθώς αυτό προέρχεται από γεώτρηση με αποτέλεσμα ανά περιόδους οι ενώσεις που χρησιμοποιούνται να παρουσιάζουν χαμηλότερη διαλυτότητα.

Η επεξεργασία του συγκεκριμένου αποβλήτου από τον SBR οδήγησε σε σημαντικά συμπεράσματα ως προς την ικανότητα του να απομακρύνει οργανικό φορτίο. Αρχικά σε κάθε πειραματική φάση το οργανικό φορτίο της εκροής του SBR είναι μικρότερο του περιβαλλοντικού ορίου των 120mg/L. Από τις πρώτες ημέρες λειτουργίας της διεργασίας παρουσιάζεται ικανοποιητική απομάκρυνση όπως διακρίνεται και Σχήμα 60. Όσον αφορά την συγκέντρωση του ολικού αζώτου παρατηρείται σε όλες τις

πειραματικές φάσεις μια μείωση, όχι όμως στα επιτρεπτά περιβαλλοντικά επίπεδα. Πρέπει να επισυμανθεί πως η συγκεκριμένη μείωση δεν οφείλεται στην ανάπτυξη διεργασιών απομάκρυνσης αζώτου ( Νιτροποίηση – Απονιτροποίηση) αλλά σε κατανάλωση αζώτου από τους μικροοργανισμούς για τις κυτταρικές τους ανάγκες. Στο Σχήμα 61 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του αζώτου στην τροφοδοσία και στην εκροή του SBR. Στον Πίνακα 34 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της εκροής του SBR για κάθε πειραματική φάση.



Σχήμα 60 Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου σε μονάδες sCOD στην τροφοδοσία και στην εκροή του SBR.



Σχήμα 61 Ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου στην τροφοδοσία και στην εκροή του SBR.

Πίνακας 34 Μέση συγκέντρωση φυσικοχημικών χαρακτηριστικών εκροής SBR κατά τις πειραματικές φάσεις 1 έως 4.

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

Σκοπός των ανωτέρω πειραματικών φάσεων ήταν η εξέταση του SBR ως προς της απομάκρυνση οργανικού φορτίου. Εξάγεται λοιπόν το αποτέλεσμα πως ο SBR να απομακρύνει ικανοποιητικά συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων παραπλήσιες με εκείνες των αστικών αποβλήτων. Από την αυτή την σκοπιά λοιπόν η ανάπτυξη της διεργασίας της βιολογικής οξείδωσης στον SBR κρίνεται επιτυχημένη. Ωστόσο ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας προτείνεται στο ερευνητικό έργο ως το μέσο τελικής επεξεργασίας της εκροής του PABR. Η εκροή του PABR ενώ δεν παρουσιάζει σημαντικό οργανικό περιεχόμενο έχει αυξημένη συγκέντρωση ολικού αζώτου και φωσφόρου. Συνεπώς για να μπορέσει ο SBR να επεξεργαστεί επιτυχώς το συγκεκριμένο απόβλητο είναι αναγκαία η ανάπτυξη των συνθηκών και των αντιδράσεων που διέπουν τις διεργασίες απομάκρυνσης αζώτου και φωσφόρου.

Για να είναι δυνατή η επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος του SBR, τροποποιήθηκε αρχικά ο κύκλος λειτουργίας του. Συγκεκριμένα στο στάδιο της αντίδρασης προστέθηκαν αναερόβιες και ανοξικές συνθήκες πέραν των αερόβιων. Στόχος των τροποποιήσεων αυτών είναι η λειτουργία του SBR να προσομοιάζει την διάταξη ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικών, αζώτου και φωσφόρου που απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 56. Στον Πίνακα 35 παρουσιάζεται η νέα διάταξη των σταδίων του SBR και η διάρκεια τους.

Πίνακας 35 Διάρκεια σταδίων λειτουργίας SBR κατά την τελική πειραματική φάση.

