

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS



ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Διερεύνηση δυνατοτήτων βιολογικής απομάκρυνσης αζώτου
από τα αστικά λύματα μέσω συνδυασμού νιτρωδοποίησης
και ανοξικής οξείδωσης της αμμωνίας**

Ιωάννης Κωνσταντουλάκης

Επιβλέπων:

Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2021

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την εκπόνηση της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Έλενα Κουμάκη για την συμβολή της στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους μου εντός και εκτός σχολής για όλες τις ωραίες στιγμές που μοιραστήκαμε στα φοιτητικά μας χρόνια.

Τέλος ευχαριστώ την αδερφή μου που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και ιδιαίτερα τους γονείς μου, που χωρίς την υλική και ψυχολογική τους στήριξη δεν θα είχα καταφέρει να φτάσω στο τελευταίο βήμα.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Contents

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	3
Abstract	6
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1. Εισαγωγή.....	11
2.2. Η ANAMMOX διεργασία	13
2.3. Παράμετροι που Επιδρούν στα Anammox Βακτήρια.....	17
2.4. Συστήματα Αναερόβιας Απομάκρυνσης του Αζώτου.....	23
Κεφάλαιο 3. Περιγραφή του Μοντέλου Προσομοίωσης	28
3.1. Εισαγωγή.....	28
3.2. Παρουσίαση Μοντέλου του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας	29
3.3. Τροποποιημένο Μοντέλο ANAMMOX.....	57
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα	71
4.1 Εισαγωγή.....	71
4.2. Ανάλυση Ευαισθησίας	75
4.3. Σενάριο Αναφοράς της Πρώτης Διάταξης.....	94
4.4. Δεύτερο Εναλλακτικό Σενάριο	106
4.5 Διερεύνηση των Λειτουργικών παραμέτρων.....	113
4.6. Δεύτερη Διάταξη των Δεξαμενών	143
4.7. Δεύτερο Σενάριο για την Δεύτερη Διάταξη	149
4.8. Συγκριτική Αξιολόγηση των δύο διατάξεων	154
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα.....	156
Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία.....	161

Περίληψη

Η έντονη αστικοποίηση των σύγχρονων κοινωνιών έχει φέρει τους ανθρώπους και ιδιαίτερα τους μηχανικούς αντιμέτωπους με αρκετά προβλήματα, ένα εκ των οποίων είναι η επεξεργασία των λυμάτων, ώστε να διατηρείται η ποιότητα των υδάτων σε υψηλά επίπεδα και να αποφεύγονται προβλήματα όπως ο ευτροφισμός και η αποξυγώνωση. Η επεξεργασία των λυμάτων περιλαμβάνει ένα σύνολο σταδίων και διεργασιών που έχουν ως στόχο την μείωση των συγκεντρώσεων του οργανικού φορτίου, του αζώτου και του φωσφόρου, οι οποίες αποτελούν του κύριους ρύπους που διαταράσσουν τα υδάτινα οικοσυστήματα.

Ο κύκλος του αζώτου είχε προσδιοριστεί από τους επιστήμονες αρκετές δεκαετίες πριν. Παρόλα αυτά υπήρχαν ενδείξεις και παρατηρήσεις από διάφορα οικοσυστήματα, όπως τα θαλάσσια ότι η δίαιτα του αζώτου ήταν ελλιπής και δεν μπορούσε να εξηγήσει την μείωση της συγκέντρωσής του σε αναερόβιες συνθήκες. Μετά από αρκετές έρευνες στα τέλη του προηγούμενου αιώνα προσδιορίστηκε η βιοχημική αντίδραση που πραγματοποιεί την ανοξική απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου (ANAMMOX). Η ανακάλυψη και ο προσδιορισμός αυτής της διεργασίας επέφερε σημαντικές αλλαγές στις δυνατότητες που υπάρχουν, όσον αφορά την απομάκρυνση του αζώτου από τα λύματα μέσω βιοχημικών μεθόδων. Μέχρι τότε οι τεχνολογίες επεξεργασίας των λυμάτων επικεντρώνονταν κυρίως στην απομάκρυνση μέσω του συνδυασμού νιτροποίησης-απονιτροποίησης. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα και η ανάπτυξη τεχνολογιών στρέφεται όλο και περισσότερο προς την κατεύθυνση της αναερόβιας διεργασίας, καθώς προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής μεθόδου νιτροποίησης-απονιτροποίησης. Τα κυριότερα είναι η μείωση του απαιτούμενου οξυγόνου, που συνεπάγεται σημαντική μείωση του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης και η μείωση του όγκου της παραγόμενης ιλύος που έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο όγκος των δεξαμενών και να διευκολύνεται η κατασκευή τους. Κατά την αναερόβια διεργασία πραγματοποιείται η ανοξική οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου με αποδέκτη ηλεκτρονίων τα νιτρώδη τα οποία ανάγονται σε αέριο άζωτο.

Η επίτευξη των κατάλληλων συνθηκών, ώστε να ευνοηθεί και να είναι αποτελεσματική η διεργασία αναερόβια αποτελεί ένα αρκετά απαιτητικό εγχείρημα. Οι συνθήκες που απαιτούνται για την πραγματοποίηση της διεργασίας παρουσιάζουν δυσκολίες ως προς την πρακτική εφαρμογή τους και πολλές φορές είναι αναγκαίος ο τακτικός έλεγχος κατά την φάση της λειτουργίας, το οποίο

καθιστά πολύ δύσκολη την εφαρμογή τεχνολογιών που βασίζονται στην αναπνοή διεργασία από αρκετές εγκαταστάσεις, ειδικότερα τις πιο μικρές. Ένας ακόμα παράγοντας που δυσχεραίνει την διεργασία είναι ο αργός ρυθμός ανάπτυξης των αναπνοή βακτηρίων. Για την πραγματοποίηση της διεργασίας απαιτείται η αναχαίτιση των NOB, τα οποία είναι άμεσοι ανταγωνιστές των αναπνοή βακτηρίων, καθώς καταναλώνουν τα νιτρώδη. Επίσης είναι απαραίτητη η απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του οργανικού άνθρακα που περιέχεται στα λύματα, ώστε να μειωθεί η αποδοτικότητα της ανοξικής ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Η τυπική σύσταση των αστικών λυμάτων περιέχει άζωτο στην μορφή του αμμωνιακού αζώτου. Συνεπώς για να είναι δυνατή η ανάπτυξη των αναπνοή βακτηρίων, πρέπει να προηγηθεί η μερική νιτροποίηση, δηλαδή ένα μέρος του αμμωνιακού αζώτου να μετατραπεί σε νιτρώδη, χωρίς αυτά να μετατραπούν σε νιτρικά.

Έχουν διεξαχθεί αρκετές πειραματικές μελέτες για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των αναπνοή και των βέλτιστων συνθηκών ανάπτυξής τους. Παρόλα αυτά ακόμα δεν έχει επιτευχθεί ένας σαφής προσδιορισμός των βέλτιστων απαιτούμενων συνθηκών. Συνεπώς είναι απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη. Επειδή τα πειράματα έχουν αρκετές δυσκολίες ως προς την διεξαγωγή τους, είναι αναγκαία η κατασκευή μαθηματικών μοντέλων που προσομοιώνουν κατάλληλα την λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων σε όλες τις φάσεις της.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο βασίστηκε στο προϋπάρχον μοντέλο του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας. Το βασικό μοντέλο προσομοιώνει την λειτουργία μιας πλήρους ΕΕΛ και ειδικότερα για την δίαιτα του αζώτου περιγράφει τις διεργασίες νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Το τροποποιημένο μοντέλο έχει ως στόχο την προσθήκη της αναπνοή διεργασίας στην προσομοίωση και την έρευνα των συνθηκών και των τιμών των παραμέτρων που απαιτούνται, για να είναι δυνατή η απομάκρυνση του αζώτου μέσω της ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου. Για τον σκοπό αυτό προσομοιώθηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις δεξαμενών και συγκρίθηκε η αποτελεσματικότητά τους, ενώ ταυτόχρονα μελετήθηκε η ευαισθησία τους στις αλλαγές των κρίσιμων παραμέτρων που τις επηρεάζουν. Από τις προσομοιώσεις προέκυψε ότι η τροποποίηση του υπάρχοντος μοντέλου μιας συμβατικής ΕΕΛ είναι ικανή να περιγράψει αποτελεσματικά την δίαιτα του αζώτου με την προσθήκη της αναπνοή διεργασίας.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνεται ότι στην πρώτη διάταξη πραγματοποιείται ικανοποιητικά η απομάκρυνση του αζώτου από το σύστημα, αλλά αυτό προκύπτει για εξιδανικευμένες συνθήκες, οι οποίες είναι απίθανο να επιτευχθούν πλήρως κατά την λειτουργία μιας ΕΕΛ. Τα αποτελέσματα της δεύτερης διάταξης είναι πιο δυσμενή όσον αφορά το ολικό άζωτο της εκροής, αλλά έχει

πλεονέκτημα ως προς τις εκπομπές αέριων του θερμοκηπίου γεγονός που την καθιστά περισσότερο οικολογική. Επίσης με μικρές παρεμβάσεις η δεύτερη διάταξη δύναται να εξασφαλίσει συγκεντρώσεις ολικού αζώτου στην τελική εκροή που βρίσκονται μέσα στα όρια, που ορίζει η νομοθεσία και σε συνθήκες που μπορούν να προσεγγίσουν πιο ικανοποιητικά τις πραγματικές.

Abstract

The intense urbanization of modern societies has brought people and especially mechanical engineers to face several problems, one of which is wastewater treatment, in order to maintain high water quality and to avoid problems such as eutrophication and deforestation. Wastewater treatment involves a set of steps and processes that aim to reduce the concentrations of organic matter, nitrogen and phosphorus, which are the main pollutants that disturb aquatic ecosystems.

The nitrogen cycle has been clarified by scientists several decades ago. However, there were indications and observations from various ecosystems, such as the marine ones, that the nitrogen diet was deficient and could not explain the decrease in its concentration under anaerobic conditions. After various researches at the end of last century, the biochemical reaction that carries out the anoxic removal of ammonia nitrogen (ANAMMOX) was determined. The discovery and determination of this process resulted in significant changes regarding the possibilities that exist, in terms of nitrogen removal from wastewater using biochemical methods. Until then, wastewater treatment technologies focused mainly on disposal through the nitrification-denitrification combination. In recent years, research and development of technologies increasingly focus on the anammox process, since it offers significant more advantages in comparison to the conventional nitrification-denitrification method. The main advantages are the reduction of the required oxygen, which implies a significant reduction of the operating costs of the installation and the reduction of the volume of the produced sludge which results in the reduction of the volume of the tanks and to facilitate their construction. During the anammox process the anoxic oxidation of ammonia nitrogen takes place with nitrites being the electron acceptor which are reduced to nitrogen gas.

The right conditions in order for the anammox process to be effective are very demanding. They present difficulties in terms of their practical application and it is often necessary to regularly check them during the operation phase, which makes it very difficult to apply technologies based on the anammox process by several installations, especially by the smaller ones. Another factor that complicates the process is the slow growth rate of anammox bacteria. The process requires the inhibition of NOB, which are direct competitors of the anammox bacteria, because they both consume nitrites. It is also necessary to remove most of the organic carbon contained in the effluent, in order to reduce the efficiency of the anoxic growth of heterotrophic microorganisms. The typical composition of urban

wastewater contains nitrogen in the form of ammonia nitrogen. Therefore, in order for anammox bacteria to grow, partial nitrification must precede, a part of the ammoniacal nitrogen must be converted to nitrite, without them being converted to nitrates.

Several experimental studies have been conducted in order to determine the behavior of anammox and their optimal growth conditions. However, the optimal required conditions are still unclear, therefore additional studies are necessary. Because of the difficulty of the experimental process, it is imperative to construct mathematical models that properly simulate the operation of a Sewage Treatment Plant in all its phases.

In this specific dissertation, a simulation model was created, which was based on the pre-existing model of the Sanitary Technology Laboratory. The basic model simulates the operation of a complete EEL and in particular describes the nitrification and denitrification processes for the nitrogen diet. The modified model aims to add the anammox process to the simulation and investigation of the conditions and values of the parameters required to enable nitrogen removal by anoxic ammonia nitrogen removal. For this purpose, two different reservoir arrangements were simulated and their effectiveness was compared, while at the same time their sensitivity to changes in the critical parameters that affect them was studied. The simulations showed that the modification of the existing model of a conventional EEL is able to effectively describe the nitrogen diet with the addition of the anammox process.

The results of the simulation showed that in the first arrangement the removal of nitrogen from the system is carried out efficiently, but this occurs only in ideal conditions, which are unlikely to be fully achieved during the operation of an EEL. The results of the second arrangement are less efficient in terms of total nitrogen in the effluent, but it has an advantage in terms of greenhouse gas emissions, which makes it more environmentally friendly. Moreover, with small interventions the second arrangement can ensure concentrations of total nitrogen in the final outflow that are within the limits set by law and in conditions, which can approach the real ones.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων είναι ένα έργο, το οποίο συμβάλει σημαντικά στην βελτίωση της ζωής ολόκληρης της κοινωνίας, καθώς συνδέεται άμεσα με την βελτίωση των υδάτων. Η λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων καθορίζεται από ένα αυστηρό νομοθετικό πλαίσιο, το οποίο προκύπτει από τις σύγχρονες οικολογικές ανάγκες. Η μελέτη της επεξεργασίας των λυμάτων και η λειτουργία μιας ΕΕΛ είναι ένα απαιτητικό και περίπλοκο εγχείρημα, καθώς είναι αναγκαία η ύπαρξη πολλαπλών μονάδων που επιτελούν διαφορετικό έργο και πρέπει όλες μαζί συνολικά να παράξουν την αναγκαία εκροή ώστε να είναι δυνατή η διάθεση των λυμάτων στους υδάτινους αποδέκτες και της ιλύος σε Χ.Υ.ΤΑ. και σε άλλους χώρους.

Η απομάκρυνση των αζωτούχων ενώσεων από τα λύματα είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την ασφάλεια τους για το περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλες μεθόδους και έχουν γίνει πολλές μελέτες σε αυτόν τον τομέα. Μία μέθοδος που έχει αρχίσει να κερδίζει μεγάλη αναγνώριση μόλις τις τελευταίες δεκαετίες είναι η η ανοξική απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου (ANAMMOX). Η διαδικασία αυτή τάραξε τα νερά της επιστημονικής κοινότητας καθώς η ανακάλυψη της ήρθε πολύ αργότερα απο την ανακάλυψη των υπόλοιπων διεργασιών όπως η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση και έδωσε νέους τρόπους αντιμετώπισης του προβλήματος της απομάκρυνσης του αζώτου από τα λύματα. Η ύπαρξη της διεργασίας πιθανολογούνταν από αρκετούς ερευνητές πριν την τελική της ανακάλυψη από μελέτες που είχαν πραγματοποιηθεί, αλλά κανείς δεν θα μπορούσε να υποψιαστεί τις ριζικές αλλαγές που μπορεί να επιφέρει αυτή η διεργασία στις τεχνολογίες της βιολογικής απομάκρυνσης των αζωτούχων ενώσεων που κυριαρχούν στα λύματα.

Οι προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση της αναμμοξ διεργασίας στην επεξεργασία λυμάτων είναι ποικίλες και η επίτευξή τους αποτελεί μια πρόκληση. Ένας βασικός τρόπος προσδιορισμού των ειδικών συνθηκών που χρειάζονται τα συγκεκριμένα βακτήρια για να αναπτυχθούν έναντι των ανταγωνιστικών ομάδων βακτηρίων είναι η πειραματική μελέτη. Όμως η πειραματική μελέτη παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες και δυσχαιρένει το έργο των μελετητών. Έτσι κρίνεται σημαντική η χρήση μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας και των προϋποθέσεων που απαιτούνται για την την επίτευξη ευνοϊκών συνθηκών, ώστε να είναι δυνατή η ανάπτυξη των αναμμοξ βακτηρίων.

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε η επέκταση ενός συμβατικού μοντέλου προσομοίωσης, για να είναι δυνατή η περιγραφή της αναμμοξ διεργασίας και μελετήθηκαν μέσω δοκιμαστικών προσομοιώσεων οι τιμές των

παραμέτρων και οι συνθήκες που απαιτούνται για να μπορούν να αναπτυχθούν τα απαιτητά βακτήρια σε ικανοποιητικό βαθμό ώστε να επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των αζωτούχων ενώσεων από τα λύματα.

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1. Εισαγωγή

Τα λύματα που εισέρχονται για επεξεργασία σε μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων, δύναται να διαφέρουν στην σύστασή τους ανάλογα με την πηγή από την οποία προέρχονται. Οι ποσότητες και τα χαρακτηριστικά των βιομηχανικών λυμάτων ποικίλουν πολύ, βάσει της βιομηχανίας από την οποία προέρχονται και η επεξεργασία τους μπορεί να χρειάζεται ειδική επίλυση για κάθε περίπτωση. Από την άλλη οι ποσότητες και τα χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων παρουσιάζουν μια σχετική σταθερότητα (Ανδρεαδάκης, 2015)

Οι κύριες ρυπαντικές ουσίες που βρίσκονται στα αστικά λύματα και πρέπει να απομακρυνθούν από την ΕΕΛ είναι τα ογκώδη στερεά, η άμμος και τα λίπη, τα οργανικά και ανόργανα αιωρούμενα στερεά, οι διαλυμένες οργανικές ενώσεις και τα θρεπτικά συστατικά (άζωτο και φώσφορος). Το άζωτο αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές ρυπαντικές ουσίες και οι τρόποι απομάκρυνσής του από τα λύματα έχουν απασχολήσει πολύ τους ερευνητές. Το άζωτο μπορεί να βρεθεί σε ποικίλες μορφές στα λύματα και συνδέεται με την πρόκληση σοβαρών διαταραχών στα υδάτινα οικοσυστήματα, όπου πραγματοποιείται η διάθεση των αστικών λυμάτων. Το αμμωνιακό άζωτο νιτροποιούμενο προκαλεί αποξυγόνωση και η μη ιονισμένη συνιστώσα του (NH_3) είναι τοξική στους υδρόβιους οργανισμούς. Επίσης, τα νιτρικά (NO_3) αποτελούν τοξική ουσία για το πόσιμο νερό, ενώ το αμμωνιακό και το νιτρικό άζωτο αποτελούν παράγοντες ευτροφισμού στους υδάτινους αποδέκτες (Ανδρεαδάκης, 2015). Επομένως, η επεξεργασία των λυμάτων και ιδιαίτερα η απομάκρυνση του αζώτου κρίνεται απαραίτητη για την ασφαλή διάθεσή τους στα υδάτινα οικοσυστήματα. Γι' αυτόν τον λόγο η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ ορίζει τα επιτρεπτά ανώτατα όρια του αζώτου στα επεξεργασμένα λύματα.

Οι μέθοδοι επεξεργασίας των αστικών λυμάτων διακρίνονται σε χημικές, βιολογικές ή συνδυασμό των δύο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η απομάκρυνση του αζώτου με την χρήση βιολογικών μεθόδων. Οι βιολογικές μέθοδοι στηρίζονται σε βιοχημικές αντιδράσεις, οι οποίες για να πραγματοποιηθούν προϋποθέτουν την ανάπτυξη κατάλληλων ομάδων μικροοργανισμών. Στις συνήθεις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας αστικών λυμάτων η απομάκρυνση του αζώτου γίνεται με τον συνδυασμό της νιτροποίησης της αμμωνίας, η οποία αποτελεί την κύρια μορφή του αζώτου στα ανεπεξέργαστα λύματα μαζί με την απονιτροποίηση, μέσω της οποίας τα νιτρικά ανάγονται σε αέριο άζωτο. Τα στάδια της μετατροπής της αμμωνίας σε νιτρικά και έπειτα των νιτρικών σε αέριο άζωτο περιγράφονται από τις παρακάτω βιοχημικές εξισώσεις (van Dongen et. al., 2001):

Πρώτο Στάδιο: είναι η διαδικασία της νιτρωδοποίησης, κατά την οποία η αμμωνία μετατρέπεται σε νιτρώδη με την βοήθεια των Αμμωνιακών Οξειδωτικών Βακτηρίων (AOB).



Δεύτερο Στάδιο: είναι η διαδικασία της νιτρίκοποίησης, όπου τα νιτρώδη μετατρέπονται σε νιτρικά από τα Νιτροποιητικά Οξειδωτικά Βακτήρια (NOB).



Τρίτο Στάδιο: είναι η απονιτρωδοποίηση των νιτρωδών, η οποία πραγματοποιείται από τους ετερότροφους οργανισμούς.



Τέταρτο Στάδιο: είναι η απονιτροποίηση των νιτρικών, η οποία πραγματοποιείται από ομάδα ετεροτροφικών μικροοργανισμών.



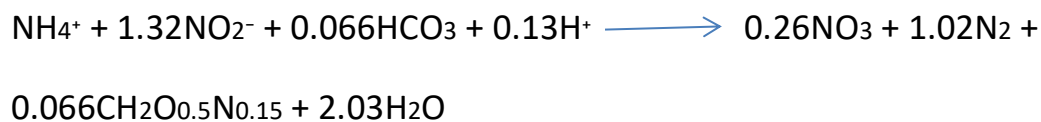
Όπως φαίνεται από τις χημικές αντιδράσεις, η πραγματοποίηση της απομάκρυνσης των νιτρικών ή των νιτρωδών απαιτεί την συνύπαρξη στην αναερόβια δεξαμενή μεθανόλης ή κάποιας άλλης πηγής οργανικού άνθρακα. Για την απονιτρωδοποίηση απαιτείται 40% λιγότερος οργανικός άνθρακας από αυτόν που απαιτείται για την απονιτροποίηση.

Τις τελευταίες δεκαετίες κερδίζει συνεχώς έδαφος μια νέα προσέγγιση απομάκρυνσης του αζώτου η οποία στηρίζεται σε μία νέα βιοχημική οδό. Αυτή είναι η οδός της αναερόβιας οξείδωσης της αμμωνίας (ANAerobic AMMonium OXidation), η οποία αποτελεί μια βιολογική επεξεργασία που μετατρέπει την αμμωνία απευθείας σε αέριο άζωτο μέσω της δράσης μιας ομάδας μικροοργανισμών οι οποίοι είναι γνωστοί ως μικροοργανισμοί ANAMMOX. Η πραγματοποίηση της αναερόβιας απομάκρυνσης της αμμωνίας προϋποθέτει την αρχική οξείδωση μιας ποσότητας της σε νιτρώδη (NO_2). Αυτή η διεργασία ονομάζεται μερική νιτρωδοποίηση. Η αναερόβια (ή ανοξική) απομάκρυνση της αμμωνίας προσφέρει σπουδαία πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο απομάκρυνσης του αζώτου τόσο σε οικονομικό επίπεδο όσο και σε τεχνικό. Είναι γνωστό ότι σημαντικό μέρος του λειτουργικού κόστους μίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων οφείλεται στην ανάγκη παροχής οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού για την ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας αλλά και για την πραγματοποίηση της νιτροποίησης της αμμωνίας. Κατά συνέπεια μέσω των διεργασιών της νιτρωδοποίησης και της ανοξικής οξείδωσης της αμμωνίας είναι δυνατή η αξιολογή μείωση της απαίτησης οξυγόνου και συνεπώς η μείωση του ενεργειακού

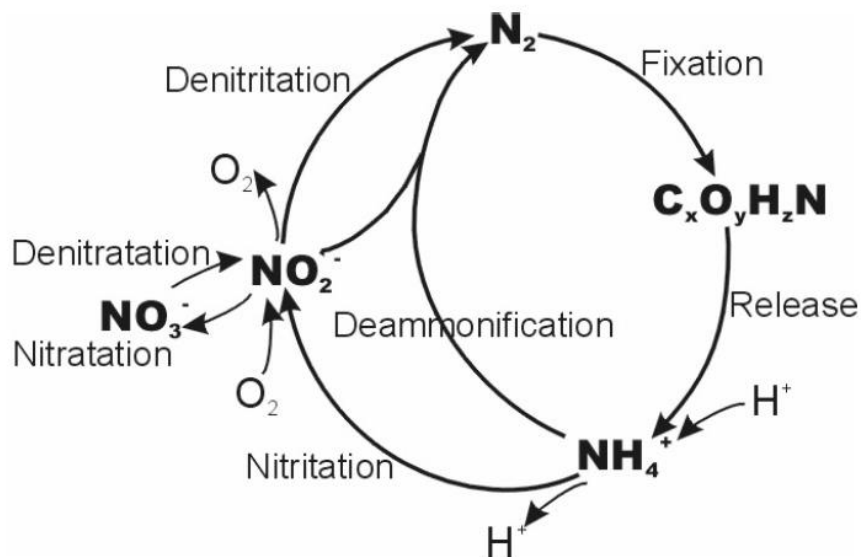
αποτυπώματος των ΕΕΛ. Επιπρόσθετα η διεργασία ANAMMOX οδηγεί σε σημαντικά μικρότερη παραγωγή ιλύος, γεγονός το οποίο εξασφαλίζει ακόμα περισσότερα οικονομικά οφέλη για μία ΕΕΛ.

2.2. Η ANAMMOX διεργασία

Η σημασία της διεργασίας της ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου δεν έχει λάβει την απαραίτητη αναγνωρισιμότητα. Είναι γνωστό ότι αυτή η διεργασία συμβάλλει στην απομάκρυνση έως και 50% του δεσμευμένου αζώτου από τα θαλάσσια οικοσυστήματα (Arrigo, 2005). Σε αναερόβιες συνθήκες ένας αυτοτροφικός μεταβολισμός μπορεί να οξειδώσει απευθείας την αμμωνία με τα νιτρώδη να διαδραματίζουν τον ρόλο του παραλήπτη ηλεκτρονίων. Παρόλο που οι επιστήμονες είχαν παρατηρήσει το φαινόμενο πριν από αρκετές δεκαετίες δεν είχε επιτευχθεί να δοθεί μια στοιχειομετρική περιγραφή της αντίδρασης έως αρκετά πρόσφατα. Η χημική εξίσωση δόθηκε από τους Strous et. al. (1999) και είναι η εξής:



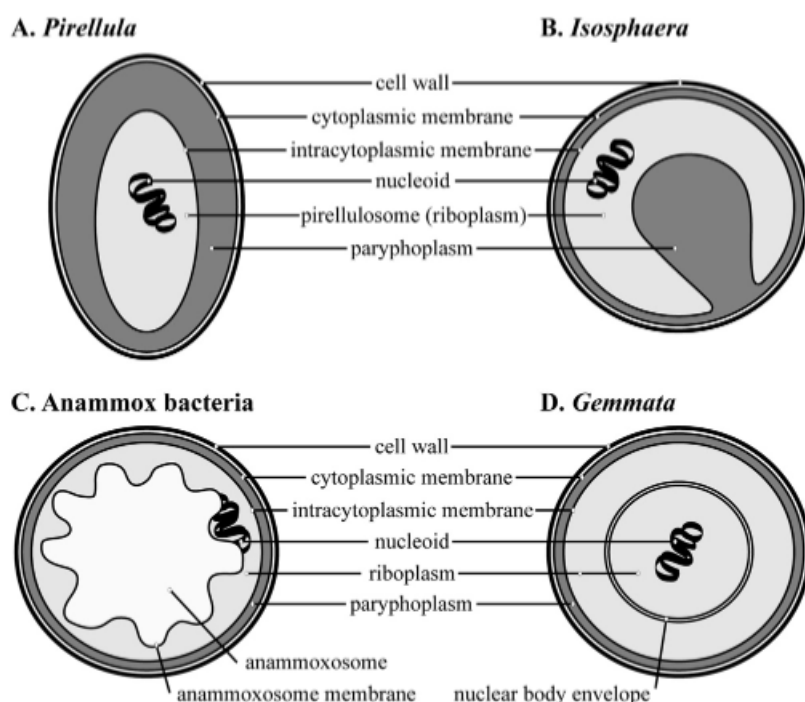
Σύμφωνα με την εξίσωση για κάθε mol αμμωνίου που οξειδώνεται, καταναλώνεται 1.32 mol νιτρωδών και παράγεται 1.02 mol αέριου αζώτου και ταυτόχρονα 0.26 mol νιτρικών.



Σχήμα 1: Ο κύκλος του αζώτου που περιλαμβάνει την anammox διεργασία (Wett, 2007)

Ήδη από την δεκαετία του 1940 οι επιστήμονες είχαν σοβαρές ενδείξεις για την ύπαρξη ενός είδους μικροοργανισμού, το οποίο έχει την δυνατότητα να μετατρέπει την αμμωνία σε αέριο άζωτο, αλλά δεν είχαν καταφέρει να τον απομονώσουν και να τον αναγνωρίσουν. Αυτό επιτεύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1990, όπου

ανιχνεύθηκε ο νέος μικροοργανισμός και παρατηρήθηκε ότι μοιάζει πολύ με τους πλαγκτομύκητες. Η αναγνώρισή τους επιφύλασσε άλλη μία έκπληξη στους επιστήμονες, καθώς τα αναπνοο βακτήρια δεν ακολουθούν τους συνήθεις κανόνες που έχουν οριστεί για τους μικροοργανισμούς. Τα αναπνοο μοιράζονται χαρακτηριστικά από τρεις διαφορετικές κατηγορίες: τα βακτήρια, τα αρχαία και τα ευκάρια. Οι πλαγκτομύκητες αποτελούν μια φυλή βακτηρίων και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους σε σχέση με τα υπόλοιπα είναι οι ενδοκυτταροπλασματικές μεμβράνες που χωρίζουν το κύτταρο (Σχήμα 2). Όλες οι καθαρές καλλιέργειες, που είναι διαθέσιμες δείχνουν ότι αυτά τα βακτήρια είναι αερόβια χημειοοργανοετεροτροφικά (van Niftrik and Jetten 2012).



Σχήμα 2: Σύγκριση των κυττάρων ενός αναπνοο βακτηρίου και του βακτηρίου Gemmata της οικογένειας "Planctomycetales (Van Niftrik and S. M. Jetten, 2012)

Από την ανακάλυψή τους και μετά τα αναπνοο βακτήρια έχουν ανιχνευθεί σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως ΕΕΛ, λίμνες, θαλάσσιες υποξικές ζώνες και σε παράκτια ιζήματα. Τα αναπνοο παίζουν σημαντικό ρόλο στο φυσικό περιβάλλον καθώς μέσω της ανάπτυξης τους πραγματοποιείται η αναερόβια απομάκρυνση του αζώτου σε διάφορες θάλασσες του πλανήτη με χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου (για παράδειγμα στην Μαύρη θάλασσα, στην Αραβική θάλασσα κ.α.). Τα οικοσυστήματα με πλεονάζοντες οργανικούς δότες ηλεκτρονίων ευνοούν την απονιτροποίηση και την μετατροπή των νιτρικών σε αμμωνία. Αντιθέτως, ολιγοτροφικά συστήματα με μικρή συγκέντρωση οξυγόνου και μεγάλη συγκέντρωση αμμωνίας ευνοούν την αναπνοο διεργασία (van Niftrik and Jetten 2012).

Εώς και σήμερα έχουν αναγνωρισθεί πέντε διαφορετικά γένη *anamnox* βακτηρίων: τα “*Candidatus Kueneenia*”, “*Candidatus Brocadia*”, “*Candidatus Anammoxoglobus*” και “*Candidatus Jettenia*”, τα οποία συλλέχθηκαν από ενεργοποιημένη ιλύ. Επίσης, τα “*Candidatus Scalindua*” έχουν συλλεχθεί σε φυσικά οικοσυστήματα, όπως θαλάσσια ιζήματα και ζώνες ελάχιστου οξυγόνου. Παρά την μεγάλη φυλογενετική απόσταση όλοι οι *anamnox* οργανισμοί ανήκουν στην ίδια τάξη (*Brocadiales*), η οποία αποτελεί μια μονοφυλετική ομάδα και διακλαδώνεται στην φυλή των πλαγκτομυκητών. Τα *anamnox* είναι κοκκοειδή βακτήρια με διάμετρό από 800-1100 μm. Το γεγονός ότι είναι αναερόβιοι χημειολιθοαυτότροφοι μικροοργανισμοί έχει ως αποτέλεσμα να διαφέρουν φυσιολογικά από τους υπόλοιπους πλαγκτομύκητες. Στο κέντρο του κυττάρου υπάρχει το *anamnoxosome*, το οποίο περικλείεται από μια μεμβράνη. Εκεί πιστεύεται ότι συμβαίνουν όλες οι καταβολικές διεργασίες του μεταβολισμού των *anamnox*. Συνεπώς, το *anamnoxosome* κατέχει λειτουργία παρόμοια του μιτοχονδρίου. Στο ριβόπλασμα τους, το οποίο μοιάζει με το κυτταροπλασματικό διαμέρισμα άλλων βακτηρίων, περιέχονται τα ριβοσώματα και το νουκλεοειδές και εκεί λαμβάνει χώρα η μεταγραφή και η μετάφραση. Παρόλα αυτά, δεν είναι γνωστός ο μηχανισμός με τον οποίο τα *anamnox* μεταφέρουν πρωτεΐνες από το ριβόπλασμα στο παρυφύπλασμα και στο *anamnoxosome*. Επιπλέον, τα *anamnox* αποθηκεύουν γλυκογόνο στο ριβόπλασμα, ωστόσο η αιτία που συμβαίνει αυτό δεν είναι σαφής σε κανένα βακτήριο. Υπάρχουν ενδείξεις ότι το γλυκογόνο λειτουργεί ως αποθήκη ενέργειας και άνθρακα, τα οποία είναι αναγκαία για το κύτταρο σε περιόδους που βρίσκονται σε αντίξοες συνθήκες ή σε έλλειψη τροφής. Ακόμα ένα στοιχείο των *anamnox* κυττάρων, για το οποίο υπάρχουν αναπάντητα ερωτήματα είναι αν το εξωτερικό μέρος του κυττάρου (παρυφύπλασμα) είναι κυτταροπλασματικό ή περιπλασματικό. Ο κυτταρικός φάκελος των *anamnox* έχει ομοιότητες με τους υπόλοιπους πλαγκτομύκητες και έχει αναγνωρισθεί η ύπαρξη ενός πρωτεϊνικού κυτταρικού τοιχώματος χωρίς πεπτιδογλυκάνη και εξωτερική μεμβράνη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα *anamnox* βακτήρια χρησιμοποιούν το νιτρώδες άλας ως δέκτη ηλεκτρονίων για να μετατρέψουν την αμμωνία σε αέριο άζωτο. Ως ενδιάμεσα στάδια αυτής της αντίδρασης είναι η εξαιρετικά τοξική υδραζίνη (N_2H_4), γνωστή ως καύσιμο πυραύλων και το νιτρικό οξείδιο (NO) (van Niftrik and Jetten, 2012). Τα βακτήρια *anamnox* χρησιμοποιούν την ενέργεια από τον καταβολισμό τους για την αυτοτροφική ανάπτυξή τους. Με βάση την ισοτοπική σύνθεση του άνθρακα των κυττάρων προτάθηκε ότι τα βακτήρια *anamnox* κάνουν χρήση της βιοχημικής οδού του ακέτυλο-συνενζύμου A (coA) για την αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα σε νέο κυτταρικό υλικό (Strous et. al., 2006).

Οι *anamnox* καλλιέργειες περιέχουν από 80-95% *anamnox* βακτήρια, τα οποία αναπτύσσονται ως συσσωματώματα ή ως μοναδικά κύτταρα. Οι καλλιέργειες γίνονται σε βιολογικούς αντιδραστήρες, που έχουν μεγάλες δυνατότητες

συγκράτησης της βιομάζας. Αυτό είναι απαραίτητο, επειδή τα αναπνοοχ διπλασιάζονται μία φορά την εβδομάδα τα μεμονωμένα κύτταρα και μία φορά στις δύο εβδομάδες τα συσσωματώματα. Για αυτό τον λόγο δεν είναι δυνατή η καθαρή καλλιέργεια των αναπνοοχ.

Όσον αφορά την επεξεργασία των αστικών λυμάτων γίνεται αντιληπτό, ότι η πραγματοποίηση της αναερόβιας απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου προϋποθέτει την πραγματοποίηση της νιτροδοποίησης. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες που έχουν αποδείξει ότι ο συνδυασμός της νιτροδοποίησης με την αναερόβια απομάκρυνση της αμμωνίας μπορεί να επιτευχθεί τόσο σε εργαστηριακό επίπεδο όσο και σε πραγματικές εφαρμογές. Οι κύριες εφαρμογές που χρησιμοποιείται η αλληλουχία αυτών των διεργασιών είναι στην επεξεργασία των στραγγιδίων στις ΕΕΛ. Η επεξεργασία των στραγγιδίων προσφέρει ιδανικές συνθήκες για την απομάκρυνση της αμμωνίας μέσω της ANAMMOX διεργασίας, καθώς εμπεριέχουν υψηλό φορτίο αζώτου και ταυτόχρονα χαμηλό φορτίο οργανικού άνθρακα. Ο κύριος ανταγωνιστής των αναπνοοχ βακτηρίων είναι οι χημικοοργανοτροφικοί ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί, οι οποίοι οξειδώνουν τον οργανικό άνθρακα στα λύματα με την χρήση των νιτροδών. Ο μεγάλος χρόνος αναπαραγωγής των αναπνοοχ βακτηρίων και ταυτόχρονα ο μικρός συντελεστής μετατροπής βιομάζας δυσκολεύει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη τους έναντι των ανταγωνιστικών ομάδων μικροοργανισμών. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η μικρή συγκέντρωση οργανικού άνθρακα για να δώσει το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα ώστε να αναπτυχθούν και να αποκτήσουν αρκετά μεγάλο πληθυσμό για να πραγματοποιείται επαρκώς η αναερόβια απομάκρυνση της αμμωνίας.

Η κατανόηση της μερικής νιτροποίησης είναι ένα απαιτητικό εγχείρημα και γι' αυτό έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Η αναπνοοχ διεργασία καταναλώνει τα νιτρώδη για να οξειδώσει την αμμωνία που βρίσκεται στα λύματα. Συνεπώς, βασικός στόχος της μερικής νιτροποίησης (νιτροδοποίησης) είναι να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες ώστε να πραγματοποιηθεί μόνο το πρώτο στάδιο της νιτροποίησης, με αποτέλεσμα να παράγονται τα απαραίτητα νιτρώδη και να μην μετατρέπονται σε νιτρικά. Αυτό επιτυγχάνεται με την αναχαίτιση των νιτροποιητικών βακτηρίων (NOB), τα οποία οξειδώνουν τα νιτρώδη σε νιτρικά με κατανάλωση οξυγόνου. Ταυτόχρονα πρέπει να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες, ώστε να αναπτυχθούν τα αμμωνιοοξειδωτικά βακτήρια (AOB) αλλά σε περιορισμένο πληθυσμό για να μην οξειδώσουν όλη την αμμωνία που περιέχεται στα λύματα γεγονός που θα καθιστούσε την ανάπτυξη των αναπνοοχ βακτηρίων αδύνατη.

Τα αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια (AOB) ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες ειδών: τα *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospiran* *Nitrosolobus* και τα *Nitrosorobrio*, εκ των οποίων τα *Nitrosomonas* είναι τα κυρίαρχα σε δεξαμενές

αερισμού. Ο πληθυσμός των βακτηρίων αυτών επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στα λύματα, για αυτό η διεργασία διευκολύνεται στην επεξεργασία λυμάτων με υψηλή φόρτιση αμμωνίας. Επίσης, από προηγούμενες μελέτες έχει βρεθεί ότι ο ειδικός συντελεστής της μέγιστης ταχύτητας ανάπτυξης των AOB βακτηρίων εξαρτάται από το pH και την θερμοκρασία. Για τιμές του συντελεστή οι οποίες κυμαίνονται στα 0.81-0.85 d⁻¹ η τιμή του pH κυμαίνεται από το 7.5-8 και της θερμοκρασίας από 30-35 °C (Zhang et al., 2014).

Τα βακτήρια που είναι υπεύθυνα για την οξείδωση των νιτρωδών (NOB) είναι αυτοτροφικά και διακρίνονται σε έξι κύρια είδη: τα *Nitrobacter*, *Nitrotoga*, *Nitrococcus*, *Nitrospina* και *Nitrolancea* εκ των οποίων τα επικρατέστερα σε μια δεξαμενή αερισμού είναι τα *Nitrobacter* και τα *Nitrospira*. Η αποτελεσματικότητα της οξείδωσης των νιτρωδών και η ανάπτυξη των NOB βακτηρίων έναντι των AOB εξαρτώνται από αρκετούς παράγοντες. Οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής στερεών στην Εγκατάσταση, οι χαμηλές θερμοκρασίες και η σχετικά χαμηλότερη φόρτιση των λυμάτων με αμμωνία ευνοούν την ανάπτυξη των NOB βακτηρίων (Liu and Wang, 2013).

Οι συνθήκες που επηρεάζουν την μερική νιτροποίηση και την αναερόβια απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου ποικίλουν. Ένας ακόμα παράγοντας είναι τα είδη των δεξαμενών που χρησιμοποιούνται και η σειρά με την οποία τοποθετούνται. Η έρευνα μέσω πειραμάτων δεν είναι πάντα εύχρηστη, καθώς δεν μπορούν να ερευνηθούν εύκολα όλες οι περιπτώσεις. Επιπλέον, ο μεγάλος χρόνος και οι μεγάλοι όγκοι των δεξαμενών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση των παραπάνω διεργασιών δυσχεραίνουν τη διαδικασία της έρευνας.

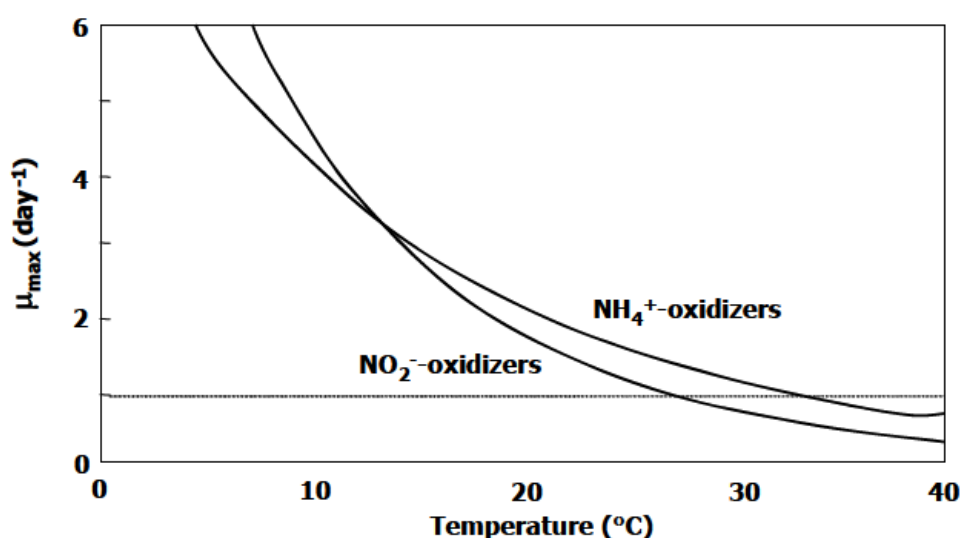
Έτσι, η προσομοίωση συστημάτων νιτρωδοποίησης-ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου μέσω μαθηματικών μοντέλων προσφέρει μεγάλες δυνατότητες στην έρευνα. Συγκεκριμένα διευκολύνει τον προσδιορισμό των κατάλληλων λειτουργικών και κινητικών παραμέτρων σε μια ΕΕΛ. Επιπρόσθετα, δίνει την δυνατότητα να μελετηθούν οι τρόποι ανάπτυξης των διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών που συμμετέχουν στις παραπάνω διεργασίες. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της προσομοίωσης μέσω μαθηματικών μοντέλων για τις διαδικασίες της νιτρωδοποίησης -αναερόβιας απομάκρυνσης της αμμωνίας είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν και να λειτουργήσουν ως επέκταση υφιστάμενων μοντέλων που περιγράφουν την λειτουργία μιας ΕΕΛ.

2.3. Παράμετροι που Επιδρούν στα Αναμμοξ Βακτήρια

Η ανάπτυξη των αναμμοξ βακτηρίων και συνεπώς η πραγματοποίηση της αναερόβιας απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου έχει παρατηρηθεί ότι

επηρεάζεται σημαντικά από ορισμένες παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι είναι λειτουργικές, δηλαδή έχουν σχέση με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος των δεξαμενών στην ΕΕΛ, αλλά και κινητικές καθώς επηρεάζουν τις κινητικές εξισώσεις που περιγράφουν τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στις δεξαμενες. Επίσης, οι διεργασίες επηρεάζονται από την αρχική σύσταση των λυμάτων όταν εισέρχονται για επεξεργασία.

Η **θερμοκρασία** είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος και εμπλέκεται στην πραγματοποίηση και στην ταχύτητα των κινητικών εξισώσεων. Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και μέγιστης ανάπτυξης των βακτηρίων που οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο και των βακτηρίων που οξειδώνουν τα νιτρώδη είναι διαφορετική. Οι οξειδωτές του αμμωνιακού αζώτου χρειάζονται ιλύ μικρότερης ηλικίας (χαμηλό SRT) και γενικά μεγαλύτερες θερμοκρασίες από ότι οι οξειδωτές των νιτρωδών (van Dongen, 2001).



Σχήμα 3: Η επιρροή της θερμοκρασίας στον ειδικό ρυθμό μέγιστης ανάπτυξης των μικροοργανισμών που οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο και τα νιτρώδη αντίστοιχα (L.G.J.M. van Dongen, 2001)

Στην εικόνα φαίνεται ότι για λειτουργία στους 35 °C η μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης των οξειδωτικών βακτηρίων του αμμωνιακού αζώτου είναι περίπου διπλάσια από εκείνη των οξειδωτικών βακτηρίων των νιτρωδών. Συνεπώς η μερική νιτροποίηση και η παραγωγή νιτρωδών αποκτά πλεονέκτημα σε σχέση με την ολική νιτροποίηση και εϋννοείται η ανάπτυξη των αναπνοοχ βακτηρίων.

Όσον αφορά την ανάπτυξη των αναπνοοχ έχει βρεθεί ότι η υψηλότερη απόδοση τους βρίσκεται σε τιμές της θερμοκρασίας γύρω από τους 37 °C, ενώ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 45 °C η ανάπτυξη τους αναστέλλεται εντελώς. Με

την μείωση της θερμοκρασίας τα AOB βακτήρια αποκτούν μεγαλύτερο πλεονέκτημα ανάπτυξης, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται νιτρώδη και με περαιτέρω μείωση τα νιτρικά υπερισχύουν έναντι των υπόλοιπων μορφών αζώτου. Οι Rodriguez Sanchez et. al., 2016 μελέτησαν την συμπεριφορά των αναμμοχ και της μερικής νιτροποίησης σε θερμοκρασία 15 °C, καθώς είναι μια συνήθης θερμοκρασία λειτουργίας των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων σε χώρες που δεν είναι πολύ θερμές. Η μελέτη διεξήχθη για αντιδραστήρα ενός σταδίου και βρέθηκε ότι το 12.25 % των AOB και το 9.50 % των αναμμοχ συνεργάστηκαν σε μια ισορροπημένη απομάκρυνση αζώτου από το σύστημα (Shourjeh et al., 2020). Οι Lackner et. al. 2015 αποκάλυψαν ότι η μείωση της θερμοκρασίας κάτω από τους 12 °C αναστέλλει τη δραστηριότητα των AOB και των αναμμοχ βακτηρίων τόσο για SBR όσο και MBBR αντιδραστήρες σε εργαστηριακή κλίμακα. Υπάρχει πληθώρα μελετών που υποστηρίζουν ότι η μέγιστη ανάπτυξη των αναμμοχ συμβαίνει σε διαφορετικές θερμοκρασίες από τους 37 °C. Συνεπώς, η θερμοκρασία επηρεάζει διαφορετικά τα διάφορα είδη των αναμμοχ που μπορούν να αναπτυχθούν σε μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων.