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

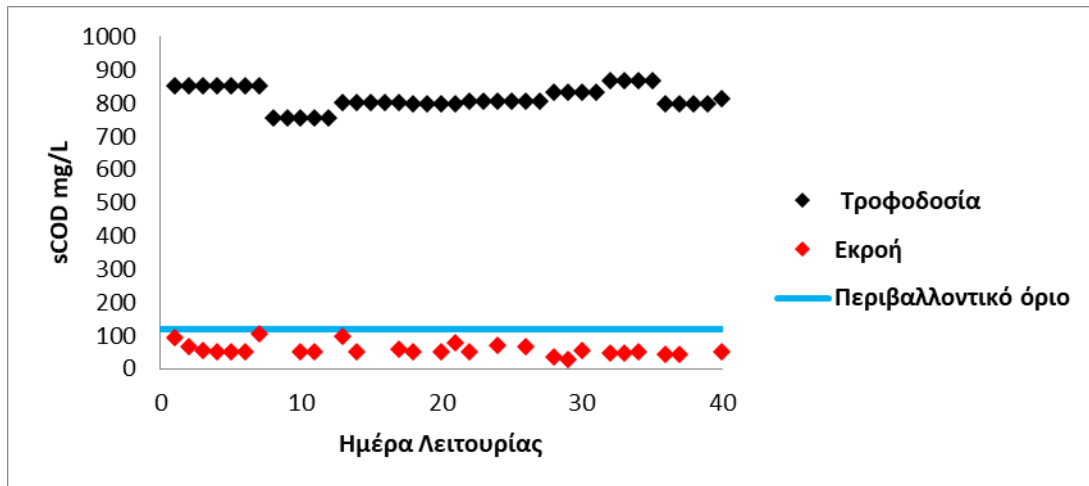


Όπως αναφέρθηκε η απομάκρυνση του αζώτου επιτυγχάνεται μέσω των διεργασιών νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Κατά την διαδικασία της νιτροποίησης το αμμωνιακό άζωτο μετατρέπεται σε νιτρικά ιόντα. Στην συνέχεια κατά την απονιτροποίηση, συγκεκριμένη ομάδα βακτηριών οξειδώνει τον διαθέσιμο οργανικό άνθρακα χρησιμοποιώντας το ιόν οξυγόνου των νιτρικών ιόντων με αποτέλεσμα τα νιτρικά ιόντα να μετατρέπονται σε αέριο άζωτο. Είναι λοιπόν κατανοητό, πως για να μπορέσει να αναπτυχθεί σε ένα σύστημα η διαδικασία της απονιτροποίησης είναι απαραίτητη η ύπαρξη διαθέσιμου οργανικού άνθρακα. Στην συγκεκριμένη μελέτη δεν υπάρχει διαθέσιμη ποσότητα οργανικού φορτίου στο απόβλητο που καλείται να επεξεργαστεί ο SBR, καθώς όπως παρουσιάστηκε στο πακέτο εργασίας 3 η εκροή του PABR δεν παρουσιάζει σημαντική συγκέντρωση οργανικού φορτίου. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με την ανάμιξη της εκροής του PABR με FMSW condensate με αποτέλεσμα να αυξηθεί το οργανικό φορτίο της τελικής τροφοδοσίας του SBR. Ο λόγος ανάμιξης που επιλέχθηκε είναι 85 % εκροή PABR και 15% FMSW condensate. Η συγκεκριμένη αναλογία επιλέχθηκε με κριτήριο την μέγιστη επεξεργασία της εκροής του PABR. Στον Πίνακα 36 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας του SBR μετά την εν λόγω ανάμιξη των δύο αποβλήτων.

Πίνακας 36 χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας του SBR μετά την εν λόγω ανάμιξη των δύο αποβλήτων.