Η σχέση μεταξύ των μεταβολών της θερμοκρασίας και του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης μπορεί να περιγραφεί με εξισώσεις τύπου Arrhenius. Το θεωρητικό εύρος των συντελεστών της θερμοκρασίας είναι 1.02-1.10 για υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο οι Guo et. al. 2010 βρήκαν πως η τιμή είναι υψηλότερη-1.172 για χαμηλότερες θερμοκρασίες (5-20 °C). Σε πείραμα που πραγματοποίησαν οι Sobotka et. al. 2016 βρήκαν αποτελέσματα ίδια με τα θεωρητικά, ενώ κατά την λειτουργία μιας μακροπρόθεσμης δοκιμής SBR βρέθηκε ότι οι συντελεστές της θερμοκρασίας ήταν 1.07 για εύρος τιμών 15-30 °C και 1.65 για εύρος τιμών 11-15 °C. Ο ενεργειακός παράγοντας ενεργοποίησης (E_a) έδειξε την ίδια συμπεριφορά 115.1 kJ/mol σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (5-20 °C) και 42.0 kJ/mol σε υψηλότερες θερμοκρασίες (20-35 °C) (Shourjeh et al., 2020).

$$r_T = r_{293} \times \theta^{(T-293)},$$

$$\mu_{\max,T} = \mu_{\max,20\text{ }^\circ\text{C}} \times \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right],$$

$$\ln r_T = -\frac{E_a}{RT} + \ln A$$

Όπου:

$\mu_{\max,T}$: ειδικός συντελεστής ανάπτυξης (d^{-1})

$\mu_{\max,20\text{ }^\circ\text{C}}$: μέγιστος ειδικός συντελεστής ανάπτυξης (d^{-1})

Ea: η ενέργεια ενεργοποίησης (kJ/mol)

R: 8.314 (j/mol*K)

rT: θερμοκρασία αντίδρασης στο T

θ: συντελεστής θερμοκρασίας

A: ο παράγοντας συχνότητας για την αντίδραση

T: θερμοκρασία σε Kelvin

Για την επιτυχή λειτουργία συστημάτων μερικής νιτροποίησης- αναμμοξ σε χαμηλές θερμοκρασίες απαιτείται η εφαρμογή τεχνολογιών που βασίζονται στην υψηλή συγκέντρωση και διατήρηση της βιομάζας όπως οι βιοαντιδραστήρες MBBR. Οι Gilbert et. al. 2014 κατάφεραν να διατηρήσουν σταθερή ανάπτυξη των αναμμοξ βακτηρίων σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 10 °C. Επίσης, σε μελέτη των Zekker et. al. 2016 έδειξαν ότι η ανάπτυξη της βιομάζας σε βιοαντιδραστήρα MBBR για θερμοκρασία λειτουργίας 9 °C εξασφάλισαν συγκρίσιμα ποσοστά απομάκρυνσης αζώτου με αντίστοιχες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για θερμοκρασία 20 °C (Shourjeh et. al., 2020).

Η τιμή του pH αποτελεί άλλη μία παράμετρο, που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της αναερόβιας απομάκρυνσης του αζώτου. Η οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδες άλας είναι μια διαδικασία οξίνισης. Το αποτέλεσμα αυτής της οξίνισης εξουδετερώνεται μερικώς από το όξινο ανθρακικό άλας (HCO₃), το οποίο είναι παρόν στο νερό της ιλύος. Το ανθρακικό άλας λειτουργεί ως ρυθμιστής του pH όπως φαίνεται και στην παρακάτω εξίσωση.



Στο νερό της ιλύος η αναλογία HCO₃:NH₄ είναι 1.1:1 (Hellinga et al., 1998). Όταν το μισό ελεύθερο αμμώνιο μετατραπεί, το pH αρχίζει να μειώνεται και όταν το pH πέσει κάτω από περίπου 6,5, η οξείδωση του αμμωνίου δεν πραγματοποιείται πλέον, λόγω της εξαρτημένης ισορροπίας του pH μεταξύ των συγκεντρώσεων των NH₃ και NH₄. Η ισορροπία μεταξύ NH₃ και NH₄ περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:



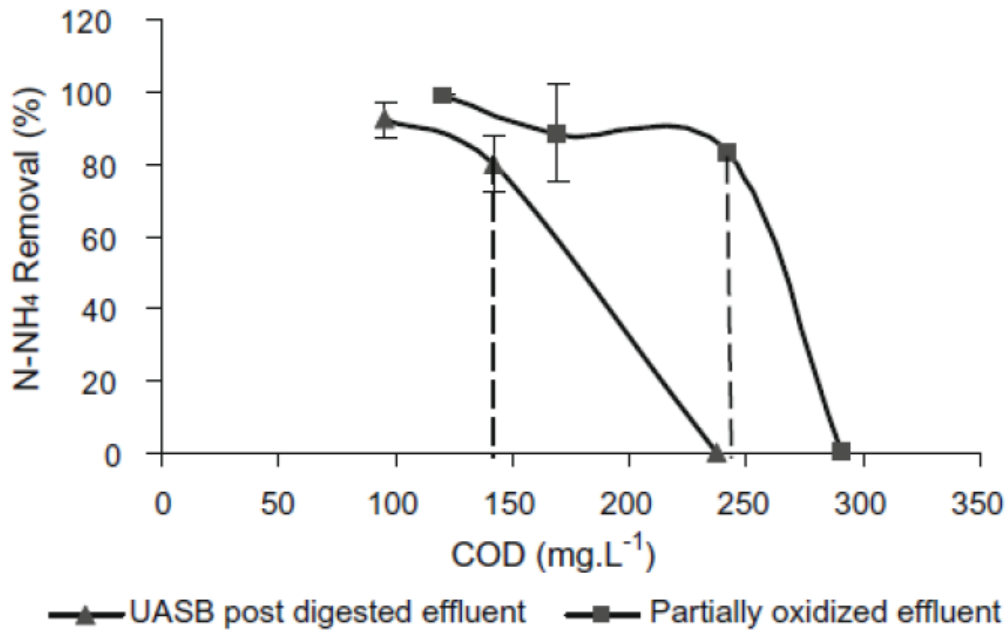
Σε pH μικρότερα του 6.5 το περιβάλλον γίνεται αρκετά πιο όξινο και μικραίνει η συγκέντρωση του αζώτου με την μορφή αμμωνίας στον αντιδραστήρα. Επίσης μειώνεται η συγκέντρωση του ελεύθερου αμμωνίου και δεν πραγματοποιείται η ανάπτυξη των AOB βακτηρίων. Παρόλα αυτά κάθε νέα εισροή λυμάτων περιέχει ανθρακικό άλας με αποτέλεσμα να αλλάζει την ισορροπία του pH και να πραγματοποιείται η οξείδωση του αμμωνίου (van Dongen, 2001). Η ρύθμιση του pH

σε τιμές μεταξύ του 7.5 και 8.5 ευνοεί την πραγματοποίηση της μερικής νιτροποίησης με ταυτόχρονη συσσώρευση νιτρωδών (Shourjeh et. al., 2020).

Το **διαλυμένο οξυγόνο** θεωρείται ο σημαντικότερος παράγοντας, που καθορίζει την μερική νιτροποίηση και την αναερόβια απομάκρυνση του αζώτου. Η σταθερότητα της μερικής νιτροποίησης- νίτρωδοποίησης προϋποθέτει την αναχαίτιση των NOB βακτηρίων, το οποίο επιτυγχάνεται με τον περιορισμό της παροχής οξυγόνου κατά την διάρκεια της αντίδρασης. Οι Rodriguez Sanchez et. al. υποστηρίζουν ότι η τιμή της σταθεράς μισού κορεσμού για τα AOB και NOB βακτήρια είναι 0.2-0.4 mg/l και 1.2-1.5 mg/l αντίστοιχα, το οποίο υποδεικνύει ότι η δραστηριότητα των NOB επηρεάζεται περισσότερο σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου σε σχέση με την δραστηριότητα των AOB. Οι Li et. al. 2016 πέτυχαν απόδοση απομάκρυνσης αζώτου στο 81 % υπό χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (0.6 ± 0.1 mg/l) μέσω των διαδικασιών μερικής νιτροποίησης- αναερόβιας απομάκρυνσης της αμμωνίας σε αντιδραστήρα βιοφίλμ αεριζόμενης μεμβράνης (UMABR).

Τα αναπνοο βακτήρια αναπτύσσονται σε συνθήκες ολικής απουσίας οξυγόνου ή μικρής συγκέντρωσης οξυγόνου. Συνεπώς το διαλυμένο οξυγόνο επηρεάζει και τα δύο στάδια της απομάκρυνσης της αμμωνίας που εισέρχεται στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων. Σημαντικό ρόλο στην επίδραση του διαλυμένου οξυγόνου διαδραματίζει και το είδος της βιομάζας που σχηματίζεται. Δηλαδή αν πρόκειται για σύστημα αιωρούμενης, προσκολλημένης ή κοκκώδους βιομάζας.

Η συγκέντρωση των λυμάτων σε διαλυμένο **οργανικό άνθρακα** είναι μία μεταβλητή, η οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των αναπνοο βακτηρίων παρόλου που είναι αυτοτροφικά και δεν χρειάζονται τον οργανικό άνθρακα άμεσα. Ωστόσο στις ανοξικές συνθήκες αναπτύσσονται και αρκετοί ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί, οι οποίοι δρουν ανταγωνιστικά ως προς την ανάπτυξη των αναπνοο βακτηρίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί οξειδώνουν το διαλυμένο οργανικό άνθρακα με αποδέκτη ηλεκτρονίων τα νιτρώδη. Επίσης, η μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης αυτών των μικροοργανισμών είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα αναπνοο, με αποτέλεσμα να υπερισχύουν στην κατανάλωση των νιτρωδών μη επιτρέποντας την ανάπτυξη των αναπνοο. Επομένως, για να πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη των αναπνοο και να ολοκληρωθεί η αναερόβια απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου απαιτείται η όσο τον δυνατόν μικρότερη συγκέντρωση οργανικού άνθρακα στην ανοξική δεξαμενή. Αυτός είναι και ο λόγος που τα αναπνοο χρησιμοποιούνται κυρίως στην επεξεργασία των στραγγιδίων, καθώς εμφανίζουν υψηλό φορτίο αζώτου και ταυτόχρονα χαμηλό οργανικό φορτίο.



Σχήμα 4: Επίδραση της συγκέντρωσης του COD στην απομάκρυνση της αμμωνίας (

Η ανάπτυξη των αναπνοοκ και των υπόλοιπων βακτηρίων μπορεί να αναχαιτιστεί από την παρουσία **τοξικών ουσιών**. Οι υπερβολικά υψηλές συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου κατά την εισροή των λυμάτων στο σύστημα και η συσσώρευση μεγάλης ποσότητας νιτρωδών, μέσω της νιτροποίησης, οδηγούν στην δημιουργία ιδιαίτερα αντιδραστικής και τοξικής ελεύθερης αμμωνίας (FA) και ελεύθερου νιτρώδους οξέος (FNA) αντίστοιχα. Οι αλλαγές του pH επηρεάζουν την ομάδα FA και FNA που αλληλεπιδρούν και αναστέλλουν τις κινητικές ανάπτυξης. Το FA επηρεάζει τα NOB πιο πολύ από τα AOB με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται νιτρώδη, λόγω της αναχαίτισης των NOB. Το FA σε συγκέντρωση 10-150 mg/l αναχαιτίζει την δραστηριότητα των AOB βακτηρίων ενώ σε συγκέντρωση 0.1-1 mg/l προκαλεί αναχαίτιση των NOB. Για παράδειγμα, έχει βρεθεί ότι η αύξηση από 0 σε 16.82 mg NH₃/l μειώνει την αποτελεσματικότητα των AOB και των NOB κατά 15.9 % και 29.2 % αντίστοιχα. Επίσης έχει διαπιστωθεί ότι η αύξηση του FNA επιδρά αρνητικότερα στα NOB από ότι στα AOB (Shourjeh et. al., 2020).

Όσον αφορά την άμεση επιρροή στην ανάπτυξη των αναπνοοκ βακτηρίων οι Fernandez et. al. ,(2010) υποστηρίζουν ότι μετά από πειράματα, τα οποία διεξήχθησαν σε αντιδραστήρα με βιοφίλμ, με ανόργανους βιοφορείς και κροκκιδωμένη βιομάζα η μείωση της απόδοσης των αναπνοοκ για συγκέντρωση FA 38 mg NH₃/l είναι 50 %. Για συγκέντρωση 100 mg NH₃/l η αναχαίτιση έφτασε το 80 %. Για την συγκέντρωση του FNA οι Lotti et. al. 2012 ανακάλυψαν ότι όταν συσσωρεύονται 0.4 g N/l η αναχαίτιση της ανάπτυξης των αναπνοοκ φτάνει το 50 %.

2.4. Συστήματα Αναερόβιας Απομάκρυνσης του Αζώτου

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η βιολογική απομάκρυνση του αζώτου μέσω νιτρωδοποίησης – αναμμοξ έχουν προταθεί διάφορα συστήματα, των οποίων η παρουσίαση πραγματοποιείται στις ακόλουθες ενότητες.

Αντιδραστήρας SHARON

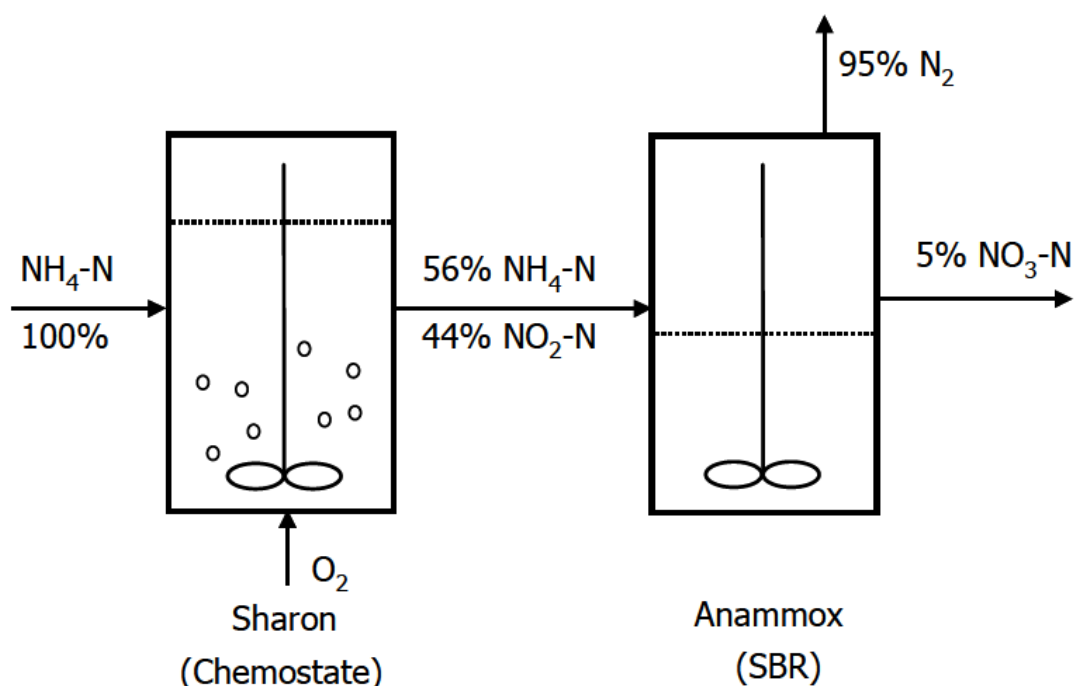
Το 1995 ερευνήθηκαν τεχνικές επεξεργασίας με σκοπό την απομάκρυνση του αζώτου από ροές στραγγιδίων (STOWA 1996a). Μία από τις επιλογές που δοκιμάστηκαν ήταν η απομάκρυνση του αζώτου με την διαδικασία SHARON (Single reactor system for High Ammonium Removal Over Nitrite). Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε έναν διαλείποντος έργου αεριζόμενο αντιδραστήρα, πλήρως αναδευόμενο συνεχούς ροής χωρίς την κατακράτηση υλός (δηλαδή ο χρόνος παραμονής στερεών ισούται με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής). Κατά την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρώδη από τα AOB βακτήρια (μερική νιτροποίηση) υπό αερόβιες συνθήκες. Λόγω του μικρού υδραυλικού χρόνου και της υψηλής θερμοκρασίας (35 °C) τα NOB βακτήρια δε μπορούν να αναπτυχθούν, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μόνο νιτρώδη. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι για την οξείδωση του αμμωνίου σε νιτρώδη απαιτείται 25 % λιγότερο οξυγόνο συγκριτικά με την οξείδωση του αμμωνίου σε νιτρικά. Τα νιτρικά και τα νιτρώδη που σχηματίζονται απομακρύνονται από την δεξαμενή υπό ανοξικές συνθήκες, όταν παύει η παροχή οξυγόνου στην δεξαμενή. Οι διεργασίες απομάκρυνσης των νιτρικών και νιτρωδών αποτελούν την απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, η οποία περιγράφηκε παραπάνω (van Dongen, 2001).

Αντιδραστήρας διεργασίας ANAMMOX

Στην δεξαμενή αυτή πραγματοποιείται η αναμμοξ διεργασία που έχει περιγραφεί προηγουμένως. Η αμμωνία μετατρέπεται σε αέριο άζωτο μέσω της ανάπτυξης των αυτοτροφικών αναμμοξ βακτηρίων, με τα νιτρώδη να παίζουν τον ρόλο του παραλήπτη ηλεκτρονίων. Η διεργασία δύναται να έχει μεγάλες αποδόσεις της τάξεως των 2.6 kg Ntot/m³ (Jetten et al., 1999). Συνεπώς, η αναμμοξ διεργασία φαίνεται ικανή για την απομάκρυνση του αζώτου από τα λύματα. Συγκριτικά η φόρτιση αζώτου σε ένα σύστημα ενεργού υλός είναι 0.1 kg Ntot/m³ αντιδραστήρα/ημέρα (STOWA 1996b). Η αναμμοξ διεργασία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να έχει προηγηθεί η παραγωγή νιτρωδών καθώς τα λύματα που εισέρχονται στην επεξεργασία περιέχουν άζωτο κυρίως στην μορφή της αμμωνίας.

Σύστημα SHARON-ANAMMOX

Στο σύστημα SHARON-ANAMMOX συνδυάζεται η μερική νιτροποίηση με την ανοξική απομάκρυνση του αζώτου, μέσω της ανάπτυξης των anammox βακτηρίων. Σε προηγούμενη έρευνα ο συνδυασμός των δύο διεργασιών πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός αντιδραστήρα fluidised bed, στον οποίο αναπτύχθηκαν τα anammox. (Jetten et al., 1997) Χρησιμοποιώντας αυτή την διάταξη δεξαμενών αποδείχθηκε ότι μπορεί να διεξαχθεί με επιτυχία η επεξεργασία του νερού της λύσης. Ένας αντιδραστήρας Sharon χωρίς έλεγχο pH τροφοδοτήθηκε με νερό λύσης (στραγγίδια) με ρυθμό φόρτωσης 1.2 kg Ntot/m^3 αντιδραστήρα/ημέρα. Το 53 % του εισερχόμενου αμμωνίου μετατράπηκε σε 39 % νιτρώδη και 14 % νιτρικά. Επομένως, τα λύματα περιείχαν ένα μείγμα αμμωνίου/νιτρωδών με αναλογία 1.3:1.0. Η απορροή της δεξαμενής Sharon χρησιμοποιήθηκε ως εισροή στον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης anammox. Στον αντιδραστήρα όλα τα νιτρώδη απομακρύνθηκαν και παρέμεινε μια μικρή ποσότητα αμμωνίου. Στην έρευνα μετρήθηκε ότι το 83 % του αρχικού αμμωνίου απομακρύνθηκε από το νερό της λύσης (van Dongen, 2001).



Σχήμα 5: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος Sharon-Anammox (L.G.J.M. van Dongen, 2001)

Τα παραπάνω συστήματα έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό ότι συνήθως είναι διβάθμια. Στο πρώτο στάδιο τα εισερχόμενα λύματα επεξεργάζονται στην δεξαμενή αερισμού, όπου περίπου το 50 % της αμμωνίας μετατρέπεται σε νιτρώδη και νιτρικά. Ο βασικός στόχος είναι η επίτευξη της μερικής νιτρωδοποίησης, δηλαδή η συσσώρευση νιτρωδών στην δεξαμενή αερισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με την αναχαίτιση των NOB βακτηρίων, τα οποία οξειδώνουν τα νιτρώδη μετατρέποντάς τα

σε νιτρικά. Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία στην αερόβια δεξαμενή τα λύματα εισέρχονται στην ανοξική δεξαμενή, όπου πραγματοποιείται η απονιτροποίηση/ απονιτροδοποίηση ή η απομάκρυνση του αζώτου μέσω της ανάπτυξης των αναπνοοβ βακτηρίων. Σε αυτό το διβάθμιο σύστημα είναι γεγονός ότι ακόμα και όταν οι συνθήκες είναι πλήρως ευνοϊκές για την ανάπτυξη των αναπνοοβ βακτηρίων δεν επιτυγχάνεται πλήρης αναχαίτιση της ανάπτυξης των ανοξικών ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Συνεπώς, ένα μέρος των νιτροδών απομακρύνεται μέσω της απονιτροδοποίησης. Με σκοπό την επίτευξη της πλήρους απομάκρυνσης του αζώτου μέσω της διεργασίας αναπνοοβ έχουν ελεγχθεί διαφορετικές τεχνολογίες δεξαμενών. Οι κυριότερες από αυτές είναι τα συστήματα CANON, DEMON, OLAND, BABE και DEAMMOX.

Σύστημα CANON

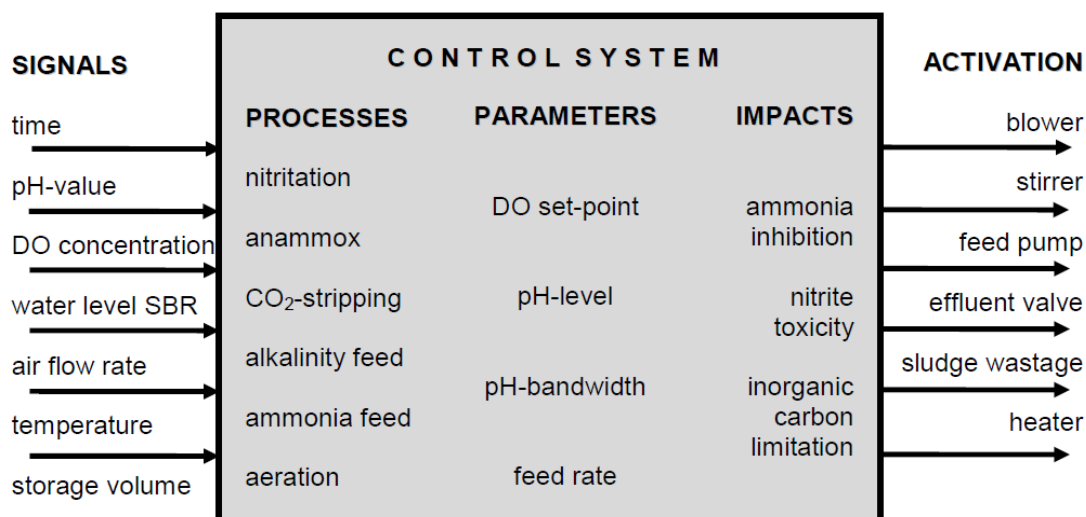
Το σύστημα CANON (Completely Autotrophic Nitrogen removal Over Nitrite) επιχειρεί την πλήρη απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου και των νιτροδών από τα αυτοτροφικά βακτήρια σε μια δεξαμενή με χαμηλή παροχή οξυγόνου. Σε αυτό το σύστημα οι διεργασίες της μερικής νιτροποίησης και της ανάπτυξης των αναπνοοβ συμβαίνουν ταυτόχρονα σε συνθήκες περιορισμένου αερισμού (Gong et al., 2007). Η ανάπτυξη των αναπνοοβ είναι πολύ ευαίσθητη παρουσία οξυγόνου. Συνεπώς, η συγκέντρωση του οξυγόνου πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος αναχαίτισης της ανάπτυξής τους. Ταυτόχρονα όμως πρέπει να ληφθεί υπόψη και η πραγματοποίηση της οξειδωσης του αμμωνιακού αζώτου, η οποία αποτελεί αερόβια διεργασία. Έτσι, η κατάλληλη ρύθμιση της συγκέντρωσης του οξυγόνου είναι το κλειδί για την επιτυχή λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος.

Σύστημα DEMON

Το σύστημα DEMON (DEamMONification) είναι μια τεχνολογία αυτοτροφικής απομάκρυνσης του αζώτου. Αποτελείται από έναν SBR αντιδραστήρα όπου γίνεται συνεχής και αυστηρός έλεγχος των βασικών παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν την αναχαίτιση από την ελεύθερη αμμωνία, την τοξικότητα των νιτροδών και τον περιορισμό του ανόργανο άνθρακα. Η ρύθμιση γίνεται μέσω του έλεγχου του χρόνου παραμονής, του pH και του διαλυμένου οξυγόνου.

Σε πειραματική διαδικασία που διεξήχθη δοκιμάστηκε η λειτουργία της δεξαμενής σε κύκλους οκτώ ωρών περιλαμβάνοντας και την φάση του γεμίματος. Ο χρόνος πραγματοποίησης των αντιδράσεων ήταν περίπου έξι ώρες, όπου όλες οι αντιδράσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα. Η μερική νιτροποίηση και η αναερόβια οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου έχουν σημαντική επίδραση στο pH. Η μερική νιτροποίηση κάνει το περιβάλλον της δεξαμενής πιο όξινο, ενώ η αναερόβια απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου το κάνει πιο βασικό. Η διάρκεια των διαστημάτων αερισμού καθορίζεται από τον έλεγχο του pH. Το σημείο λειτουργίας

της παροχής οξυγόνου ορίστηκε σε χαμηλές συγκεντρώσεις στα 0.3 mg/l με σκοπό να αναχαιτιστούν τα NOB βακτήρια και για να μην πραγματοποιηθεί η οξείδωση των νιτρωδών. Εκτός από τα παραπάνω στάδια ελέγχου οι επιτηρούμενες καταστάσεις (δυναμικότητα redox και ηλεκτρική αγωγιμότητα) και οι προγραμματισμένες δικλείδες ασφαλείας προστατεύουν το σύστημα από πιθανή αστοχία (Wett et. al., 2007).



Σχήμα 6: Σχέδιο ελέγχου της διαδικασίας DEMON- η επιλογή παραμέτρων στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, λαμβάνοντας υπόψη την αναστολή της αμμωνίας, την τοξικότητα των νιτρωδών και τον περιορισμό του ανόργανου άνθρακα (Wett et. al., 2007)

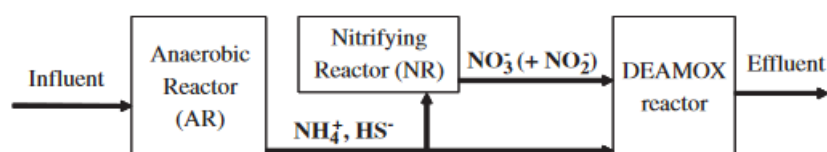
Σύστημα OLAND

Το σύστημα OLAND (Oxygen Limited Autotrophic Nitrification-Denitrification) είναι μια τεχνολογία που στοχεύει στην απομάκρυνση του αζώτου μέσω αυτοτροφικών διεργασιών, δηλαδή χωρίς κατανάλωση οργανικού άνθρακα. Έχει πολλές ομοιότητες με το σύστημα CANON και λειτουργεί σε χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου. Τα πλεονεκτήματα του σε σχέση με συμβατικά συστήματα απομάκρυνσης αζώτου (νιτροποίηση-απονιτροποίηση) είναι τα ίδια με του συστήματος CANON (Pynaert et. al., 2004).

Σύστημα DEAMOX

Τα προηγούμενα συστήματα που αναλύθηκαν απαιτούν αυστηρό έλεγχο κατά την πραγματοποίηση των διεργασιών και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι αρκετά κοστοβόρος. Συνεπώς, η υιοθέτησή τους από συμβατικές βιομηχανίες πολλές φορές είναι ασύμφορη. Ένα βασικό πρόβλημα για την πραγματοποίηση της αυτοτροφικής απομάκρυνσης του αζώτου είναι τα αρκετά τοξικά και αντιδραστικά νιτρώδη. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ο Mulder (2006) σχεδίασε ένα σύστημα με το όνομα DEAMOX (DEnitrifying AMmonium OXidation), το οποίο δεν

απαιτεί ξεχωριστή παραγωγή νιτρωδών και συνδυάζει την διεργασία αναμμοξ μαζί με την αυτοτροφική απονιτροποίηση χρησιμοποιώντας σουλφίδιο ως δότη ηλεκτρονίων για την παραγωγή νιτρωδών από τα νιτρικά μέσα σε ένα αναερόβιο βιοφίλμ. Οι διεργασίες περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:



Σχήμα 7: Διάγραμμα ροής του συστήματος DEAMOX για την επεξεργασία λυμάτων υψηλής φόρτισης (Kalyuzhnyi et.al., 2006)

Το σύστημα DEAMOX έχει ποικίλα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα άλλα συστήματα που λειτουργούν με αναμμοξ διεργασία. Αρχικά, δεν απαιτείται έλεγχος για την παραγωγή των νιτρωδών. Δεύτερον, οι συνθήκες απονιτροποίησης στον αντιδραστήρα DEAMOX ενισχύει την ανάπτυξη κόκκων διεγείροντας την διεργασία αναμμοξ (Mulder et al., 1995). Ακόμη ένα πλεονέκτημα αποτελεί η απουσία νιτρωδών τα οποία είναι τοξικά και αντιδραστικά για την ανάπτυξη των αναμμοξ βακτηρίων (Kalyuzhnyi et.al., 2006).

Σύστημα BABE

Το σύστημα BABE (Bio-Augmentation Batch Enhanced) είναι μια εφαρμογή που χρησιμοποιείται για την αυτοτροφική απομάκρυνση του αζώτου. Η λειτουργία του συστήματος στηρίζεται στην ανάπτυξη νιτροποιητών σε αντιδραστήρα που επεξεργάζεται την επανακυκλοφορούμενη ιλύ πριν αυτή επιστρέψει στο κυρίως σύστημα (Salem, 2005). Η διαδικασία της βιομεγένθυσης ενισχύει την απόδοση της ανοξικής απομάκρυνσης του αζώτου μέσω των βακτηρίων που αναπτύσσονται στην ιλύ. Επίσης, μειώνει σημαντικά τον χρόνο που απαιτείται για την πραγματοποίηση της μερικής νιτροποίησης.

Κεφάλαιο 3. Περιγραφή του Μοντέλου Προσομοίωσης

3.1. Εισαγωγή

Η προσομοίωση αποτελεί μία αναπαράσταση ενός φυσικού φαινομένου ή μιας διαδικασίας του φυσικού κόσμου μέσω ενός μοντέλου. Το μοντέλο που δημιουργείται αναπαριστά ένα σύνολο λογικών σχέσεων, οι οποίες καθορίζονται με κριτήριο την αντίληψη του εκάστοτε ερευνητή πάνω στο φαινόμενο που μελετάει. Για να είναι έγκυρο ένα μοντέλο προσομοίωσης είναι απαραίτητη η κατανόηση των σχέσεων αιτίου-αιτιατού της διεργασίας. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό είναι αναγκαία η συλλογή δεδομένων από πειράματα για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ενός μοντέλου είναι τα μαθηματικά, με τα οποία γίνεται η προσέγγιση του φαινομένου και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, ο οποίος με την χρήση του κατάλληλου λογισμικού παρέχει πολύ μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες που δίνουν την δυνατότητα να προσομοιώνονται πολύπλοκα συστήματα, όπως είναι και η λειτουργία μια Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων. Οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται δύνανται να είναι ντετερμινιστικές, το οποίο συμβαίνει όταν υπάρχει πλήρης κατανόηση αιτίου-αιτιατού ή όταν έχουν παραχθεί εμπειρικές σχέσεις από παρατηρήσεις που έχουν διεξαχθεί και από δεδομένα που έχουν συλλεχθεί. Όταν δεν είναι γνωστό τίποτα από τα παραπάνω και ο ερευνητής μπορεί να γνωρίζει μόνο τις βασικές αρχές που διέπουν ένα φαινόμενο, την λύση την δίνουν οι πιθανότητες και η δημιουργία στοχαστικών μοντέλων.

Όσον αφορά τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων η προσομοίωση μέσω μοντέλων προσφέρει σημαντικές δυνατότητες. Με την χρήση των μοντέλων προσομοίωσης γίνεται δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς και της λειτουργίας μίας ολόκληρης ΕΕΛ, που δεν είναι δυνατόν να διεξαχθεί σε εργαστηριακό επίπεδο είτε να μελετηθεί κατευθείαν στο πεδίο αφού θα πρέπει πρώτα να έχει κατασκευαστεί που σημαίνει πολύ μεγάλα κόστη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της λειτουργίας μίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων, στην οποία η απομάκρυνση του αζώτου γίνεται από τους αναερόβιους αυτοτροφικούς μικροοργανισμούς. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διατάξεις δεξαμενών για να συγκριθεί η επίδραση που θα έχουν στα αποτελέσματα. Στην πρώτη περίπτωση η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για ένα σύστημα SHARON-ANAMMOX και στην δεύτερη για το σύστημα Δεξαμενή Αερισμού-Δεξαμενή Τελικής Καθίζησης-Αναερόβια Δεξαμενή. Ο βασικός στόχος ήταν η μελέτη της ανάπτυξης των αναπνοχ βακτηρίων και της ικανότητας τους ως προς την απομάκρυνση αμμωνίας και νιτρωδών από το σύστημα.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μια τροποποίηση του μοντέλου ASM1 της IWA, το οποίο αναπτύχθηκε με σκοπό την ακριβή περιγραφή των διεργασιών που πραγματοποιούνται για την αναερόβια απομάκρυνση του αζώτου από τα

λύματα. Βασίστηκε στο μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία μιας ολόκληρης Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων. Στις επόμενες ενότητες ακολουθεί η περιγραφή του μοντέλου αυτού και στη συνέχεια οι τροποποιήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έτσι ώστε να προσομοιωθεί και η ανάπτυξη των μικροοργανισμών αναπνοχ.

3.2. Παρουσίαση Μοντέλου του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας

3.2.1. Συστατικά Βιοχημικού Μοντέλου

Σύμφωνα με την ονοματολογία της IAWQ τα συστατικά του μοντέλου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Με το γράμμα Χ συμβολίζονται τα σωματιδιακά και με το γράμμα S τα διαλυτά.

Στο αρχικό μοντέλο η βιομάζα χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες. Η ετεροτροφική βιομάζα ΧΒΗ είναι υπεύθυνη για την κατανάλωση οργανικού άνθρακα κατά την αερόβια και ανοξική ανάπτυξή της. Η αυτοτροφική βιομάζα διακρίνεται στα ΧΑΟΒ, τα οποία είναι υπεύθυνα για την οξείδωση της αμμωνίας και την παραγωγή νιτρωδών και στα ΧΝΟΒ, τα οποία οξειδώνουν των νιτρώδη σε νιτρικά. Ο οργανικός άνθρακας εκφράζεται σε μονάδες COD (μονάδες χημικής ζήτησης οξυγόνου) και αποτελείται από την Αδρανή Διαλυμένη Οργανική Ύλη (SI), την Αδρανή Σωματιδιακή Οργανική Ύλη (XI), την Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη (XS), την Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη (SS) και τα Αδρανή Οργανικά προϊόντα φθοράς (XP).

Οι μορφές αζώτου που περιλαμβάνονται στο μοντέλο είναι οι βασικές που απαιτούνται για την περιγραφή των διεργασιών της νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Έτσι διακρίνονται οι εξής μορφές αζώτου: αμμωνία (SNH), νιτρώδη (SNO₂), νιτρικά (SNO₃), υδροξυλαμίνη (SNH₂OH), υποξειδίο του αζώτου (SN₂O), αέριο άζωτο (SN₂), ανόργανη σωματιδιακή ύλη (XNV) και μονοξειδίο του άζωτο (SNO).

Αδρανής διαλυμένη οργανική ύλη (SI)

Η διαλυμένη οργανική ύλη δεν παράγεται ούτε καταναλώνεται στο σύστημα επεξεργασίας, δηλαδή η συγκεντρωση με την οποία εισέρχεται είναι και αυτή με την οποία γίνεται η εκροή. Αποτελεί τμήμα του συνολικού COD και πρέπει να προσμετράται.

Αδρανής αιωρούμενη οργανική ύλη (XI)

Σε αναλογία με την αδρανή διαλυμένη οργανική ύλη θα αναμένονταν και η αδρανής αιωρούμενη οργανική ύλη να μην παράγεται ούτε να καταναλώνεται στο σύστημα. Παρόλα αυτά, αυτό δεν συμβαίνει καθώς κατά την επεξεργασία των λυμάτων

προστίθονται στην αρχική συγκέντρωση του ΧΙ τα σωματιδιακά προϊόντα που παράγονται από την φθορά των μικροοργανισμών και στο μοντέλο ASM1 αναφέρεται ως Χρ.

Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (SS)

Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί κατά την αερόβια και ανοξική ανάπτυξή τους καταναλώνουν την εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη. Το ίδιο συμβαίνει κατά την απονιτροποίηση. Η εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη παράγεται μέσω της υδρόλυσης από την δύσκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη.

Δύσκολα Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη (XS)

Αυτό το μέρος της οργανικής ύλης είναι σωματιδιακό και σε αυτήν την μορφή δε μπορεί να καταναλωθεί από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Μέσω εξωκυτταρικών δράσεων οι ενώσεις μεγαλύτερου σωματιδιακού βάρους διαλύονται και παίρνουν την κατάλληλη μορφή για να καταναλωθούν από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Ένα μέρος της συγκέντρωσης της δύσκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης προέρχεται από την φθορά των μικροοργανισμών.

Ετεροτροφική Βιομάζα (XBH)

Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί αναπτύσσονται με την κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης, μέσω της αερόβιας και ανοξικής ανάπτυξης. Η συγκέντρωσή τους μειώνεται με την φθορά που υφίστανται. Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί είναι χημικοσυνθετικοί, επειδή για την παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιούν χημικές ενώσεις. Επίσης, είναι οργανοτροφικοί καθώς χρησιμοποιούν οργανικό άνθρακα κατά τον αναβολισμό τους. Την ενέργεια που δεσμεύουν την χρησιμοποιούν για παραγωγή βιομάζας και για τις λειτουργίες των κυττάρων τους. Η συγκέντρωση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών εξαρτάται από την ταχύτητα ανάπτυξης της πιο ευνοούμενης ομάδας μικροοργανισμών, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην δεξαμενή και από την ταχύτητα της φθοράς των κυττάρων τους.

Αμμωνιακά Οξειδωτικά Βακτήρια (XAOB)

Τα αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια (AOB) αναπτύσσονται υπό αερόβιες συνθήκες και προκαλούν την οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη (νιτρωδοποίηση). Είναι χημικοτροφικοί λιθοτροφικοί μικροοργανισμοί καθώς καταναλώνουν χημικές ενώσεις για την ενέργεια τους, αλλά δε χρειάζονται οργανικό άνθρακα. Στο αρχικό μοντέλο ASM1 η αυτοτροφική βιομάζα δε χωριζόταν σε επιμέρους ομάδες μικροοργανισμών και η νιτροποίηση παρουσιάζοταν σε ένα στάδιο. Στο τροποποιημένο μοντέλο του εργαστηρίου της Υγειονομικής Τεχνολογίας η διεργασία την νιτροποίησης περιγράφεται με περισσότερη λεπτομέρεια για να

εξεταστεί ακριβέστερα η συμπεριφορά του αζώτου στις διάφορες μορφές του κατά την επεξεργασία των λυμάτων. Τα AOB βακτήρια προσμετρώνται στην συνολική ποσότητα του COD και είναι θεωρούνται σωματιδιακά συστατικά του συστήματος.

Νιτρικά Οξειδωτικά Βακτήρια (XNOB)

Τα νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια (NOB) αποτελούν μέρος του συνολικού COD και θεωρούνται σωματαδιακά. Αναπτύσσονται σε αερόβιες συνθήκες κατά το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης, όπου οξειδώνουν τα νιτρώδη σε νιτρικά. Η συγκέντρωσή τους μειώνεται από την φθορά των κυττάρων τους. Όπως και τα AOB έτσι και τα NOB είναι χημικοτροφικοί και λιθοτροφικοί μικροοργανισμοί.

Ανόργανη Σωματιδιακή Ύλη (XNV)

Οι ανόργανες ενώσεις δεν συμμετέχουν σε κάποια διεργασία στους βιολογικούς αντιδραστήρες. Άρα, απομακρύνονται από το σύστημα, μέσω της απομάκρυνσης στην δεξαμενή καθίζησης. Η συμπεριφορά τους είναι όμοια με αυτή της αδρανούς αιωρούμενης οργανικής ύλης.

Διαλυμένο Οξυγόνο (SO)

Το διαλυμένο οξυγόνο είναι μια πολύ σημαντική μεταβλητή του μοντέλου, καθώς επηρεάζει ένα μεγάλο μέρος των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στους βιολογικούς αντιδραστήρες. Το οξυγόνο αποτελεί έναν πολύ καλό δέκτη ηλεκτρονίων, επειδή το οξειδοαναγωγικό του δυναμικό είναι πολύ υψηλό και βρίσκεται πολύ χαμηλά στον πύργο των ηλεκτρονίων. Τα ανεπεξέργαστα λύματα διαμορφώνουν ένα αναερόβιο περιβάλλον, καθώς κατέχουν μεγάλες ποσότητες οργανικού άνθρακα και δεν ευνοείται η παραμονή κάποιας του οξυγόνου. Έτσι για να πραγματοποιηθούν αερόβιες διεργασίες πρέπει το οξυγόνο να παροχετεύεται στην δεξαμενή από εξωτερική πηγή (αντλία αερισμού).

Υποξείδιο του Αζώτου (SN₂O)

Το υποξείδιο του αζώτου αποτελεί μια μορφή αζώτου που συναντάται το στα λύματα, αφού έχουν υποστεί επεξεργασία. Παράγεται μέσω της διαδικασίας της χημικής διάσπασης, όπου το νιτροξύλιο μετατρέπεται σε νιτρικό άζωτο και στη συνέχεια σε υποξείδιο του αζώτου. Επιπλέον, παράγεται κατά την νιτροποίηση των νιτροποιητών, όπου η αμμωνία για να μετατραπεί σε νιτρώδη από τα AOB, παράγεται και υποξείδιο του αζώτου. Ακόμα μια διεργασία που αυξάνει την συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου είναι η απονιτροποίηση των νιτροποιητών η οποία συμβαίνει σε ανοξικές συνθήκες και καταναλώνει νιτρικά.

Αμμωνιακό Άζωτο (SNH)

Το αμμωνιακό άζωτο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στις διεργασίες που μελετάει το μοντέλο. Παρακάτω που θα παρουσιαστεί το καινούριο μοντέλο που παράχθηκε από αυτό η μικρή συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου, θα προκαλούσε την πολύ μικρή απομάκρυνση αζώτου από το σύστημα. Όσον αφορά τα ανεπεξέργαστα αστικά λύματα το αμμωνιακό άζωτο είναι συνήθως η κυρίαρχη μορφή αζώτου. Η αμμωνία καταναλώνεται μέσω της νιτροποίησης και παράγεται μέσω της διαδικασίας της αμμωνιοποίησης που προκαλείται από ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς είτε σε αερόβιες ή σε ανοξικές συνθήκες.

Νιτρικό Άζωτο (SNO)

Το νιτρικό άζωτο αποτελεί άλλη μια μορφή αζώτου που ανιχνεύεται στα επεξεργασμένα λύματα. Παράγεται μέσω της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης και μέσω της αντίδρασης των νιτρωδών με το ένζυμο της νιτρώδους αναγωγής. Η κατανάλωσή του γίνεται μέσω της απονιτροποίησης των νιτροποιητών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Νιτρώδη (SNO₂)

Τα νιτρώδη αποτελούν μια από τις σημαντικότερες μορφές αζώτου σύμφωνα με τις μελέτες που επικεντρώνονται στην απομάκρυνσή του. Παράγεται κατά το πρώτο στάδιο της νιτροποίησης σε αερόβιες συνθήκες από τα AOB και καταναλώνεται από το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης, όπου μετατρέπεται σε νιτρικά από τα NOB ή από την απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών σε ανοξικές συνθήκες.

Νιτρικά (SNO₃)

Τα νιτρικά παράγονται στο δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης σε αερόβιες συνθήκες από τα NOB και καταναλώνονται σε ανοξικές συνθήκες από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς.

Υδροξυλαμίνη (SNH₂OH)

Η υδροξυλαμίνη αποτελεί και αυτή μια από τις αζωτούχες ενώσεις που βρίσκονται στα επεξεργασμένα αστικά λύματα. Παράγεται μέσω της οξείδωσης της αμμωνίας, κατά την διαδικασία της νιτρωδοποίησης της οποίας αποτελεί ενδιάμεσο στάδιο. Η κατανάλωσή της γίνεται μέσω της ολοκλήρωσης της διεργασίας της νιτρωδοποίησης, όπου μετατρέπεται σε νιτρώδη.

Αέριο Άζωτο (SN₂)

Το αέριο άζωτο είναι η μορφή του αζώτου στην οποία στοχεύει η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων να μετατρέψει ένα σημαντικό μέρος του αζώτου που

περιέχεται στα λύματα, ώστε να διαφύγει από το υγρό διάλυμα και να διοχετευτεί στην ατμόσφαιρα. Παράγεται μέσω της αντίδρασης του υποξειδίου του αζώτου με το ένζυμο της αναγωγής του υποξειδίου του αζώτου.

Αλκαλικότητα (SALK)

Η αλκαλικότητα των λυμάτων ουσιαστικά διαδραματίζει τον ρόλο της ένδειξης της κατάστασης του pH και σε ακραίες συνθήκες δύναται να αναστείλει την πραγματοποίηση διεργασιών στους βιολογικούς αντιδραστήρες, με τους μηχανισμούς που παρουσιάστηκαν στον Κεφάλαιο 2.