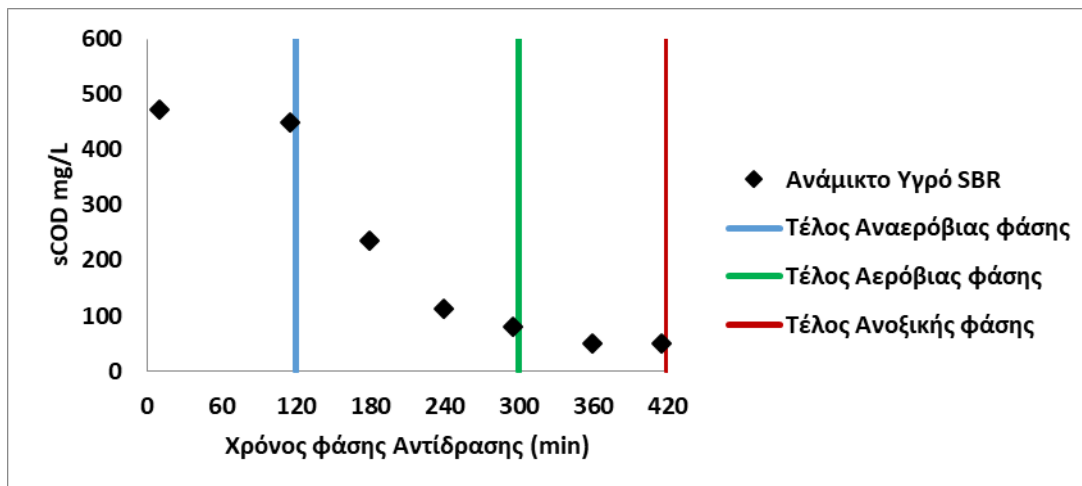
Χαρακτηριστικά	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
COD mg/L	817.72	32
TN mg/L	45.78	3.0
TP mg/L	4.21	0.2
pH	7.29	0,5
Alkalinity mg CaCO <sub>3</sub> /L	1330	160

Ο νέος κύκλος λειτουργίας 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 54 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση της τροφοδοσίας του SBR 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 λειτούργησε για 80 πλήρεις κύκλους.



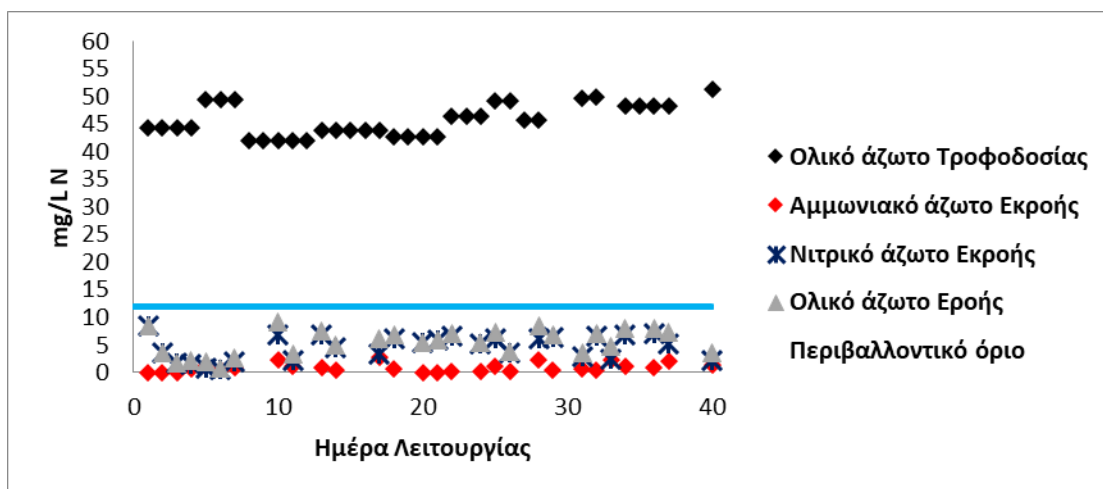
Σχήμα 62 Ημερήσια συγκέντρωση τροφοδοσίας και εκροής αντιδραστήρα SBR. Η τροφοδοσία αποτελείται από εκροή αναερόβιου αντιδραστήρα PABR και FMSW condensate.

Όπως ήταν αναμενόμενο και από τις προηγούμενες πειραματικές φάσεις ο αντιδραστήρας επέδειξε ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου (Σχήμα 62). 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 οξείδωσης, όσο και κατά το ανοξικό στάδιο ως αποτέλεσμα της μετατροπής των νιτρικών σε αέριο άζωτο, όπως περιεγράφηκε 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. Στο σχήμα 63 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.