Φωσφορικά (SPO4)

Οι ενώσεις φωσφόρου στο σύστημα παράγονται μέσω της αποσύνθεσης των μικροοργανισμών και καταναλώνονται μέσω της ανάπτυξής τους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η συμπεριφορά του φωσφόρου αγνοήθηκε.

Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS)

Τα πτητικά αιωρούμενα στερεά ουσιαστικά αποτελούνται από τα οργανικά στερεά που υπάρχουν στο σύστημα. Οι συγκεντρώσεις των οργανικών στερεών εκφράζονται ως COD/m³ και για να μετατραπούν σε VSS πρέπει να πραγματοποιηθεί η διαίρεση τους με το 1.42 COD/gr. Δηλαδή η σχέση που εκφράζει τα VSS είναι η εξής:

$$VSS = (XBH + XAOB + XNOB + XI + XS) / 1.42 \text{ (gr VSS/m}^3\text{)}$$

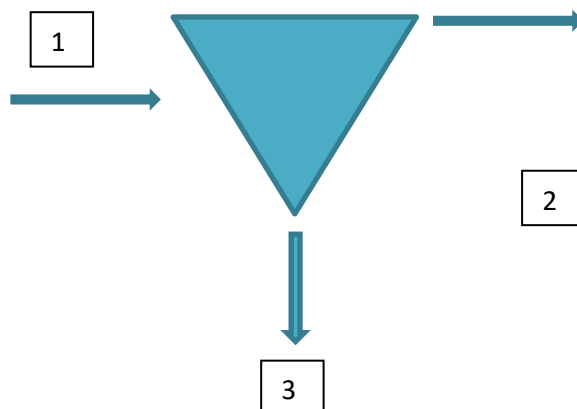
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Τα ολικά αιωρούμενα στερεά αποτελούν το άθροισμα των πτητικών στερεών του συστήματος με τα ανόργανα στερεά. Η σχέση που τα εκφράζει είναι η εξής:

$$TSS = VSS + XNV \text{ (gr SS/m}^3\text{)}$$

3.2.2. Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης

Η Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ) προηγείται της βιολογικής επεξεργασίας και επηρεάζει με την λειτουργία της την απόδοση των κινητικών διεργασιών. Στην προσομοίωση ορίζεται ένα ποσοστό απομάκρυνσης των στερεών, το οποίο συμβολίζεται στο μοντέλο ως s_r . Οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων συστατικών δεν επηρεάζονται στην ΔΠΚ και το ποσοστό απομάκρυνσης αφορά τα σωματιδιακά στερεά. Στο παρακάτω σκαρίφημα παρουσιάζεται η αναπαράσταση της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης.



Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση της Δεξαμενής Πρωτοβάθμιας Καθίζησης

Στην θέση 3 συλλέγεται η πρωτοβάθμια ιλύς, η οποία απομακρύνεται από το πρωτεύον σύστημα επεξεργασίας και οδηγείται στην επεξεργασία της ιλύος. Η ποσότητα που απομακρύνεται είναι $\frac{S_r * X}{100}$, όπου X είναι η συνολική ποσότητα των στερεών που εισέρχονται στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης. Για παράδειγμα το ισοζύγιο μάζας για τα ολικά αιωρούμενα στερεά είναι:

$$M_{TSS}(3) = \frac{S_r * M_{TSS}(1)}{100}$$

Αντίστοιχα το ίδιο ισχύει και για όλα τα σωματιδιακά στερεά που εισέρχονται στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης.

$$M_X(3) = \frac{S_r * M_X(1)}{100}$$

Για τον καθορισμό της παροχής είναι απαραίτητος ο ορισμός της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στην ιλύ. Στο μοντέλο προσομοίωσης του εργαστηρίου της Υγειονομικής Τεχνολογίας το $TSS(3) = 1.5 \%$ ή 15 kg/m^3 . Συνεπώς η παροχή στην θέση 3 προκύπτει ως εξής:

$$Q(3) = \frac{M_{TSS}(3)}{TSS(3)}$$

Η συγκέντρωση των σωματιδιακών στερεών στην θέση 3 τελικά υπολογίζεται από σχέσεις σαν του παραδείγματος των TSS.

$$TSS(3) = \frac{M_{TSS}(3)}{Q(3)}$$

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των διαλυμένων στερεών στην θέση 3 ισχύει ότι

$$S(3) = S(1)$$

$$M_S(3) = S(3) * Q(3)$$

Η θέση 2 αναπαριστά την υπερχειλίση της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης και από εκεί τα λύματα οδηγούνται για την βιοχημική επεξεργασία. Η παροχή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q(2) = Q(1) - Q(3)$$

Η μάζα και η συγκέντρωση των σωματιδιακών συστατικών υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$M_X(2) = M_X(1) - M_X(3)$$

$$X(2) = \frac{M_X(2)}{Q(2)}$$

Για τις διαλυμένες μεταβλητές ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις με την θέση 3.

3.2.3. Βιοχημικές Διεργασίες Μοντέλου

Στο μαθηματικό μοντέλο του εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας προσομοιώνονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους βιολογικούς αντιδραστήρες. Οι βιοαντιδραστήρες αποτελούνται από μια αναερόβια δεξαμενή, όπου γίνεται η επεξεργασία του φωσφόρου, μία ανοξική δεξαμενή για την επεξεργασία και την απομάκρυνση του αζώτου και μία αερόβια δεξαμενή στην οποία παρέχεται οξυγόνο για να πραγματοποιηθούν οι αερόβιες διεργασίες και είναι χωρισμένη σε τμήματα. Το μοντέλο έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η μέγιστη διαμερισματοποίηση της αερόβιας δεξαμενής να είναι 10 διαφορετικά τμήματα. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στις δεξαμενές επεξεργασίας μοντελοποιούνται μέσω μαθηματικών εξισώσεων, που ονομάζονται κινητικές και κάθε μία από αυτές περιγράφει μια φυσική διεργασία που συμβαίνει στο σύστημα. Το γινόμενο των κινητικών εξισώσεων με τις αντίστοιχες στοιχειομετρικές παραμέτρους για κάθε μεταβλητή δείχνει την μεταβολή που υφίσταται η τιμή της μεταβλητής από την κάθε διεργασία, που την επηρεάζει.

Αερόβια Υδρόλυση

Κατά την αερόβια υδρόλυση η αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη μετατρέπεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη, μέσω εξωκυτταρικής δράσης, την οποία μπορούν να

καταναλώσουν οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί. Από την αερόβια υδρόλυση απελευθερώνεται και μια ποσότητα αμμωνίας. Ο ρυθμός της διεργασίας παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$r_1 = k_h * \frac{S_o}{K_{oh} + S_o} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$$

Στην κινητική εξίσωση φαίνεται ότι οι περιοριστικοί παράμετροι είναι η διαθεσιμότητα του οξυγόνου και ο λόγος της αργά βιοδιασπώμενης οργανικής ύλης προς τους διαθέσιμους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς.

Ανοξική Υδρόλυση

Αντίστοιχα με την αερόβια η υδρόλυση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης πραγματοποιείται και σε ανοξικές συνθήκες. Η διεργασία γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς το οποίο εκφράζεται με τους συντελεστές n_{NO3H} και . Για την πραγματοποίηση της διεργασίας είναι απαραίτητη η παρουσία νιτρωδών ή νιτρικών στην δεξαμενή, όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$r_2 = k_h * n_{NO3H} * \frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * \frac{S_{NO3}}{K_{NO3} + S_{NO3}} * X_{BH}$$

$$r_3 = k_h * n_{NO2H} * \frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} * \frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$$

Όπως φαίνεται οι περιοριστική παράγοντες της ανοξικής υδρόλυσης είναι η παρουσία οξυγόνου, η παρουσία νιτρικών ή νιτρωδών και ο λόγος της αργά βιοδιασπώσιμης οργανικής ύλης προς την ετεροτροφική βιομάζα.

Αναερόβια Υδρόλυση

Η διεργασία της υδρόλυσης πραγματοποιείται κάτω και από αερόβιες συνθήκες και ο ρυθμός της είναι ακόμα πιο μικρός και δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$r_4 = k_h * n_{fe} * \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} * \frac{K_{NO2}}{S_{NO2} + S_{NO3} + K_{NO2}} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$$

Αερόβια Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών

Κατά την αερόβια ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας καταναλώνεται ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας, με το οξυγόνο να διαδραματίζει το ρόλο του δέκτη ηλεκτρονίων. Η κινητική εξίσωση της αερόβιας ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας είναι η εξής:

$$r_5 = m_h * \frac{S_O}{S_O + K_{oh}} * \frac{S_S}{K_S + S_S} * \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_{BH}$$

Από την εξίσωση φαίνεται ότι οι περιοριστικοί παράγοντες την αερόβιας ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, των εύκολα βιοδιασπασμων οργανικών στερεών, της αμμωνίας και της αλκαλικότητας των λυμάτων. Η αλκαλικότητα για τα συνήθη αστικά λύματα δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την πραγματοποίηση της διεργασίας. Παρόλο αυτά, στο μοντέλο λαμβάνεται υπόψη για να μπορεί να προσομοιωθεί η περίπτωση που το περιβάλλον της αερόβιας δεξαμενής έχει τιμές pH, οι οποίες δεν επιτρέπουν την πραγματοποίηση της αντίδρασης.

Απονιτροποίηση Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών

Η πραγματοποίηση της απονιτροποίησης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών απαιτεί ανοξικές συνθήκες και την παρουσία οργανικού άνθρακα, αμμωνίας και νιτρικών.

$$r_6 = m_h * n_{NO3D} * \frac{K_{oh}}{S_O + K_{oh}} * \frac{S_{NO3}}{K_{NO3} + S_{NO3}} * \frac{S_S}{K_S + S_S} * \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_{BH}$$

Οι σπουδαιότεροι περιοριστικοί παράγοντες της συγκεκριμένης κινητικής εξίσωσης είναι η παρουσία του οξυγόνου και η συγκέντρωση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα.

Ανοξική Ανάπτυξη των Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών

Η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Συνεπώς, έχουν αναπτυχθεί τρεις κινητικές εξισώσεις για την περιγραφή της ανάπτυξής τους.

Στην πρώτη αντίδραση τα νιτρώδη μετατρέπονται σε νιτρικό άζωτο με το ένζυμο της νιτρώδους αναγωγής. Στη δεύτερη το νιτρικό άζωτο μετατρέπεται σε υποξείδιο του αζώτου με το ένζυμο της νιτρικής οξειδοαναγωγής. Στην τρίτη το υποξείδιο του αζώτου μετατρέπεται σε αέριο άζωτο με το ένζυμο της αναγωγής του υποξειδίου του αζώτου. Οι ρυθμοί των αντιδράσεων δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$r_7 = m_h * n_{G3} * \frac{K_{oh3}}{K_{oh3} + S_O} * \frac{S_{NO2}}{K_{NO2D} + S_{NO2}} * \frac{S_S}{K_{S3} + S_S} * \frac{k_{i3NO}}{k_{i3NO} + S_{NO}} * X_{BH}$$

Το οξυγόνο αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Επίσης, η διαθεσιμότητα του διαλυμένου οργανικού άνθρακα παίζει σημαντικό ρόλο. Από την εξίσωση γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η συγκέντρωση σε νιτρικό άζωτο η διαδικασία γίνεται όλο και πιο αργή.

$$r_8 = m_h * n_{G4} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOD} + \left(\frac{S_{NO}^2}{K_{i4NO}}\right)} * \frac{K_{oh4}}{K_{oh4} + S_O} * \frac{S_S}{K_{S4} + S_S} * X_{BH}$$

Σε αυτό το στάδιο της ανάπτυξης η έλλειψη νιτρικού αζώτου αποτελεί περιοριστικό παράγοντα μαζί με την παρουσία οξυγόνου και την έλλειψη της εύκολα βιοσπασίσιμης οργανικής ύλης.

$$r_9 = m_h * n_{G5} * \frac{S_S}{S_S + K_{S5}} * \frac{S_{N2O}}{K_{N2OD} + S_{N2O}} * \frac{K_{oh5}}{S_O + K_{oh5}} * \frac{K_{i5NO}}{K_{i5NO} + S_{NO}} * X_{BH}$$

Αντίστοιχα σε αυτή την περίπτωση η κινητική έχει ως περιοριστικό παράγοντα την συγκέντρωση της εύκολα βιοδιασπασίσιμης οργανικής ύλης και την παρουσία οξυγόνου. Επίσης, χρειάζεται υποξείδιο του αζώτου.

Αποσύνθεση Ετεροτροφικής Βιομάζας

Όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής των ετεροτροφικών μικροοργανισμών μειώνεται η καθαρή παραγωγή ιλύος. Αυτό οφείλεται σε διάφορες αιτίες όπως η λύση και η ανάγκη των μικροοργανισμών για συντηρούμενη ενέργεια. Στην προσομοίωση του μοντέλου για λόγους απλότητας έχει επιλεγεί η φθορά των μικροοργανισμών να περιγράφεται από έναν σταθερό συντελεστή, ο οποίος δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στο περιβάλλον. Η αποσύνθεση έχει ως προϊόν την παραγωγή αργά βιοδιασπασίσιμης οργανικής ύλης και αδρανή σωματιδιακά προϊόντα. Ακόμη, εκλύονται αμμωνία και φώσφορος στα λύματα.

$$r_{10} = b_h * X_{BH}$$

Οξείδωση Αμμωνίας σε Υδροξυλαμίνη

Η οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη αποτελεί το πρώτο στάδιο της διαδικασίας της νιτρωδοποίησης. Η αμμωνία μετατρέπεται σε υδροξυλαμίνη με την

βοήθεια του ενζύμου της, την μονοοξυγενάση (AMO). Στην παρακάτω εξίσωση φαίνεται ο ρυθμός της εξίσωσης:

$$r_{11} = q_{AOBAMO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob1}} * \frac{S_{NH}}{K_{NH AOB} + S_{NH}} * X_{AOB}$$

Οξείδωση Υδροξυλαμίνης σε Νιτρικό Άζωτο

Η υδροξυλαμίνη οξειδώνεται σε νιτρικό άζωτο από το περιπλασματικό ένζυμο της υδροξυλαμίνης (HAO). Για την πραγματοποίηση της διεργασίας καταναλώνεται αμμωνία και είναι απαραίτητη η ύπαρξη οξυγόνου. Κατά την πραγματοποίηση της διεργασίας αναπτύσσονται τα AOB όπως και στην προηγούμενη διεργασία.

$$r_{12} = m_{AOBH AO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob2}} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + 10^{-12}} * X_{AOB}$$

Οξείδωση Νιτρικού Οξειδίου σε Νιτρώδη

Το νιτρικό άζωτο που παράγεται από την προηγούμενη διεργασία οξειδώνεται σε νιτρώδη από τα AOB, με το ίδιο ένζυμο της υδροξυλαμίνης.

$$r_{13} = q_{AOBH AO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob2}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOAOBH AO}} * X_{AOB}$$

Αναγωγή του Νιτρικού Οξειδίου σε Υποξείδιο του Αζώτου

Το νιτρικό άζωτο δύναται να μετατραπεί σε υποξείδιο του αζώτου μέσω της νιτρικής οξειδωαναγωγής (Nor). Η διεργασία ονομάζεται νιτροποίηση των νιτροποιητών

$$r_{14} = q_{AOBN2ONN} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOaobNN}} * X_{AOB}$$

Αναγωγή του Νιτρώδους Οξέος (HNO₂) σε Υποξείδιο του Αζώτου

Τα νιτρώδη αναγώνται σε νιτρικό άζωτο μέσω του ενζύμου της νιτρικής αναγωγής (NirK) και στην συνέχεια ανάγονται σε υποξείδιο του αζώτου μέσω της νιτρικής οξειδωαναγωγής.

$$fS_O = \frac{S_O}{K_{ohaobND} + 1.0 - 2.0 * \sqrt{\frac{K_{ohaobND}}{K_{iohaob}}}} * \left(S_O + \frac{S_O^2}{K_{iohaob}} \right)$$

$$K_a = e^{-\frac{2300}{273+t}}$$

$$S_{HNO2} = \frac{S_{NO2}}{K_a * 10^{pH} + 1.0} * \frac{47}{14}$$

$$r_{15} = q_{aobN2OND} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{HNO2}}{S_{HNO2} + K_{hNO2aob}} * fS_O * X_{AOB}$$

Αερόβια Ανάπτυξη των Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτηρίων

Η αερόβια ανάπτυξη των NOB πραγματοποιείται με την ολοκλήρωση της διεργασίας της νιτροποίησης. Η διεργασία επηρεάζεται από την συγκέντρωση των νιτρωδών και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην μείωση του οξυγόνου.

$$r_{16} = m_{NOB} * \frac{S_O}{k_{ohnob} + S_O} * \frac{S_{NO2}}{K_{NO2nob} + S_{NO2}} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALKnob}} * X_{NOB}$$

Αποσύνθεση Νιτρικών και Αυτοτροφικών Βακτηρίων

Αντίστοιχα με την αποσύνθεση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών έχουν τεθεί σταθερές ανεξάρτητες του περιβάλλοντος για την φθορά των AOB και NOB, όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις.

$$r_{17} = b_{AOB} * X_{AOB}$$

$$r_{18} = b_{NOB} * X_{NOB}$$

Οι κινητικές εξισώσεις περιγράφουν τον ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιούνται οι διεργασίες της κάθε δεξαμενής. Η μεταβολή της συγκέντρωσης των μεταβλητών που μελετούνται προκύπτει από το γινόμενο του ρυθμού των κινητικών με την στοιχειομετρική παράμετρο κάθε μεταβλητής που συμμετέχει στην κινητική εξίσωση. Αρνητική μεταβολή σημαίνει ότι η συγκέντρωση του στοιχείου μειώνεται ενώ θετική μεταβολή σημαίνει ότι αυξάνεται.

Αδρανής Διαλυμένη Οργανική Ύλη (SI)

Η αδρανής διαλυμένη οργανική ύλη δεν συμμετέχει σε καμία διεργασία και παραμένει σταθερή, καθώς δεν παράγεται καινούρια ύλη κατά την υδρόλυση.

$$DS_I(k) = \left((Q(k-1) * S_I(k-1) - Q(k) * S_I(k)) + fS_I * V_k * (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) \right) * dt/V(k)$$

Το fS_I ισούται με μηδέν για να προσομοιωθεί το γεγονός ότι δεν παράγεται διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη κατά την υδρόλυση. Το k και το j είναι δείκτες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Το k αναφέρεται στην θέση μέσα στην προσομοιούμενη Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων που εξετάζεται και το j

παίρνει τιμές ανάλογα με την χρονική στιγμή που εξετάζεται. Η νέα συγκέντρωση υπολογίζεται ως εξής:

$$S_I(k) = S_I(k) + DS_{I(k)}$$

Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη (SS)

Η εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη καταναλώνεται στο σύστημα από την αερόβια και ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών και κατά την διεργασία της απονιτροποίησης. Στους βιολογικούς αντιδραστήρες πραγματοποιείται και παραγωγή της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης, μέσω της υδρόλυσης.

$$DS_S(k) = ((Q(k-1) * S_S(k-1) - Q(k) * S_S(k)) + (1 - f_{S_I}) * V_k * (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) - \frac{1}{Y_h} * V_k * r_5 - \frac{1}{Y_h * n_g} * V_k * (r_6 + r_7 + r_8 + r_9) * d_j / V_k$$

$$S_S(k) = S_S(k) + DS_S(k)$$

Αδρανής Αιωρούμενη Οργανική Ύλη (XI)

Η αδρανής αιωρούμενη οργανική ύλη είναι ένα κομμάτι της ύλης, το οποίο δεν συμμετέχει στις διεργασίες. Η συγκέντρωσή της αυξάνεται με την φθορά των μικροοργανισμών.

$$DX_I(k) = ((Q(k-1) * X_I(k-1) - Q(k) * X_I(k-1)) + f_p * V_k * (r_{10} + r_{17} + r_{18})) * d_j / V_k$$

$$X_I(k) = X_I(k) + DX_I(k)$$

Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη (XS)

Η συγκέντρωση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης αυξάνεται μέσω της φθοράς της βιομάζας των μικροοργανισμών και μειώνεται, λόγω της υδρόλυσης και μετατρέπεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη

$$DX_S(k) = ((Q(k-1) * X_S(k-1) - Q(k) * X_S(k)) - 1 * V_k * (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + (1 - f_p) * (r_{10} + r_{17} + r_{18})) * d_j / V(k)$$

$$X_S(k) = X_S(k) + DX_S(k)$$

Ετεροτροφική Βιομάζα (XBH)

Η ετεροτροφική βιομάζα παράγεται σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες και καταναλώνεται μέσω της φθοράς των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

$$DX_{BH}(k) = ((Q(k-1) * X_{BH}(k-1) - Q(k) * X_{BH}(k)) + 1 * V_k * (r_5 + r_6 + r_7 + r_8) - 1 * V_k * r_{10}) * d_j / V_k$$

$$X_{BH}(k) = X_{BH}(k) + DX_{BH}(k)$$

Αυτοτροφικά Οξειδωτικά Βακτήρια (XAOB)

Τα αυτοτροφικά οξειδωτικά βακτήρια αναπτύσσονται υπό αερόβιες συνθήκες μέσω της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε νιτρικό άζωτο και καταναλώνονται μέσω της φθοράς τους.

$$DX_{AOB}(k) = \left((Q(k-1) * X_{AOB}(k-1) - Q(k) * X_{AOB}(k)) + 1 * V_k * r_{12} - 1 * V_k * r_{17} \right) * d_j / V_k$$

$$X_{AOB}(k) = X_{AOB}(k) + DX_{AOB}$$

Νιτρικά Οξειδωτικά Βακτήρια (XNOB)

Τα νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια παράγονται σε αερόβιες συνθήκες κατά την διεργασία της νιτροποίησης, όπου τα νιτρώδη μετατρέπονται σε νιτρικά και καταναλώνονται μέσω της αποσύνθεσης.

$$DX_{NOB}(k) = \left((Q(k-1) * X_{NOB}(k-1) - Q(k) * X_{NOB}(k)) + 1 * r_{16}(k) * V_k - 1 * V_k * r_{18} \right) * d_j / V_k$$

$$X_{NOB}(k) = X_{NOB}(k) + DX_{NOB}(k)$$

Ανόργανη Σωματιδιακή Ύλη (XNV)

Η ανόργανη σωματιδιακή ύλη δεν συμμετέχει σε κάποια διεργασία και δεν παράγεται κάποια επιπρόσθετη ποσότητα κατά την επεξεργασία των λυμάτων.

$$DX_{NV}(k) = \left((Q(k-1) * X_{NV}(k-1) - Q(k) * X_{NV}(k)) \right) * d_j / V_k$$

$$X_{NV}(k) = X_{NV}(k) + DX_{NV}(k)$$

Διαλυμένο Οξυγόνο (SO)

Το διαλυμένο οξυγόνο καταναλώνεται από τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην αερόβια δεξαμενή και προστίθεται στην δεξαμενή από εξωτερική πηγή (αντλία οξυγόνου).

$$DS_o(k) = \left((Q(k-1) * S_o(k-1) - Q(k) * S_o(k)) - \frac{1-Y_h}{Y_h} * V_k * r_5(k) - \frac{8}{7} * V_k * r_{11}(k) - \frac{12-Y_{AOB}}{Y_{AOB}} * V_k * r_{12}(k) - \frac{4}{7} * V_k * r_{13}(k) - \frac{8-Y_{NOB}}{Y_{NOB}} * V_k * r_{16}(k) \right) * d_j / V_k$$

$$S_o(k) = S_o(k) + DS_o(k)$$

Οι συντελεστές 8/7, 12/7 και 4/7 εκφράζουν την θεωρητική απαίτηση οξυγόνου για την πραγματοποίηση των αντίστοιχων αντιδράσεων. Στο μοντέλο η συγκέντρωση του παρεχόμενου οξυγόνου μπορεί να τεθεί για κάθε διαμέρισμα ξεχωριστά.