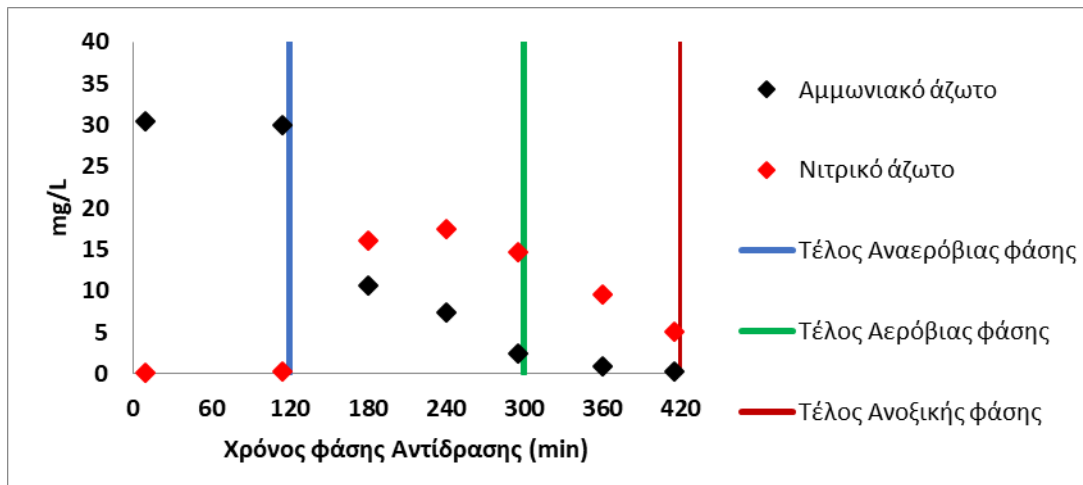
Σχήμα 63 Συγκέντρωση διαλυτού οργανικού φορτίου στο ανάμικτο υγρό του SBR κατά το στάδιο της αντίδρασης.

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. Στο Σχήμα 64 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου της τροφοδοσίας καθώς και η ημερήσια συγκέντρωση αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου ης εκροής του αντιδραστήρα.



Σχήμα 64 Συγκέντρωση ολικού αζώτου στην τροφοδοσία του SBR και στην εκροή του σε μορφή νιτρικών και αμμωνιακού

Παρατηρώντας το σχήμα 64 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. Ο 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 Σχήμα 65 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 Σχήμα 63.

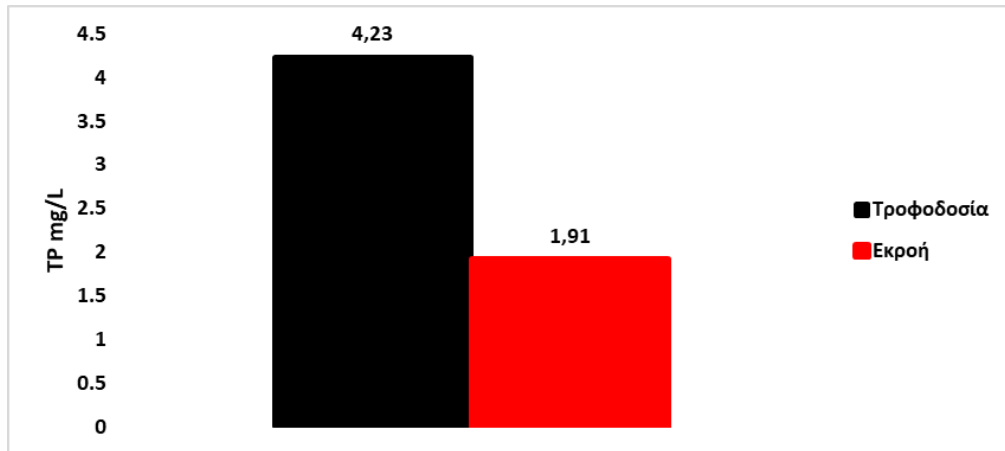


Σχήμα 65 Συγκέντρωση αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου στο ανάμικτο υγρό του SBR κατά το στάδιο της αντίδρασης.

Από τα στοιχεία του σχήματος 65 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 επιτελείτε 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.

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.