Υποξείδιο του Αζώτου (SN2O)

Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται κατά την διαδικασία μετατροπής του νιτροξυλίου σε νιτρικό άζωτο και έπειτα σε υποξείδιο του αζώτου. Επίσης η παραγωγή του γίνεται μέσω χημικής διάσπασης. Κατά την νιτροποίηση των νιτροποιητών η παραγωγή υποξειδίου του αζώτου αποτελεί ενδιάμεσο στάδιο της μετατροπής της αμμωνίας σε νιτρώδη. Το υποξείδιο του αζώτου καταναλώνεται για την παραγωγή αέριου αζώτου. Σύμφωνα με τους (Baeza et. al. 2017) ένα μέρος της συγκέντρωσης του αζώτου μετατρέπεται σε αέριο άζωτο υπό αερόβιες συνθήκες.

$$DS_{N2O}(k) = ((Q(k-1) * S_{N2O} - Q(k) * S_{N2O}(k)) + \frac{1-Y_h * n_g}{Y_h * n_g * \frac{4}{7}} * V_k (r_8(k) - r_9(k)) + 4 * V_k * r_{14}(k) + 2 * V_k * r_{15}(k)) * \frac{d_j}{V_k} - 0.91 * KLA(k) * S_{N2O}(k) * N2OSE * d_j$$

$$S_{N2O}(k) = S_{N2O}(k) * DS_{N2O}(k)$$

Νιτρικό Άζωτο (SNO)

Το νιτρικό άζωτο παράγεται από την οξείδωση της υδροξυλαμίνης και μέσω της αντίδρασης των νιτρωδών με το ένζυμο της νιτρώδους αναγωγής. Η κατανάλωσή του γίνεται με χημική διασπά, όπου το νιτροξύλιο μετατρέπεται σε νιτρικό άζωτο και στην συνέχεια σε υποξείδιο του αζώτου. Επίσης νιτρικό άζωτο παράγεται κατά την διαδικασία της νιτροποίησης των νιτροποιητών.

$$DS_{NO}(k) = \left((Q(k-1) * S_{NO}(k-1) * Q(k) * S_{NO}(k)) + \frac{1-Y_h * n_g}{Y_h * n_g * \frac{4}{7}} * V_k * (r_7(k) - r_8(k)) + \frac{1}{Y_{AOB}} * V_k * r_{12}(k) - 4 * V_k * r_{14}(k) - V_k * r_{13}(k) \right) * d_j / V_k$$

$$S_{NO}(k) = S_{NO}(k) + DS_{NO}(k)$$

Νιτρώδη (SNO2)

Τα νιτρώδη παράγονται κατά την διεργασία της νιτρωδοποίησης και της απονιτροποίησης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών και καταναλώνονται κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών, την ανοξική ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας και των νιτροποιητικών βακτηρίων.

$$DS_{NO2}(k) = \left((Q(k-1) * S_{NO2} - Q(k) * S_{NO2}(k)) + \left(\frac{1-Y_h * n_g}{Y_h * n_g * \frac{8}{7}} \right) * V_k * r_6(k) - \frac{1-Y_h * n_g}{Y_h * n_g * \frac{4}{7}} * V_k * r_7(k) + V_k * (r_{13}(k) + r_{14}(k) - r_{15}(k)) - \frac{1}{Y_{NOB}} * r_{16}(k) * V_k \right) * d_j / V_k$$

$$S_{NO_2}(k) = S_{NO_2}(k) = DS_{NO_2}(k)$$

Νιτρικά (SNO3)

Τα νιτρικά παράγονται μέσω της νιτροποίησης, όπου τα NOB οξειδώνουν τα νιτρώδη και καταναλώνονται κατά την απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

$$DS_{NO_3}(k) = \left((Q(k-1) * S_{NO_3}(k-1) - Q(k) * S_{NO_3}(k)) - \frac{1-Y_h * n_g}{Y_h * n_g * 7} * V_k * r_6(k) + \frac{1}{Y_{NOB}} * r_{16}(k) * V_k \right) * d_j / V_k$$

$$S_{NO_3}(k) = S_{NO_3}(k) + DS_{NO_3}(k)$$

Αμμωνία (SNH)

Η αμμωνία αποτελεί την κύρια μορφή άζωτου στα ανεπεξέργαστα λύματα. Κατά την υδρόλυση παράγεται μικρή ποσότητα αμμωνίας. Καταναλώνεται κατά την αερόβια οξείδωση της, όπου μετατρέπεται σε υδροξυλαμίνη και κατά την ανάπτυξη των μικροοργανισμών.

$$DS_{NH}(k) = ((Q(k-1) * S_{NH}(k-1) * Q(k) * S_{NH}(k)) - (i_{NXS} - (1 - f_{S_I}) * i_{NSF}) * V_k * (r_1(k) + r_2(k) + r_3(k) + r_4(k) - i_{XB} * V_k * (r_5(k) + r_6(k) + r_7(k) + r_8(k) + r_9(k) + r_{12}(k) + r_{16}(k)) + (i_{XB} - i_{XP} * fp) * (r_{10}(k) + r_{17}(k) + r_{18}(k)) * V_k - r_{11}(k) * V_k) * d_j / V_k$$

$$S_{NH}(k) = S_{NH}(k) + DS_{NH}(k)$$

Υδροξυλαμίνη (SNH2OH)

Η υδροξυλαμίνη παράγεται από την οξείδωση της αμμωνίας και καταναλώνεται κατά την οξείδωσή της σε νιτρικό άζωτο και νιτρώδη.

$$DS_{NH_2OH}(k) = \left((Q(k-1) * S_{NH_2OH}(k-1) * Q(k) * S_{NH_2OH}(k)) + 1 * r_{11}(k) * V_k - \frac{1}{Y_{AOB}} * r_{12}(k) * V_k - 1 * r_{14}(k) * V_k - 1 * r_{15}(k) * V_k \right) * d_j / V_k$$

$$S_{NH_2OH}(k) = S_{NH_2OH}(k) + DS_{NH_2OH}(k)$$

Αλκαλικότητα (SALK)

Η αλκαλικότητα δίνει πληροφορίες για την τιμή του pH στα λύματα.

$$DS_{ALK}(k) = ((Q(k-1) * S_{ALK}(k-1) - Q(k) * S_{ALK}(k)) - \frac{i_{XB}}{14} * V_k * (r_{15}(k) + r_{11}(k) + r_{12}(k) + r_{13}(k) + r_{14}(k) + r_{15}(k)) + \frac{1-Y_h}{14*2.86*Y_h} - \frac{i_{XB}}{14} * V_k * (r_6(k) + r_7(k) + r_8(k) + r_9(k))) * d_j/V_k$$

$$S_{ALK}(k) = S_{ALK}(k) + DS_{ALK}(k)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται ο στοιχειομετρικός πίνακας του αρχικού μοντέλου, που περιλαμβάνει όλες τις κινητικές και τους συντελεστές με τους οποίους μεταβάλλονται οι μεταβλητές εξόδου του συστήματος.

Πίνακας 1:Στοιχειομετρικές παράμετροι του μοντέλου του εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας

Μεταβλητές	SN2O	SNO	SNO2	SNO3	SNH	SNH2 OH	SI	SS	XI	XS	XBH	XAO B	XNOB	SALK
Διεργασίες														
Αερόβια Υδρολυση					$iNXS-(1-fSI)*iNSF$		fSI	1-fSI		-1				
Ανοξική Υδρολυση (Νιτρικά)					$iNXS-(1-fSI)*iNSF$		fSI	1-fSI		-1				
Ανοξική Υδρολυση (Νιτρώδη)					$iNXS-(1-fSI)*iNSF$		fSI	1-fSI		-1				
Αναερόβια Υδρολυση					$iNXS-(1-fSI)*iNSF$		fSI	1-fSI		-1				
Αερόβια Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών					-ixb			-1/Yh			1			-ixb/14
Απονιτροποίηση Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών			$(1-Yh*ng)/(Yh*ng*8/7)$	$-(1-Yh*ng)/(Yh*ng*8/7)$	-ixb			-1/Yh			1			$(1-Yh)/(14*2.86*Yh)$

Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(NO ₂ ->NO)		$(1 - Y_h \cdot n_g) / (Y_h \cdot n_g^{4/7})$	$-(1 - Y_h \cdot n_g) / (Y_h \cdot n_g^{4/7})$		-ixb				-1/Yh		1			$(1 - Y_h) / (14 \cdot 2.86 \cdot Y_h)$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(NO->N ₂ O)	$(1 - Y_h \cdot n_g) / (Y_h \cdot n_g^{4/7})$	$-(1 - Y_h \cdot n_g) / (Y_h \cdot n_g^{4/7})$			-ixb				-1/Yh		1			$(1 - Y_h) / (14 \cdot 2.86 \cdot Y_h)$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(N ₂ O->N ₂)	$-(1 - Y_h \cdot n_g) / (Y_h \cdot n_g^{4/7})$				-ixb				-1/Yh		1			$(1 - Y_h) / (14 \cdot 2.86 \cdot Y_h)$
Αποσύνθεση Ετεροτροφικής Βιομάζας					ixb-ixp*fp					fp	1-fp	-1		

Οξείδωση Αμμωνίας σε Υδροξυλαμίνη					-1	1								-ixb/14
Οξείδωση Υδροξυλαμίνης σε Νιτρικό Άζωτο		1/Yaob			-ixb	- 1/Yao b						1		-ixb/14
Οξείδωση Νιτρικού Οξειδίου σε Νιτρώδη		-1	1											-ixb/14
Αναγωγή του Νιτρικού Οξειδίου σε Υποξείδιο του Αζώτου	4	-4	1			-1								-ixb/14
Αναγωγή του Νιτρώδους Οξέως σε υποξείδιο του Αζώτου	2		-1			-1								-ixb/14

Αερόβια Ανάπτυξη των Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτηριδίων			-1/Ynob	1/Ynob	-ixb								1	-ixb/14
Αποσύνθεση Αυτοτροφικών Βακτηριδίων(A OB)					ixb-ixp*fp				fp	1- fp		-1		
Αποσύνθεση Αυτοτροφικών Βακτηριδίων(N OB)					ixb-ixp*fp				fp	1- fp			-1	

Πίνακας 2: Πίνακας διεργασιών βασικού μοντέλου

	Ρυθμος Διεργασιών
Διεργασίες	
Αερόβια Υδρολυση	$r_1 = k_h * \frac{S_o}{K_{oh} + S_o} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$
Ανοξική Υδρόλυση (Νιτρικά)	$r_2 = k_h * n_{NO3H} * \frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * \frac{S_{NO3}}{K_{NO3} + S_{NO3}} * X_{BH}$
Ανοξική Υδρόλυση (Νιτρώδη)	$r_3 = k_h * n_{NO2H} * \frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} * \frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$
Αναερόβια Υδρόλυση	$r_4 = k_h * n_{fe} * \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} * \frac{K_{NO2}}{S_{NO2} + S_{NO3} + K_{NO2}} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$
Αερόβια Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών	$r_5 = m_h * \frac{S_o}{S_o + K_{oh}} * \frac{S_s}{K_s + S_s} * \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_{BH}$

Απονιτροποίηση Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών	$r_6 = m_h * n_{NO3D} * \frac{K_{oh}}{S_O + K_{oh}} * \frac{S_{NO3}}{K_{NO3} + S_{NO3}} * \frac{S_S}{K_S + S_S} * \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_{BH}$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(NO2->NO)	$r_7 = m_h * n_{G3} * \frac{K_{oh3}}{K_{oh3} + S_O} * \frac{S_{NO2}}{K_{NO2D} + S_{NO2}} * \frac{S_S}{K_{S3} + S_S} * \frac{k_{i3NO}}{k_{i3NO} + S_{NO}} * X_{BH}$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(NO->N2O)	$r_8 = m_h * n_{G4} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOD} + \left(\frac{S_{NO}^2}{K_{i4NO}}\right)} * \frac{K_{oh4}}{K_{oh4} + S_O} * \frac{S_S}{K_{S4} + S_S} * X_{BH}$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(N2O->N2)	$r_9 = m_h * n_{G5} * \frac{S_S}{S_S + K_{S5}} * \frac{S_{N2O}}{K_{N2OD} + S_{N2O}} * \frac{K_{oh5}}{S_O + K_{oh5}} * \frac{K_{i5NO}}{K_{i5NO} + S_{NO}} * X_{BH}$
Αποσύνθεση Ετεροτροφικής Βιομάζας	$r_{10} = b_h * X_{BH}$
Οξείδωση Αμμωνίας σε Υδροξυλαμίνη	$r_{11} = q_{AOBAMO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob1}} * \frac{S_{NH}}{k_{NHAOB} + S_{NH}} * X_{AOB}$
Οξείδωση Υδροξυλαμίνης σε Νιτρικό Άζωτο	$r_{12} = m_{AOBHAO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob2}} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + 10^{-12}} * X_{AOB}$
Οξείδωση Νιτρικού Οξειδίου σε Νιτρώδη	$r_{13} = q_{AOBHAO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob2}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOAOBHAO}} * X_{AOB}$
Αναγωγή του Νιτρικού Οξειδίου σε Υποξείδιο του Αζώτου	$r_{14} = q_{AOBN2ONN} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOaobNN}} * X_{AOB}$

<p>Αναγωγή του Νιτρώδους Οξέως σε υποξείδιο του Αζώτου</p>	$fS_o = \frac{S_o}{K_{ohaobND} + 1.0 - 2.0 * \sqrt{\frac{K_{ohaobND}}{K_{iohaob}}}} * (S_o + \frac{S_o^2}{K_{iohaob}})$ $K_a = e^{\frac{2300}{273+t}}$ $S_{HNO2} = \frac{S_{NO2}}{K_a * 10^{pH} + 1.0} * \frac{47}{14}$ $r_{15} = q_{aobN2OND} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{HNO2}}{S_{HNO2} + K_{hNO2aob}} * fS_o * X_{AOB}$
<p>Αερόβια Ανάπτυξη των Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτηριδίων</p>	$r_{16} = m_{NOB} * \frac{S_o}{k_{ohnob} + S_o} * \frac{S_{NO2}}{K_{NO2nob} + S_{NO2}} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALKnob}} * X_{NOB}$
<p>Αποσύνθεση Αυτοτροφικών Βακτηριδίων(AOB)</p>	$r_{17} = b_{AOB} * X_{AOB}$
<p>Αποσύνθεση Αυτοτροφικών Βακτηριδίων(NOΒ)</p>	$r_{18} = b_{NOB} * X_{NOB}$

3.2.4 Παράμετροι βασικού μοντέλου

Η επιλογή των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των μεταβλητών αποτελεί την διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου. Το εύρος των τιμών των παραμέτρων καθορίζεται από πειραματικές διερευνήσεις που έχουν προηγηθεί. Οι πειραματικές τιμές που έχουν προκύψει από έρευνες δε δίνουν ακριβή αποτελέσματα, καθώς η συμπεριφορά των διεργασιών διαφέρει όταν μελετούνται σε εργαστηριακή μικρή κλίμακα από όταν μελετούνται σε επίπεδο μιας πραγματικής Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων. Συνεπώς, οι πειραματικές έρευνες και οι μελέτες στο πεδίο μπορούν να δώσουν ένα σύνολο τιμών για την κάθε παράμετρο που επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Η προσομοίωση δίνει την δυνατότητα της θεωρητικής εύρεσης των βέλτιστων τιμών αυτών των παραμέτρων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή καινούργιων πειραμάτων για να ελεγχθεί η εγκυρότητά της.

Στοιχειομετρικές Παράμετροι

Ο συντελεστής απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας Y_H εκφράζει την μάζα που σχηματίζεται από την κατανάλωση συγκεκριμένης ποσότητας εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης. Οι μονάδες μέτρησης του συντελεστή είναι gr δημιουργούμενου κυττάρου COD/gr οξειδωμένου COD. Αντίστοιχα έχουν οριστεί ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής και νιτρικής βιομάζας ως Y_{aob} και Y_{nob} . Οι τιμές της είναι αρκετά μικρότερες από την τιμή του συντελεστή Y_H .

Ο συντελεστής fp αποτελεί ένα αδιάστατο νούμερο και εκφράζει το ποσοστό της βιομάζας που μετατρέπεται σε αδρανή σωματιδιακά προϊόντα κατά την διεργασία της αποσύνθεσης.

Η παράμετρος ixb περιγράφει την μάζα αζώτου που υπάρχει ανά κύτταρο βιομάζας και οι μονάδες μέτρησής της είναι gr N/gr COD. Αντίστοιχα έχει δημιουργηθεί συντελεστής για την μάζα αζώτου που περιέχεται στα αδρανή στερεά και συμβολίζεται ως ixp . Οι μονάδες μέτρησης του συντελεστή ixp είναι οι της **?ιδιοι** με τον συντελεστή ixb , αλλά οι τιμές που λαμβάνει είναι χαρακτηριστικά μικρότερες.

Ο συντελεστής $inxS$ εκφράζει την ποσότητα του αζώτου, που περιέχεται στην αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη και οι μονάδες μέτρησης είναι gr N/gr COD. Ο συντελεστής $insf$ φανερώνει την ποσότητα την ποσότητα του αζώτου που περιέχεται στην εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη και οι μονάδες μέτρησης είναι οι της με το $inxS$. Τέλος, ο συντελεστής $inSi$ εκφράζει την ποσότητα του αζώτου που περιέχεται στην αδρανή διαλυμένη οργανική ύλη και έχει της της μονάδες μέτρησης με της προηγούμενες.

Όσον αφορά το φώσφορο υπάρχουν τρεις παράμετροι που εκφράζουν αντίστοιχα την ποσότητα της φωσφορικής μάζας που περιέχεται στην αργά βιοδιασπάσιμη

οργανική ύλη, την εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη και την αδρανή διαλυμένη οργανική ύλη. Συμβολίζονται ως **iPXS**, **iPSF** και **iNSF** αντίστοιχα, οι μονάδες μέτρησης της είναι gr P/ gr COD και οι τιμές της είναι μικρότερες από της αντίστοιχες του αζώτου.

Η παράμετρος της παραγωγής αδρανούς διαλυμένης οργανικής ύλης κατά την υδρόλυση **fSI** στο μοντέλο έχει οριστεί ως μηδέν.

Η τελευταία στοιχειομετρική παράμετρος του αρχικού μοντέλου είναι το **ng**, που αποκαλείται διορθωτικός συντελεστής της ανοξικής ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών και είναι αδιάστατος αριθμός.

Κινητικές Παράμετροι

Η παράμετρος **mH** είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός της ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Η τιμή της επηρεάζεται σημαντικά από την θερμοκρασία των λυμάτων και οι μονάδες μέτρησης είναι d^{-1} . Οι παράμετροι **maobhao** και **mnoB** εκφράζουν τον μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών και των νιτροποιητικών βακτηρίων αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί επηρεάζονται σημαντικά από της αλλαγές στην θερμοκρασία και οι μονάδες μετρήσεώς της είναι της με την περίπτωση της ετεροτροφικής βιομάζας.

Ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης της ετεροτροφικής βιομάζας **bH** καθορίζει τον ρυθμό κατανάλωσης των ετεροτροφικών βακτηρίων και οι μονάδες μέτρησης του συντελεστή είναι d^{-1} . Αντίστοιχα έχει οριστεί ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των αυτοτροφικών **baob** και των νιτροποιητικών βακτηρίων **bnob**. Οι μονάδες μέτρησεις για της της συντελεστές είναι της d^{-1} . Οι ειδικοί ρυθμοί αποσύνθεσης εξαρτώνται μόνο από την θερμοκρασία των λυμάτων.

Η παράμετρος **KH** αντιπροσωπεύει τον μέγιστο ειδικό ρυθμό πραγματοποίησης της υδρόλυσης και εξαρτάται από την θερμοκρασία. Οι μονάδες μέτρησεώς της είναι gr αργά βιοδιασπάσιμου COD/ gr COD.

Η παράμετρος **Ks** αποτελεί τον συντελεστή κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας. Η τιμή του εξαρτάται από την φύση των λυμάτων αλλά και από το είδος των βιοαντιδραστήρων. Οι μονάδες μέτρησης του είναι $gr\ COD/m^3$.

Ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου **KOH** λειτουργεί ως διακόπτης της κινητικής, καθώς δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση της όταν δεν υπάρχει οξυγόνο. Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται είναι $gr\ O_2/ gr\ COD$. Στις ανοξικές κινητικές ο συντελεστής **KOH** χρησιμοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακόπτει την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών όσο αυξάνεται η συγκέντρωσή του. Το ίδιο ισχύει και για της υπόλοιπους συντελεστές κορεσμού του οξυγόνου **KOH3**, **KOH4** και **KOH5**, οι οποίοι περιγράφουν ανοξικές διαδικασίες και άρα όταν

υπάρχει παρουσία οξυγόνου οι κινητικές της οποίες συμμετέχουν πραγματοποιούνται με πολύ μικρό ή μηδενικό ρυθμό. Οι παράγοντες που της επηρεάζουν και οι μονάδες μέτρησης είναι αντίστοιχοι με του ΚΟΗ.

Ο συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου **ΚNH** χρησιμοποιεί όρους των κινητικών, όπου περιγράφουν την αμμωνία ως περιοριστικό παράγοντα. Οι μονάδες μέτρησης είναι gr SNH-N/m^3 .

Ο συντελεστής κορεσμού της υδρόλυσης της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης συμβολίζεται ως **Κx** και οι μονάδες μέτρησης του είναι $\text{gr αργά βιοδιασπάσιμου COD/gr COD}$.

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω η διαδικασία της υδρόλυσης συμβαίνει σε της της πιθανές συνθήκες που μπορεί να υπάρξουν της βιοαντιδραστήρες. Σε ανοξικές συνθήκες η υδρόλυση πραγματοποιείται είτε με την παρουσία νιτρωδών είτε με την παρουσία νιτρικών, αλλά η ταχύτητα της διεργασίας είναι μικρότερη από αυτήν της αερόβιες συνθήκες. Το γεγονός αυτό μοντελοποιείται μέσω αδιάστατων μειωτικών συντελεστών **nNO3H** και **nNO2H** που εκφράζουν την μικρότερη ταχύτητα πραγματοποίησης της ανοξικής υδρόλυσης. Σε αερόβιες συνθήκες η διαδικασία πραγματοποιείται με ακόμα μικρότερο ρυθμό για αυτό έχει οριστεί ο συντελεστής **nfe**, ο οποίος παίρνει μικρότερη τιμή από της αντίστοιχους των ανοξικών διεργασιών.

Οι συντελεστές κορεσμού των νιτρωδών και των νιτρικών **ΚNO2** και **ΚNO3** αντίστοιχα διαδραματίζουν τον ρόλο του περιοριστικού παράγοντα, ο οποίος καθορίζει από ποια συγκέντρωση και πάνω αρχίζουν να πραγματοποιούνται οι διεργασίες που απαιτούν την παρουσία νιτρωδών ή νιτρικών. Οι μονάδες μέτρησης των δύο παραμέτρων είναι gr NO2-N/m^3 και gr NO3-N/m^3 .

Κατά την ετεροτροφική απονιτροποίηση η ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας πραγματοποιείται με μειωμένο ρυθμό το οποίο εκφράζεται μέσω του μειωτικού συντελεστή **nNO3D**. Για την ανοξική ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας χρησιμοποιούνται μειωτικοί συντελεστές. Το **ng3** είναι ο μειωτικός συντελεστής που συμμετέχει στην διεργασία μετατροπής των νιτρωδών σε νιτρικό άζωτο, ο συντελεστής **ng4** συμμετέχει στην μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου και ο συντελεστής **ng5** στην μετατροπή του υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο. Οι μειωτικοί συντελεστές που αναφέρθηκαν είναι αδιάστατοι αριθμοί.

Οι συντελεστές κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας **Κs3**, **Κs4** και **Κs5** εκφράζουν την απαίτηση της εύκολα βιοδιασπάσιμης διαλυμένης οργανικής ύλης υπό ανοξικές συνθήκες. Οι μονάδες μέτρησης που της περιγράφουν είναι gr COD/m^3 .

Κατά την διαδικασία ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας, όπου τα νιτρώδη μετατρέπονται σε νιτρικό άζωτο χρησιμοποιείται ο συντελεστής κορεσμού των

νιτρωδών **KNO₂D** και έχει μονάδες μέτρησης gr NO₂-N/m³. Κατά την διαδικασία μετατροπής του νιτρικού αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου χρησιμοποιείται ο συντελεστής **KNOD** με μονάδες gr NO-N/m³. Τέλος για την δημιουργία αέριου αζώτου από το υποξείδιο του αζώτου χρησιμοποιείται ο συντελεστής κορεσμού για το νιτρικό άζωτο **KN₂OD** με μονάδες μέτρησης gr N₂OD-N/m³.

Κατά την διεργασία όπου η αμμωνία μετατρέπεται σε υδροξυλαμίνη υπάρχουν τρεις συντελεστές. Ο συντελεστής μέγιστου ειδικού ρυθμού **qaobamo** έχει μονάδες μέτρησης mg N/(mg COD * d). Οι άλλοι δύο συντελεστές αφορούν το οξυγόνο και το αμμωνιακό άζωτο και λειτουργούν περιοριστικά όταν η συγκέντρωσή της δεν επαρκεί. Ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου είναι **kohaob1** με μονάδες μέτρησης gr O₂/m³ και ο συντελεστής κορεσμού της αμμωνίας **knhaob** έχει μονάδες gr NH₃/m³.

Η διεργασία κατά την οποία η υδροξυλαμίνη καταλύεται σε νιτρικά από το περιπλασματικό ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης (HAO) απαιτεί τρία στάδια για την ολοκλήρωσή της και χρησιμοποιούνται τέσσερις συντελεστές. Αρχικά ο ειδικός συντελεστής μέγιστου ρυθμού για την πραγματοποίηση της διαδικασίας **qaobhao** μετριέται σε μονάδες mg N/(mg COD * d). Στην συνέχεια δύο από της συντελεστές που χρησιμοποιούνται αφορούν το οξυγόνο και την υδροξυλαμίνη και λειτουργούν ως περιοριστικοί παράγοντες όταν μειωθεί η συγκέντρωση είτε της ή της της. Αυτές είναι το **kohaob2** με μονάδες μέτρησης gr O₂/m³ και **KNH₂OHAOB** όπου έχει μονάδες μέτρησης gr NH₂OH-N/m³. Τελικά για την οξείδωση του νιτρικού οξειδίου χρησιμοποιείται ο συντελεστής **KN₂OAH₂OB** με μονάδες μέτρησης gr NO-N/m³.

Για την περιγραφή την νιτροποίησης των νιτροποιητών χρησιμοποιούνται δύο συντελεστές. Ο συντελεστής **qaobn2onn** εκφράζει τον μέγιστο ρυθμό πραγματοποίησης της αντίδρασης και μετριέται σε mg N/(mg COD * d). Ο συντελεστής **knoaobnn** λειτουργεί ως περιοριστικός παράγοντας για το νιτρικό οξείδιο και μετριέται σε gr NO-N/m³.

Για την διεργασία ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων χρησιμοποιούνται τρεις συντελεστές. Αυτοί είναι ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου **kohnob** με μονάδες μέτρησης gr O₂/m³, ο συντελεστής περιορισμού της αντίδρασης ανάλογα με την συγκέντρωση των νιτρωδών **kno2nob** και ο συντελεστής για την αλκαλικότητα **Kalknob** με μονάδες μέτρησης gr CaCO₃/m³.

Κατά την διαδικασία της απονιτροποίησης των νιτροποιητών συμμετέχει ο συντελεστής μέγιστου ρυθμού **qaobn2ond** με μονάδες mg N/(mg COD * d). Της ο συντελεστής **Ka** που αποτελεί την σταθερά ισορροπίας ιονισμού του νιτρικού οξειδίου. Ο συντελεστής **Khno2aob** λειτουργεί ως περιοριστικός παράγοντας στην εξίσωση του νιτρώδους οξέος. Τέλος συμμετέχουν δύο συντελεστές που εκφράζουν

την επιρροή του οξυγόνου στην απονιτροποίηση των νιτροποιητών **Kohaobnd** με μονάδες $gr\ O_2/m^3$ και ο συντελεστής k_{iO_2} , ο οποίος αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την συγκέντρωση του οξυγόνου και εκφράζεται με της της μονάδες της το προηγούμενο.

3.3. Τροποποιημένο Μοντέλο ANAMMOX

3.3.1 Συστατικά Μοντέλου

Το τροποποιημένο μοντέλο *anammox* κατασκευάστηκε πάνω στο μοντέλο του εργαστηρίου της Υγειονομικής Τεχνολογίας με στόχο να προσομοιώνει μαζί με ότι αναλύθηκε της προηγούμενες παραγράφους και την ανάπτυξη των *anammox* βακτηρίων. Για τον σκοπό προστέθηκε μία ακόμα μεταβλητή στο μοντέλο η XAN. Το X συμβολίζει στο τροποποιημένο μοντέλο τα σωματιδιακά και το S τα διαλυμένα, της στο μοντέλο αναφοράς. Το XAN αποτελεί την τέταρτη κατηγορία βιομάζας και συμβάλει στο συνολικό COD του συστήματος. Πρέπει να τονιστεί ότι οι μεταβλητές που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο υπάρχουν και στο τροποποιημένο μοντέλο.

Αυτοτροφική Βιομάζα Βακτηρίων Ανοξικής Οξειδωσης της Αμμωνίας (XAN)

Τα βακτήρια *anammox* οξειδώνουν το άζωτο σε ανοξικές συνθήκες χρησιμοποιώντας τα νιτρώδη ως δέκτη ηλεκτρονίων. Επομένως, είναι αυτοτροφικά χημικολιθοτροφικά βακτήρια. Η αύξηση της συγκέντρωσής της πραγματοποιείται υπό ανοξικές συνθήκες και μειώνονται μέσω της διεργασίας της φθοράς. Πρέπει να σημειωθεί ότι με την προσθήκη της μεταβλητής των *anammox* στο μοντέλο αλλάζει και ο υπολογισμός των πτητικών στερεών (VSS) ως εξής:

$$VSS = (XBH + XAOB + XNOB + XAN+XI+XS)/1.42$$

3.3.2 Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης

Όσον αφορά την *anammox* διεργασία η λειτουργία της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης είναι πολύ σημαντική, καθώς για να αποκτήσουν τα *anammox* ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι άλλων ομάδων μικροοργανισμών είναι απαραίτητη η μεγαλύτερη δυνατή απομάκρυνση στερεών από το σύστημα της κεντρικής γραμμής επεξεργασίας των λυμάτων.

Το σκαρίφημα της εικόνας περιγράφει ικανοποιητικά την λειτουργία της ΔΠΚ στο τροποποιημένο μοντέλο. Για την βελτίωση της απόδοσης της *anammox* διεργασίας πραγματοποιήθηκε η παραδοχή ότι διαλυμένα στερεά (SS) έχουν την ίδια συμπεριφορά με τα σωματιδιακά οργανικά στερεά (XS). Συνεπώς, ένα ποσοστό αυτών απομακρύνεται από το σύστημα, μέσω της πρωτοβάθμιας ιλύος. Έτσι οι εξισώσεις για τα διαλυμένα οργανικά στερεά τροποποιήθηκαν ως εξής:

$$M_{SS}(3) = \frac{s_r * M_{SS}(1)}{100}$$

$$SS(3) = \frac{M_{SS}(3)}{Q(3)}$$

3.3.3 Βιοχημικές Διεργασίες

Στο τροποποιημένο μοντέλο αναπνοοχ προστέθηκαν δύο διεργασίες της προαναφερθείσες, οι οποίες αφορούν την ανάπτυξη και την φθορά των αναπνοοχ βακτηρίων.

Αναερόβια Ανάπτυξη Αυοτροφικής Βιομάζας που Οξειδώνει την Αμμωνία

Η οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου σε ανοξικές συνθήκες οφείλεται στην ανάπτυξη των αναπνοοχ βακτηρίων. Για την πραγματοποίηση της διεργασίας είναι κρίσιμη η ύπαρξη αμμωνίας και νιτρωδών στην ανοξική δεξαμενή. Επομένως, η νιτρωδοποίηση στην αερόβια δεξαμενή δεν πρέπει να καταναλώσει όλη την ποσότητα της αμμωνίας. Είναι πολύ σημαντικό να μην υπάρχει οξυγόνο και ελεύθερη αμμωνία στην δεξαμενή, καθώς αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες για την ανάπτυξη των αναπνοοχ. Η κινητική εξίσωση που περιγράφει την παραπάνω διαδικασία είναι η εξής:

$$r_{19} = m_{AN} * \frac{S_{NH}}{K_{NHAN} + S_{NH}} * \frac{K_{OAN}}{K_{OAN} + S_O} * \frac{S_{NO2}}{K_{NO2AN} + S_{NO2}} * \frac{K_{INH3AN}}{K_{INH3AN} + S_{NH3}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALKAN} + S_{ALK}} * X_{AN}$$

Αποσύνθεση της Αυοτροφικής Βιομάζας που Οξειδώνει την Αμμωνία

Η διεργασία αυτή περιγράφει την φθορά των αναπνοοχ βακτηρίων. Η φθορά της εξαρτάται από τον συντελεστή αποσύνθεσης της βιομάζας, ο οποίος έχει οριστεί όπως και οι προηγούμενοι και εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία.

$$r_{20} = b_{AN} * X_{AN}$$

Η τροποποίηση του μοντέλου επηρεάζει και τις εξισώσεις που περιγράφουν την μεταβολή των μεταβλητών εξόδου καθώς στο καινούριο μοντέλο προστίθενται δύο διεργασίες και μία μεταβλητή εξόδου.

Νιτρώδη (SNO2)

Τα νιτρώδη καταναλώνονται από την αναπνοοχ διεργασία, καθώς χρησιμοποιούνται ως αποδέκτης ηλεκτρονίων για την οξείδωση της αμμωνίας.

$$DS_{NO_2}(k) = \left((Q(k-1) * S_{NO_2} - Q(k) * S_{NO_2}(k)) + \left(\frac{1-Y_h * n_g}{Y_h * n_g * \frac{8}{7}} \right) * V_k * r_6(k) - \frac{1-Y_h * n_g}{Y_h * n_g * \frac{4}{7}} * V_k * r_7(k) + V_k * (r_{13}(k) + r_{14}(k) - r_{15}(k)) - \frac{1}{Y_{NOB}} * r_{16}(k) * V_k - \left(\frac{1}{Y_{AN}} + \frac{1}{1.14} \right) * r_{19}(k) * V_k \right) * d_j / V_k$$

$$S_{NO_2}(k) = S_{NO_2}(k) = DS_{NO_2}(k)$$

Νιτρικά (SNO3)

Η ανάπτυξη των αναπνοών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην ανοξική δεξαμενή.

$$DS_{NO_3}(k) = \left((Q(k-1) * S_{NO_3}(k-1) - Q(k) * S_{NO_3}(k)) - \frac{1-Y_h * n_g}{Y_h * n_g * \frac{8}{7}} * V_k * r_6(k) + \frac{1}{Y_{NOB}} * r_{16}(k) * V_k + \frac{1}{1.14} * r_{19}(k) * V_k \right) * d_j / V_k$$

$$S_{NO_3}(k) = S_{NO_3}(k) + DS_{NO_3}(k)$$

Αμμωνία (SNH)

Η αμμωνία οξειδώνεται κατά την ανάπτυξη των αναπνοών βακτηρίων και μειώνεται η συγκέντρωσή της.

$$DS_{NH}(k) = ((Q(k-1) * S_{NH}(k-1) * Q(k) * S_{NH}(k)) - (i_{NXS} - (1 - f_{SI}) * i_{NSF}) * V_k * (r_1(k) + r_2(k) + r_3(k) + r_4(k) - i_{XB} * V_k * (r_5(k) + r_6(k) + r_7(k) + r_8(k) + r_9(k) + r_{12}(k) + r_{16}(k)) + (i_{XB} - i_{XP} * fp) * (r_{10}(k) + r_{17}(k) + r_{18}(k)) * V_k - r_{11}(k) * V_k - \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_{AN}} \right) * r_{19}(k) * V_k) * d_j / V_k$$

$$S_{NH}(k) = S_{NH}(k) + DS_{NH}(k)$$

Αυτοτροφική Βιομάζα Βακτηρίων Ανοξικής Οξείδωσης της Αμμωνίας (XAN)

Η βιομάζα των αναπνοών βακτηρίων παράγεται σε ανοξικές συνθήκες και μειώνεται μέσω της διαδικασίας της αποσύνθεσης.

$$DX_{AN} = \left((Q(k-1) * X_{AN}(k-1) - Q(k) * X_{AN}(k)) + 1 * r_{19}(k) * V_k - r_{20}(k) * V_k \right) * d_j / V_k$$

$$X_{AN}(k) = X_{AN}(k) + DX_{AN}(k)$$

Αλκαλικότητα (SALK)

Η αλκαλικότητα παρέχει πληροφορίες για το pH του διαλύματος. Η ανάπτυξη των αναπνοοχ προκαλεί μείωση στην αλκαλικότητα των λυμάτων.

$$DS_{ALK}(k) = \left((Q(k-1) * S_{ALK}(k-1) - Q(k) * S_{ALK}(k)) - \frac{i_{XB}}{14} * V_k * (r_{15}(k) + r_{11}(k) + r_{12}(k) + r_{13}(k) + r_{14}(k) + r_{15}(k)) + \frac{1-Y_h}{14*2.86*Y_h} - \frac{i_{XB}}{14} * V_k * (r_6(k) + r_7(k) + r_8(k) + r_9(k)) - \frac{i_{XB}}{14} * r_{19}(k) * V_k \right) * d_j / V_k$$

$$S_{ALK}(k) = DS_{ALK}(k) + S_{ALK}(k)$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κινητικές εξισώσεις και οι στοιχειομετρικοί συντελεστές του τροποποιημένου μοντέλου αναπνοοχ.

Αδρανής Αιωρούμενη Οργανική Ύλη (XI)

Η φθορά των αναπνοοχ βακτηρίων έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αδρανούς αιωρούμενης οργανικής ύλης. Το ίδιο ισχύει για την φθορά των υπόλοιπων κατηγοριών βιομάζας και αναλύθηκε παραπάνω.

$$DX_I(k) = \left((Q(k-1) * X_I(k-1) - Q(k) * X_I(k-1)) + fp * V_k * (r_{10}(k) + r_{17}(k) + r_{18}(k) + r_{20}(k)) \right) * d_j / V_k$$

$$X_I(k) = X_I(k) + DX_I(k)$$

Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη (XS)

Το μεγαλύτερο τμήμα της βιομάζας που προκύπτει από την φθορά των αναπνοοχ μετατρέπεται σε αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη και έτσι αυξάνει την συγκέντρωσή της. Η αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη μετατρέπεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη μέσω της υδρόλυσης.

$$DX_S(k) = \left((Q(k-1) * X_S(k-1) - Q(k) * X_S(k)) - 1 * V_k * (r_1(k) + r_2(k) + r_3(k) + r_4(k)) + (1 - f_p) * (r_{10}(k) + r_{17}(k) + r_{18}(k) + r_{20}(k)) \right) * d_j / V(k)$$

$$X_S(k) = X_S(k) + DX_S(k)$$

Πίνακας 3: Στοιχειομετρικές παράμετροι του τροποποιημένου μοντέλου

Μεταβλητές	SN2O	SNO	SNO2	SNO3	SNH	SNH 2OH	SI	SS	XI	X S	X B H	XA OB	X A N	XN OB	SALK
Διεργασίες															
Αερόβια Υδρολυση					iNXS- (1- fSI)*iN SF		fS I	1- fSI		-1					
Ανοξική Υδρόλυση (Νιτρικά)					iNXS- (1- fSI)*iN SF		fS I	1- fSI		-1					
Ανοξική Υδρόλυση (Νιτρώδη)					iNXS- (1- fSI)*iN SF		fS I	1- fSI		-1					
Αναερόβια Υδρόλυση					iNXS- (1- fSI)*iN SF		fS I	1- fSI		-1					
Αερόβια Ανάπτυξη Ετεροτροφικώ ν Μικροοργανισ μών					-ixb			- 1/ Yh			1				-ixb/14

Απονιτροποίηση Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών			$(1 - Y_h * ng) / (Y_h * ng^{8/7})$	$-(1 - Y_h * ng) / (Y_h * ng^{8/7})$	-ixb			- 1/ Yh			1				$(1 - Y_h) / (14 * 2.86 * Y_h)$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(NO2->NO)		$(1 - Y_h * ng) / (Y_h * ng^{4/7})$	$-(1 - Y_h * ng) / (Y_h * ng^{4/7})$		-ixb			- 1/ Yh			1				$(1 - Y_h) / (14 * 2.86 * Y_h)$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(NO->N2O)	$(1 - Y_h * ng) / (Y_h * ng^{4/7})$	$-(1 - Y_h * ng) / (Y_h * ng^{4/7})$			-ixb			- 1/ Yh			1				$(1 - Y_h) / (14 * 2.86 * Y_h)$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(N2O->N2)	$-(1 - Y_h * ng) / (Y_h * ng^{4/7})$				-ixb			- 1/ Yh			1				$(1 - Y_h) / (14 * 2.86 * Y_h)$

Αποσύνθεση Ετεροτροφικής Βιομάζας					$ixb - ixp * fp$				fp	$1 - fp$	-1				
Οξείδωση Αμμωνίας σε Υδροξυλαμίνη					-1	1									$-ixb/14$
Οξείδωση Υδροξυλαμίνης σε Νιτρικό Άζωτο		$1/Yaob$			$-ixb$	$-1/Yaob$					1				$-ixb/14$
Οξείδωση Νιτρικού Οξειδίου σε Νιτρώδη		-1	1												$-ixb/14$
Αναγωγή του Νιτρικού Οξειδίου σε Υποξείδιο του Αζώτου	4	-4	1			-1									$-ixb/14$

Αναγωγή του Νιτρώδους Οξέως σε υποξείδιο του Αζώτου	2		-1			-1												-ixb/14
Αερόβια Ανάπτυξη των Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτηριδίων			-1/Ynob	1/Ynob	-ixb												1	-ixb/14
Αποσύνθεση Αυοτροφικών Βακτηριδίων(AOB)					ixb-ixp*fp				fp	1-fp			-1					
Αποσύνθεση Αυοτροφικών Βακτηριδίων(NOΒ)					ixb-ixp*fp				fp	1-fp							-1	

Ανοξική Ανάπτυξη αυοτροφικών Απαμμοχ			- (1/γ _{αν} +1/14)	1/1.14λ	- (ixb+1 /γ _{αν})									1		-ixb/14
Αποσύνθεση Απαμμοχ											fp	1- fp	-1			

Πίνακας 4: Πίνακας διεργασιών τροποποιημένου μοντέλου

Διεργασίες	Ρυθμός Διεργασιών
Αερόβια Υδρολυση	$r_1 = k_h * \frac{S_o}{K_{oh} + S_o} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$
Ανοξική Υδρόλυση (Νιτρικά)	$r_2 = k_h * n_{NO3H} * \frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * \frac{S_{NO3}}{K_{NO3} + S_{NO3}} * X_{BH}$
Ανοξική Υδρόλυση (Νιτρώδη)	$r_3 = k_h * n_{NO2H} * \frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} * \frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$
Αναερόβια Υδρόλυση	$r_4 = k_h * n_{fe} * \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} * \frac{K_{NO2}}{S_{NO2} + S_{NO3} + K_{NO2}} * \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_x + \left(\frac{X_s}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$
Αερόβια Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών	$r_5 = m_h * \frac{S_o}{S_o + K_{oh}} * \frac{S_s}{K_s + S_s} * \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_{BH}$
Απονιτροποίηση Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών	$r_6 = m_h * n_{NO3D} * \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} * \frac{S_{NO3}}{K_{NO3} + S_{NO3}} * \frac{S_s}{K_s + S_s} * \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_{BH}$

Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(NO2- >NO)	$r_7 = m_h * n_{G3} * \frac{K_{oh3}}{K_{oh3} + S_O} * \frac{S_{NO2}}{K_{NO2D} + S_{NO2}} * \frac{S_S}{K_{S3} + S_S} * \frac{k_{i3NO}}{k_{i3NO} + S_{NO}} * X_{BH}$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(NO- >N2O)	$r_8 = m_h * n_{G4} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOD} + \left(\frac{S_{NO}^2}{K_{i4NO}}\right)} * \frac{K_{oh4}}{K_{oh4} + S_O} * \frac{S_S}{K_{S4} + S_S} * X_{BH}$
Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών(N2O- >N2)	$r_9 = m_h * n_{G5} * \frac{S_S}{S_S + K_{S5}} * \frac{S_{N2O}}{K_{N2OD} + S_{N2O}} * \frac{K_{oh5}}{S_O + K_{oh5}} * \frac{K_{i5NO}}{K_{i5NO} + S_{NO}} * X_{BH}$
Αποσύνθεση Ετεροτροφικής Βιομάζας	$r_{10} = b_h * X_{BH}$
Οξειδωση Αμμωνίας σε Υδροξυλαμίνη	$r_{11} = q_{AOBAMO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob1}} * \frac{S_{NH}}{k_{NHAOB} + S_{NH}} * X_{AOB}$
Οξειδωση Υδροξυλαμίνης σε Νιτρικό 'Αζωτο	$r_{12} = m_{AOBHAO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob2}} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + 10^{-12}} * X_{AOB}$
Οξειδωση Νιτρικού Οξειδίου σε Νιτρώδη	$r_{13} = q_{AOBHAO} * \frac{S_O}{S_O + k_{ohaob2}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOAOBHAO}} * X_{AOB}$
Αναγωγή του Νιτρικού Οξειδίου σε Υποξείδιο του Αζώτου	$r_{14} = q_{AOBN2ONN} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOaobNN}} * X_{AOB}$

Αναγωγή του Νιτρώδους Οξέως σε υποξείδιο του Αζώτου	$fS_o = \frac{S_o}{K_{ohaobND} + 1.0 - 2.0 * \sqrt{\frac{K_{ohaobND}}{K_{iohaob}}} * (S_o + \frac{S_o^2}{K_{iohaob}})$ $K_a = e^{-\frac{2300}{273+t}}$ $S_{HNO2} = \frac{S_{NO2}}{K_a * 10^{pH} + 1.0} * \frac{47}{14}$ $r_{15} = q_{aobN2OND} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{HNO2}}{S_{HNO2} + K_{hNO2aob}} * fS_o * X_{AOB}$
Αερόβια Ανάπτυξη των Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτηριδίων	$r_{16} = m_{NOB} * \frac{S_o}{k_{ohnob} + S_o} * \frac{S_{NO2}}{K_{NO2nob} + S_{NO2}} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALKnob}} * X_{NOB}$
Αποσύνθεση Αυτοτροφικών Βακτηριδίων(AOB)	$r_{17} = b_{AOB} * X_{AOB}$
Αποσύνθεση Αυτοτροφικών Βακτηριδίων(NOΒ)	$r_{18} = b_{NOB} * X_{NOB}$
Ανοξική ανάπτυξη αυτοτροφικών ANAMMOX	$r_{19} = m_{AN} * \frac{S_{NH}}{K_{NHAN} + S_{NH}} * \frac{K_{OAN}}{K_{OAN} + S_o} * \frac{S_{NO2}}{K_{NO2AN} + S_{NO2}} * \frac{K_{INH3AN}}{K_{INH3AN} + S_{NH3}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALKAN} + S_{ALK}} * X_{AN}$
Αποσύνθεση αυτοτροφικών ANAMMOX	$r_{20} = b_{AN} * X_{AN}$

3.3.4. Παράμετροι τροποποιημένου μοντέλου

Στην αντίστοιχη παράγραφο που αναλύθηκε το μοντέλο του εργαστηρίου της Υγειονομικής Τεχνολογίας καταγράφηκαν οι στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου. Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιήθηκαν και στο τροποποιημένο μοντέλο *anapmox* με την προσθήκη μερικών ακόμα για να είναι δυνατή η προσομοίωση των δύο *anapmox* διεργασιών και της επιρροής τους στην συγκέντρωση των μεταβλητών του συστήματος.