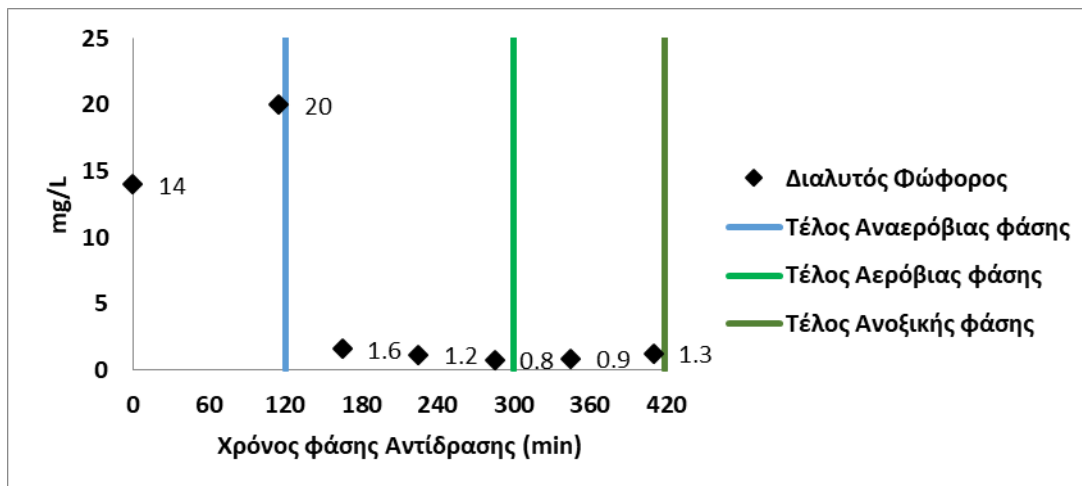
Στο σχήμα 66 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου ανάμεσα στην τροφοδοσία και στην εκροή του SBR.



Σχήμα 66 Μέση συγκέντρωση διαλυτού φωσφόρου στην τροφοδοσία και στην εκροή του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια της διεργασίας

Από το παραπάνω Σχήμα 66 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 φωσφοροβακτηρίων στην ενεργό ιλύ του συστήματος.

Στο Σχήμα 67 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης του φωσφόρου κατά την διάρκεια του σταδίου της αντίδρασης της διεργασίας.



Σχήμα 67 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 ιλύ 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.

#### D.4.3 . Μοντελοποίηση διεργασίας

Παρακάτω παρουσιάζεται η μοντελοποίηση διεργασίας απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και αζώτου στον SBR με τη χρήση του λογισμικού Aquasim 2.0.

Για την συγκεκριμένη μοντελοποίηση έγιναν οι εξής παραδοχές:

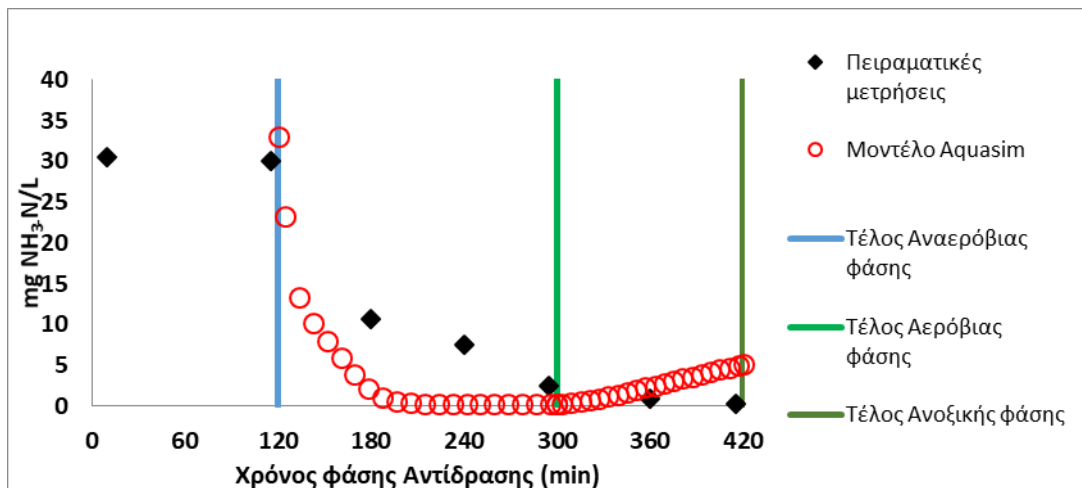
- Η αερόβια και η ανοξική φάση της διεργασίας προσομοιώνονται ως ξεχωριστοί αντιδραστήρες εμβολικής ροής.
- Ως χρονικό σημείο μηδέν θεωρείται η αρχή της αερόβιας φάσης.
- Η αλκαλικότητα η οποία εργαστηριακά μετράται σε ισοδύναμα  $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$  μετατρέπεται σε  $\text{kmol C (inorganic) /L}$  [ $1000 \text{ mgCaCO}_3 /\text{L}$ ,  $16.5 \text{ mol C/m}^3$ ].
- Η νιτροποίηση οδηγεί σε παραγωγή νιτρικών ιόντων χωρίς την διαμεσολάβηση νιτρωδών ιόντων.

Ακολουθεί περιγραφή των αποτελεσμάτων του μοντέλου IAWPRC\_activated sludge\_SBR και σύγκριση τους με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

#### Αμμωνιακό άζωτο

Σύμφωνα με το μοντέλο η συγκεκριμένη μορφή αζώτου μπορεί να βρεθεί στο σύστημα μέσω της άμεσης τροφοδοσίας του και μέσω της αμμωνικοποίησης του οργανικού αζώτου που προκύπτει από την αποσύνθεση του οργανικού αζώτου που αποβάλλεται από τους μικροοργανισμούς που αποσυντίθενται. Λόγω της δυσκολίας διαχωρισμού των δύο αυτών ποσοτήτων πειραματικά η μελέτη επικεντρώνεται στην μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου συνολικά.

Στο Σχήμα 68 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που ανακτήθηκαν για την μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου σε ένα κύκλο λειτουργίας σε αντιπαραβολή με αυτά που προβλέπει το μοντέλο.

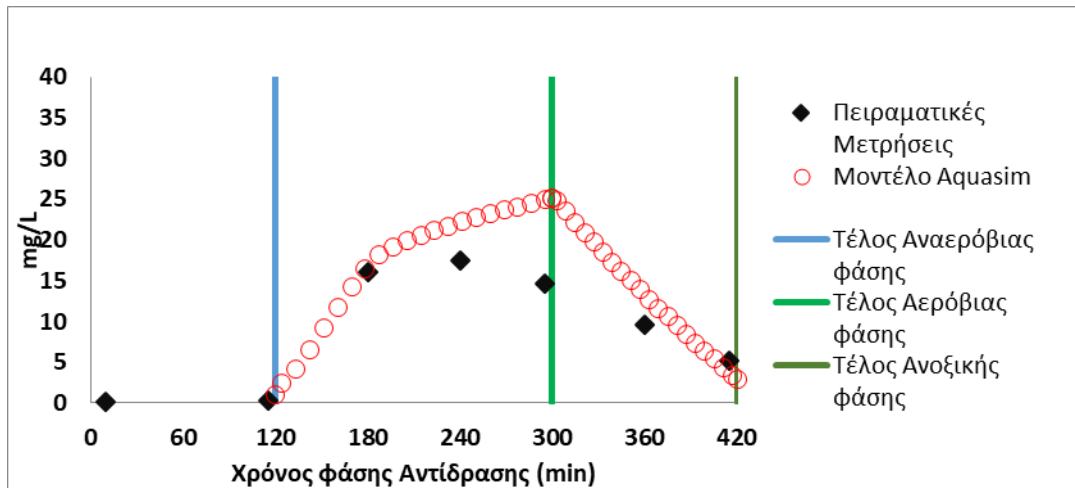


Σχήμα 68 Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων αμμωνιακού αζώτου κατά την διάρκεια του σταδίου της αντίδρασης με τα αντίστοιχα δεδομένα που προβλέπονται από το μοντέλο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το μοντέλο δεν περιλαμβάνει την αναερόβια φάση της διεργασίας. Η έναρξη υπολογισμών του μοντέλου ξεκινάει από την αρχή της αερόβιας φάσης του σταδίου της αντίδρασης. Ένα πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου προβλέπουν ακαριαία μείωση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου κατά την πρώτη ώρα της φάσης αερισμού. Στην συνέχεια προβλέπουν εκ νέου παραγωγή αμμωνιακού αζώτου το οποίο προέρχεται από την αμμωνιοποίηση του οργανικού αζώτου που απελευθερώνεται κατά την αποσύνθεση των μικροοργανισμών. Τα πειραματικά δεδομένα σε σύγκριση με το υπολογιστικά περιγράφουν μια ηπιότερη κατανάλωση αμμωνιακού αζώτου. Επιπλέον σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα δεν διακρίνεται αύξηση της συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου κατά την ανοξική φάση.

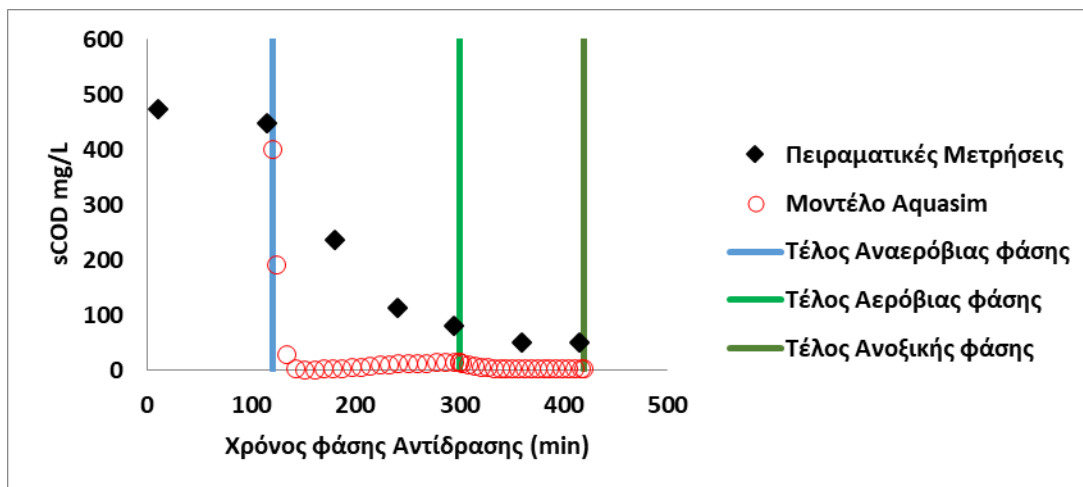
Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου κατά την διάρκεια του σταδίου αντίδρασης του κύκλου λειτουργίας του SBR. Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 69 το υπολογιστικό μοντέλο προβλέπει ταχύτερη αύξηση των νιτρικών ιόντων κατά την φάση αερισμού. Επιπροσθέτως το υπολογιστικό μοντέλο παρουσιάζει ακραία μείωση νιτρικών μόλις ξεκινάει η ανοξική φάση. Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν αύξηση κατά την πρώτη ώρα του αερισμού, σταθεροποίηση και ελαφρά μείωση προς την 3η και τελευταία ώρα του αερισμού. Όσον αφορά το ανοξικό στάδιο πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα συγκλίνουν στις ίδιες τιμές.





Σχήμα 69 Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων νιτρικού αζώτου κατά την διάρκεια του σταδίου της αντίδρασης με τα αντίστοιχα δεδομένα που προβλέπονται από το μοντέλο.

Η συμπεριφορά του υπολογιστικού μοντέλου είναι παρεμφερής και για τον διαλυτό οργανικό άνθρακα μέσα στο σύστημα. Συγκεκριμένα όπως διακρίνεται στο Σχήμα 70 παρουσιάζει ταχύτερη μείωση και σταθεροποίηση σε τιμές κάτω των 10 mg/l COD, από την πρώτη ώρα του αερισμού. Αντιθέτως τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν χαμηλότερης έντασης ρυθμό μείωσης για την πρώτη ώρα του αερισμού και σταθεροποίηση σε τιμές κοντά στα 50 mg/L COD.



Σχήμα 70 Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων διαλυτού οργανικού φορτίου κατά την διάρκεια του σταδίου της αντίδρασης με τα αντίστοιχα δεδομένα που προβλέπονται από το μοντέλο.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί πως η μοντελοποίηση της διεργασίας δεν παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Γενικότερο το μοντέλο προβλέπει ακραίες αυξομειώσεις των μεταβλητών που αναλύθηκαν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο δεν βλέπει την διεργασία όπως είναι

στην πραγματικότητα. Συγκεκριμένα οι δύο φάσεις αντιμετωπίζονται ως ξεχωριστοί αντιδραστήρες που συνδέονται σε σειρά.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Algapani D. E. et al., "Long-term bio-H<sub>2</sub> and bio-CH<sub>4</sub> production from food waste in a continuous two-stage system: Energy efficiency and conversion pathways," *Bioresour. Technol.*, vol. 248, pp. 204–213, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.05.164.

Allen E., J. D. Browne, and J. D. Murphy, "Evaluation of the biomethane yield from anaerobic co-digestion of nitrogenous substrates," *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 34, no. 13–14, pp. 2059–2068, 2013, doi: 10.1080/09593330.2013.806564.

Bachmann., "Comparision of fixed-film reactors with a modified sludge blanket reactor.," *Pollut. Technol. Rev.*, vol. 10, pp. 1–23, 1983.

Clark R. M. ( University of Missouri - Rolla and U. . Speece, R. E. (New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, "The pH Tolerance of Anaerobic Digestion," in 5th Internation Water Pollution Research Conference July -August 1970, 1970, pp. 11–27.

Liu G., X. Xu, L. Zhu, S. Xing, and J. Chen, "Biological nutrient removal in a continuous anaerobic-aerobic-anoxic process treating synthetic domestic wastewater," *Chem. Eng. J.*, vol. 225, pp. 223–229, 2013, doi: 10.1016/j.cej.2013.01.098.

Liu X., N. Ren, and Y. Yuan, "Performance of a periodic anaerobic baffled reactor fed on chinese traditional medicine industrial wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 104–110, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.06.007.

Mathioudakis D., I. Michalopoulos, K. Kalogeropoulos, K. Papadopoulou, and G. Lyberatos, "Anaerobic digestion of dried/shredded food waste in a periodic anaerobic baffled reactor," *Water Sci. Technol.*, vol. 84, no. 2, pp. 420–430, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.230.

Mohan D., K. P. Singh, and V. K. Singh, "Wastewater treatment using low cost activated carbons derived from agricultural byproducts-A case study," *J. Hazard. Mater.*, vol. 152, no. 3, pp. 1045–1053, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.079.

Skiadas G., I. V., Lyberatos, "The periodic anaerobic baffled reactor," *Water Sci. Technol.*, vol. 38(8–9), pp. 401–408, 1998.

Solarte J. C. Toro, J. P. Mariscal Moreno, and B. H. Aristizábal Zuluaga, "Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio," *Rev. ION*, vol. 30, no. 1, pp. 105–116, 2017, doi: 10.18273/revion.v30n1-2017008.

Sosnowski P., A. Wieczorek, and S. Ledakowicz, "Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes," *Adv. Environ. Res.*, vol. 7, no. 3, pp. 609–616, 2003, doi: 10.1016/S1093-0191(02)00049-7.

Stamatelatou K., I. V. Skiadas, and G. Lyberatos, "On the behavior of the periodic anaerobic baffled reactor (PABR) during the transition from carbohydrate to protein-based feedings," *Bioresour. Technol.*, vol. 92, no. 3, pp. 321–326, 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2003.09.006.

Tang Y. Q. et al., "Ethanol production from kitchen waste using the flocculating yeast *Saccharomyces cerevisiae* strain KF-7," *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, no. 11, pp. 1037–1045, 2008, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.01.027.

Vavouraki A. I., E. M. Angelis, and M. Kornaros, "Optimization of thermo-chemical hydrolysis of kitchen wastes," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 3, pp. 740–745, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.07.012.

Zarkaliou A., C. Kougias, A. Mokou, K. Papadopoulou, and G. Lyberatos, "Anaerobic Digestion of Synthetic Municipal Wastewater (MWW) in a Periodic Anaerobic Baffled Reactor (PABR): Assessment of COD Removal and Biogas Production," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 24, pp. 1–14, 2022, doi: 10.3390/app122413037.

Zhang L., Y. W. Lee, and D. Jahng, "Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 8, pp. 5048–5059, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.082.

Λυμπεράτος, Γ. Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2016.