Στοιχειομετρικές Παράμετροι

Σε αυτή την κατηγορία παραμέτρων έγινε η προσθήκη του συντελεστή μετατροπής της αυτοτροφικής βιομάζας που οξειδώνει την αμμωνία σε αναερόβιες συνθήκες **YAN**. Ο συντελεστής εκφράζει την μάζα των βακτηρίων που αναπτύσσεται για κατανάλωση συγκεκριμένης μάζας αμμωνιακού αζώτου και οι μονάδες μέτρησης είναι gr δημιουργούμενου κυττάρου COD/ gr οξειδωμένου COD.

Κινητικές Παράμετροι

Η παράμετρος **man** αποτελεί τον μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης την βιομάζας των *anapmox* βακτηρίων. Η τιμή του επηρεάζεται από την θερμοκρασία των λυμάτων και έχει μονάδες μέτρησης d^{-1} .

Ο συντελεστής **KOAN** εκφράζει τον κορεσμό του οξυγόνου στην *anapmox* διεργασία και χρησιμοποιείται ως διακόπτης, όταν αυξάνεται η συγκέντρωση του οξυγόνου καθώς η διεργασία απαιτεί αναερόβιες συνθήκες. Οι μονάδες μέτρησης του συντελεστή είναι $gr O_2/m^3$.

Ο συντελεστής **KNHAN** αποτελεί σταθερά ημικορεσμού για την οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου από τα *anapmox* βακτήρια. Επιδρά περιοριστικά στην κινητική της ανάπτυξης των *anapmox* όταν μειώνεται η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου. Έχει μονάδες μέτρησης gr αμμωνιακού αζώτου/ m^3 . Αντίστοιχα έχει οριστεί ο συντελεστής **KNO2AN**, ο οποίος αποτελεί την σταθερά ημικορεσμού για την αναγωγή των νιτρωδών από τα *anapmox* και έχει μονάδες μέτρησης $gr NO_2-N/m^3$.

Η παράμετρος **KINH3AN** είναι ο συντελεστής κορεσμού για την παρουσία ελεύθερης αμμωνίας στην *anapmox* διεργασία. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις προκαλείται αναχαίτιση της αντίδρασης. Οι μονάδες μέτρησης του συντελεστή είναι grN/m^3 .

Ο συντελεστής **KALKAN** εκφράζει τον περιορισμό στην πραγματοποίησης της ανάπτυξης των *anapmox* όταν η αλκαλικότητα πέφτει σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Οι μονάδες μέτρησης του συντελεστή είναι $gr CaCO_3/m^3$.

Τέλος ο συντελεστής **ban** εκφράζει τον ειδικό ρυθμό αποσύνθεσης της *anapmox* βιομάζας και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην μείωση της συγκέντρωσης των

απαρτιοχ και στην παραγωγή ιλύος. Επηρεάζεται από την θερμοκρασία και οι μονάδες μέτρησής του είναι d^{-1} .

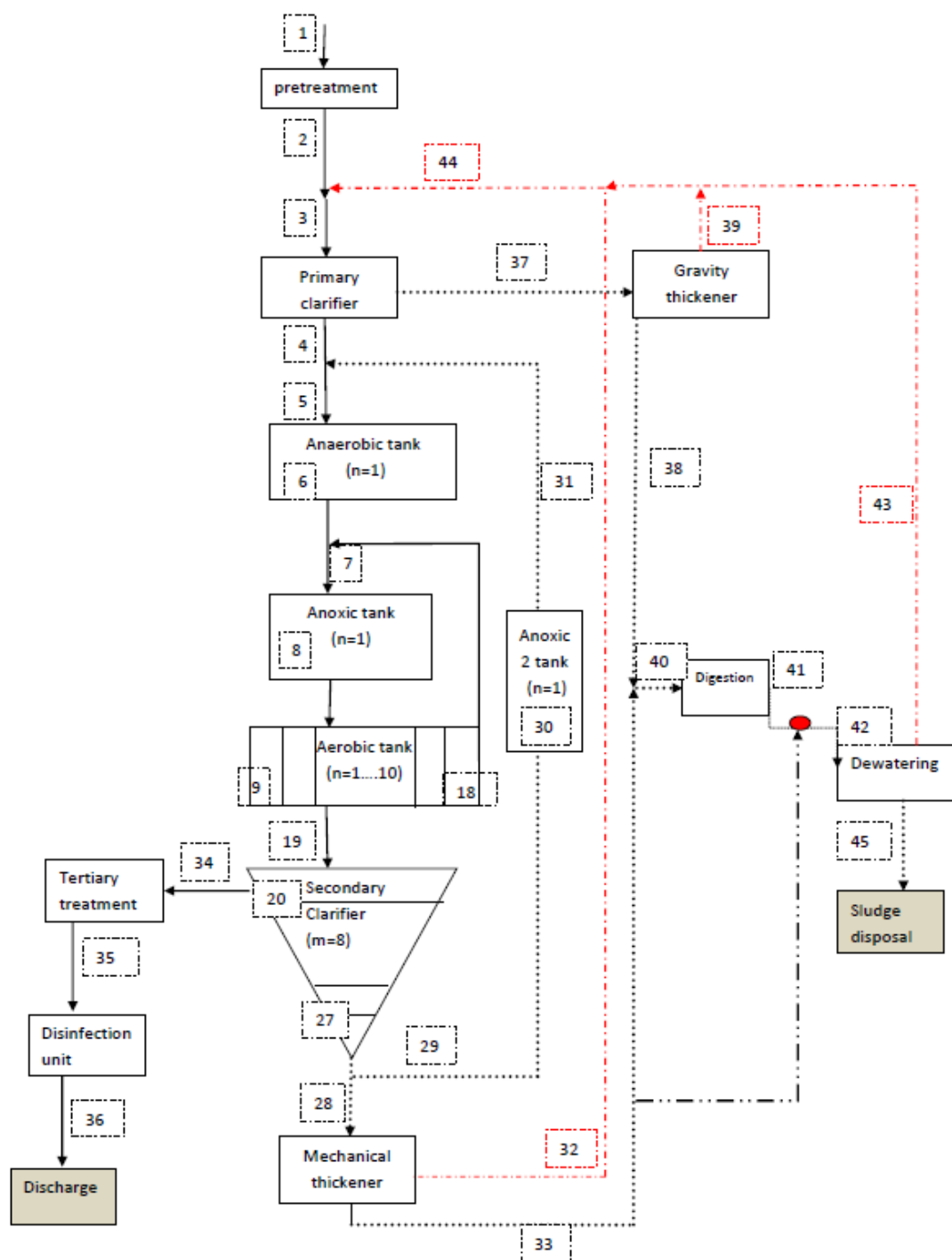
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, των σεναρίων που προσομοιώθηκαν μέσω του μοντέλου που αναπτύχθηκε για αυτό τον σκοπό. Το μοντέλο, με την χρήση των παραπάνω μαθηματικών εξισώσεων, αναπαριστά την πορεία των λυμάτων σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Αρχικά, τα λύματα διέρχονται από την Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ), όπου γίνεται η απομάκρυνση σημαντικής ποσότητας οργανικού άνθρακα. Ειδικά για την πραγματοποίηση της αναπνοή διεργασίας, πρέπει να τίθεται ως στόχος η απομάκρυνση μεγάλου ποσοστού του αρχικού οργανικού άνθρακα των λυμάτων.

Ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα μίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων είναι ο Βιολογικός Αντιδραστήρας, όπου πραγματοποιείται η απομάκρυνση διαλυμένου οργανικού άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου. Στις εφαρμογές της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα και του αζώτου. Για τον σκοπό αυτό προσομοιώθηκε μια αεριζόμενη δεξαμενή ακολουθούμενη από μια ανοξική δεξαμενή. Επίσης, η ΕΕΛ αποτελείται από μια Δεξαμενή Τελικής Καθίζησης (ΔΤΚ), στην οποία γίνεται περαιτέρω απομάκρυνση των στερεών. Τα λύματα που υπερχειλίζουν από την ΔΤΚ απολυμαίνονται στην Δεξαμενή Απολύμανσης και από εκεί διατίθενται στον υδάτινο αποδέκτη.

Από τις Δεξαμενές Καθίζησης τα οργανικά και ανόργανα στερεά που καθιζάνουν οδηγούνται μέσω αγωγών στα επόμενα στάδια επεξεργασίας έτσι ώστε η διάθεση της ιλύος στο περιβάλλον, να μπορεί να γίνει με ασφάλεια. Η ίλυς που συσσωρεύεται στην Πρωτοβάθμια Καθίζηση μεταφέρεται για πάχυνση, για να αφαιρεθεί νερό και να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε στερεά. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαδικασία της βαρυτικής πάχυνσης. Η παχυμένη πρωτοβάθμια και βιολογική ίλυς υφίσταται σταθεροποίηση προκειμένου να καταστεί, μετά από αφυδάτωση, ασφαλής η διάθεσή της στο περιβάλλον. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαδικασία της χώνευσης, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη των ορίων ασφαλείας. Η χώνευση μπορεί να γίνει είτε σε αερόβιες συνθήκες ή σε αναερόβιες. Στις προσομοιώσεις που έγιναν επιλέχθηκε η αναερόβια διεργασία, η οποία είναι ενεργειακά πιο συμφέρουσα και επιτυγχάνει την αναγκαία απομάκρυνση στερεών με μικρότερη παραγωγή βιομάζας. Τελικά, πριν γίνει η διάθεση της ιλύος στο περιβάλλον πρέπει να αφαιρεθεί σημαντικό μέρος του νερού για να επιτευχθεί μια ημιστερεή κατάσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαδικασία της αφυδάτωσης, η οποία αποτελεί και το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας της ιλύος.



Σχήμα 9: Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ για την πρώτη διάταξη των δεξαμενών

Η προσομοίωση της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων επικεντρώθηκε στην απομάκρυνση του αζώτου μέσω της ανάπτυξης των αναπνοοβακτηρίων. Η βελτιστοποίηση αυτής της διεργασίας έγινε με υιοθέτηση ενός συστήματος επεξεργασίας βασισμένου στο πρότυπο A-B σταδίων. Στο στάδιο A ο στόχος είναι η μέγιστη δυνατή απομάκρυνση οργανικού άνθρακα από την Δεξαμενή

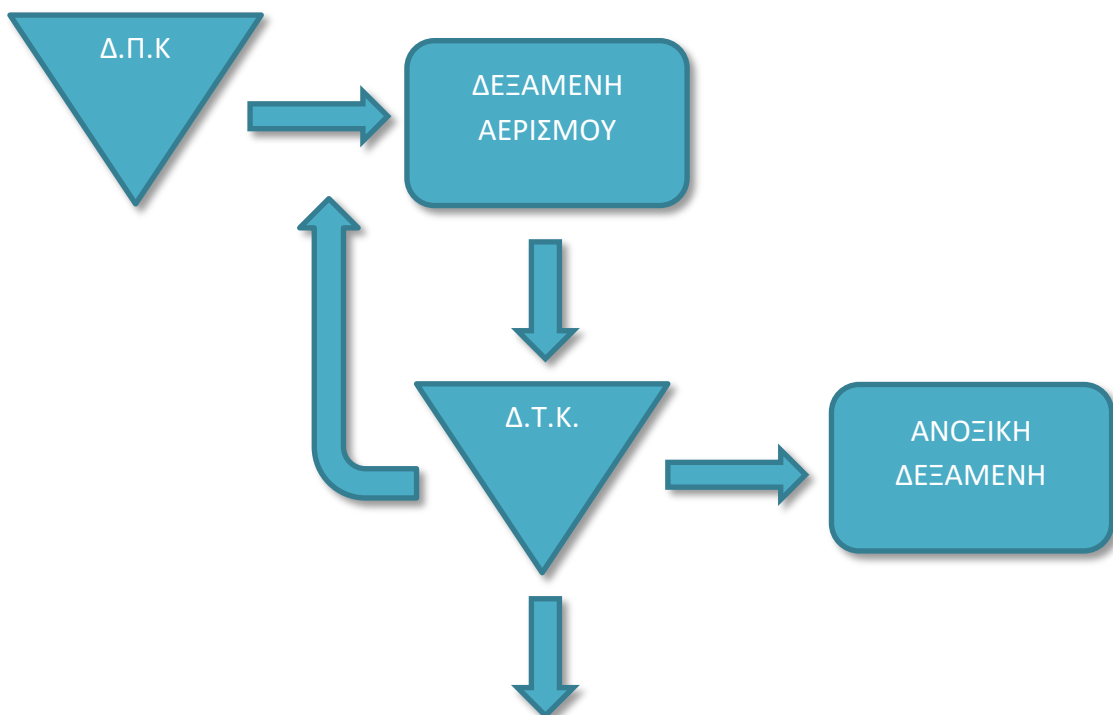
Πρωτοβάθμιας Καθίζησης. Στο στάδιο Β στόχος είναι η περαιτέρω απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα και η απομάκρυνση του αζώτου μέσω νιτρωδοποίηση - αναπνοο. Για να επιτευχθεί η απομάκρυνση του αζώτου με την αναπνοο διεργασία είναι πολύ σημαντική η αναχαίτιση των NOB βακτηρίων, τα οποία αποτελούν άμεσους ανταγωνιστές και έχουν την δυνατότητα να αναπτύσσονται πολύ γρηγορότερα και σε μεγάλο εύρος διαφορετικών συνθηκών, καθώς είναι πιο ανθεκτικά. Η σημασία του παραπάνω σχήματος είναι εμφανής καθώς για την αναχαίτιση των NOB βακτηρίων απαιτούνται μικρές συγκεντρώσεις διαλυμένου οργανικού άνθρακα και ο κατάλληλος αερισμός της αεριζόμενης δεξαμενής, ώστε να μετατραπεί ένα μέρος της αμμωνίας σε νιτρώδη (SNO₂) χωρίς όμως να μετατραπεί σε νιτρικά (SNO₃).

Στο μοντέλο προσομοιώθηκε η λειτουργία της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων σε διάφορες συνθήκες, με κεντρική ιδέα την πραγματοποίηση της διαδικασίας A/B. Ορίστηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις δεξαμενών, με σκοπό να εκτιμηθεί και να συγκριθεί η αποτελεσματικότητά τους. Η πρώτη διάταξη αποτελεί ένα σύστημα ενεργού ιλύος, όπου τα λύματα αφού περάσουν από την πρωτοβάθμια επεξεργασία οδηγούνται στους βιολογικούς αντιδραστήρες. Στην πρώτη φάση διέρχονται από την αεριζόμενη δεξαμενή συνεχούς αερισμού, για να πραγματοποιηθεί η μερική νιτρωδοποίηση της αμμωνίας. Στην συνέχεια, τοποθετήθηκε η ανοξική δεξαμενή ώστε να γίνεται η ανάπτυξη των αναπνοο και η απομάκρυνση του αζώτου από το σύστημα. Έπειτα τα λύματα οδηγούνται στην Δεξαμενή Τελικής Καθίζησης. Ένα μέρος της ιλύος που σχηματίζεται με την καθίζηση επανακυκλοφορείται στο σύστημα πριν από την είσοδο της αεριζόμενης δεξαμενής. Με την χρήση ενός υδροκυκλώνα στην ΔTK είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι τα αναπνοο βακτήρια, που σχηματίζουν πιο ελαφριές κροκίδες από τους υπόλοιπους μικροοργανισμούς δεν απομακρύνονται από τον πυθμένα της δεξαμενής αλλά επανακυκλοφορούνται συνεχώς μέσα στο σύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αντιμετώπιση του προβλήματος της αργής ανάπτυξης των αναπνοο και δίνεται η δυνατότητα στο σύστημα να πραγματοποιεί απομάκρυνση μεγαλύτερης ποσότητας αζώτου. Στο παρακάτω σκαρίφημα παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της διάταξης των δεξαμενών.



Σχήμα 10: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης 1.

Η δεύτερη διάταξη των δεξαμενών έχει παρόμοια γεωμετρία με την πρώτη, με την διαφορά ότι η ανοξική δεξαμενή τοποθετήθηκε μετά την Δεξαμενή Τελικής Καθίζησης. Πιο συγκεκριμένα τα λύματα που υπερχειλίζουν από την ΔΤΚ κατευθύνονται στην ανοξική δεξαμενή. Εκεί πραγματοποιείται η αναερόβια απομάκρυνση του αζώτου και στην συνέχεια κατευθύνονται στην δεξαμενή απολύμανσης για να διατεθούν με ασφάλεια στον υδάτινο αποδέκτη. Η δεύτερη διάταξη των δεξαμενών παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Σχήμα 11: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης 2.

4.2. Ανάλυση Ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα εύχρηστο εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται για να μελετηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου σε αλλαγές που πραγματοποιούνται στις τιμές των παραμέτρων του. Η διαδικασία αυτή έχει ως στόχο την υπόδειξη των παραμέτρων, οι μεταβολές των οποίων επηρεάζουν πιο πολύ από τις υπόλοιπες τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Noutsopoulos et. Al., 2019).

Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, οι οποίες επιλέγονται από τον ερευνητή ανάλογα με τον στόχο του. Μια σημαντική κατηγοριοποίηση είναι η διάκριση των μεθόδων σε καθολικές και τοπικές. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται με κριτήριο τον τρόπο επιλογής των τιμών των παραμέτρων. Επίσης, οι μέθοδοι είναι δυνατόν να διακριθούν με κριτήριο τον τρόπο που μεταβάλλονται οι τιμές των παραμέτρων. Σε αυτήν την περίπτωση ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις μεθόδους «one-at-a-time», στις οποίες μεταβάλλεται μία παράμετρος κρατώντας τις υπόλοιπες σταθερές. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις μεθόδους, που αποκαλούνται «all-at-a-time». Σε αυτές μεταβάλλονται οι τιμές όλων των παραμέτρων ταυτόχρονα.

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε μια «one-at-a-time» μέθοδος. Η ανάλυση ευαισθησίας στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται για την εύρεση των παραμέτρων, που επηρεάζουν πιο πολύ τις τιμές των πιο σημαντικών μεταβλητών, μέσω ενός συντελεστή. Η επιλογή των τιμών αναφοράς έγινε από το σενάριο αναφοράς, που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο υπολογισμός του συντελεστή έγινε με την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$S_{py} = \frac{\frac{\Delta y}{y_0}}{\frac{\Delta p}{p_0}}$$

Δy : είναι η μεταβολή της μεταβλητής εξόδου σε σχέση με την τιμή της στο σενάριο αναφοράς.

y_0 : είναι η τιμή αναφοράς της μεταβλητής εξόδου

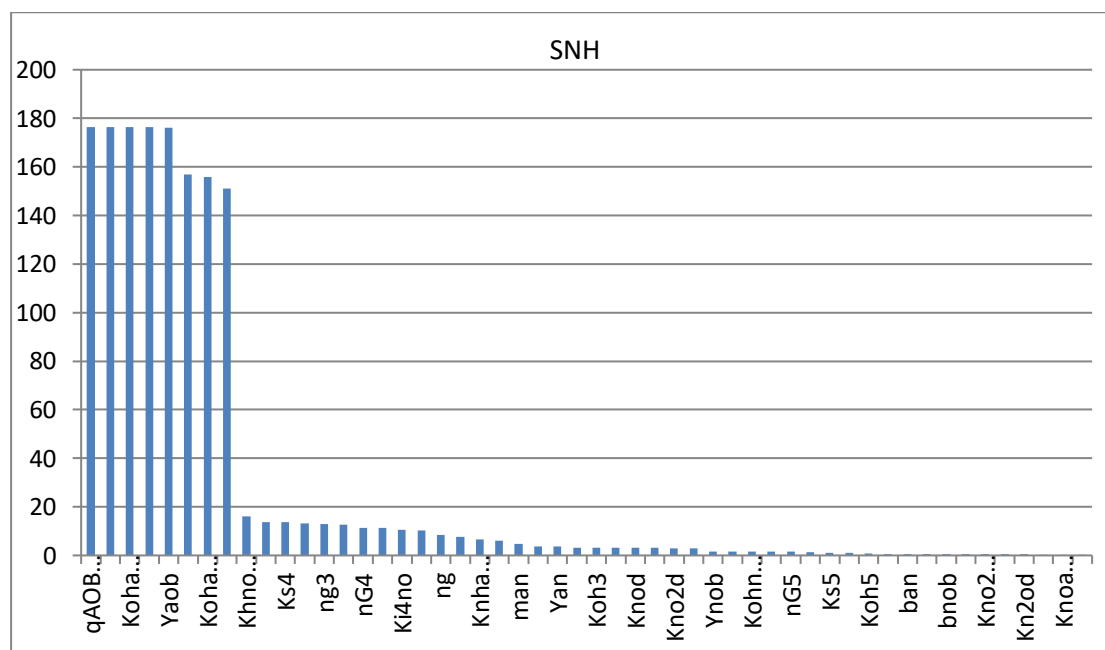
Δp : είναι η μεταβολή της παραμέτρου σε σχέση με την τιμή της στο σενάριο αναφοράς

p_0 : είναι η τιμή αναφοράς της εκάστοτε παραμέτρου

Σε κάθε παράμετρο που εξετάστηκε, πραγματοποιήθηκαν δύο διαταραχές. Στην πρώτη η τιμή της κάθε παραμέτρου μειώθηκε κατά 30% και στην δεύτερη αυξήθηκε κατά 30%. Από αυτές τις διαταραχές προέκυψαν δύο διαφορετικοί συντελεστές ευαισθησίας. Από αυτούς επιλέχθηκε να παρουσιαστεί ο μεγαλύτερος για κάθε περίπτωση. Οι τιμές των μεταβλητών εξόδου εξετάστηκαν στην ανοξική δεξαμενή (Position 10-18) και αποτελούν τις πλέον αντιπροσωπευτικές για την συμπεριφορά του μοντέλου στις μεταβολές των παραμέτρων του. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα ραβδωτά διαγράμματα κάθε μεταβλητής εξόδου. Στα διαγράμματα οι παράμετροι έχουν τοποθετηθεί κατά φθίνουσα σειρά, ξεκινώντας από τις πιο σημαντικές και καταλήγοντας σε αυτές που επηρεάζουν λιγότερο με την διαταραχή τους την εκάστοτε μεταβλητή εξόδου.

4.2.1. Πρώτη Διάταξη

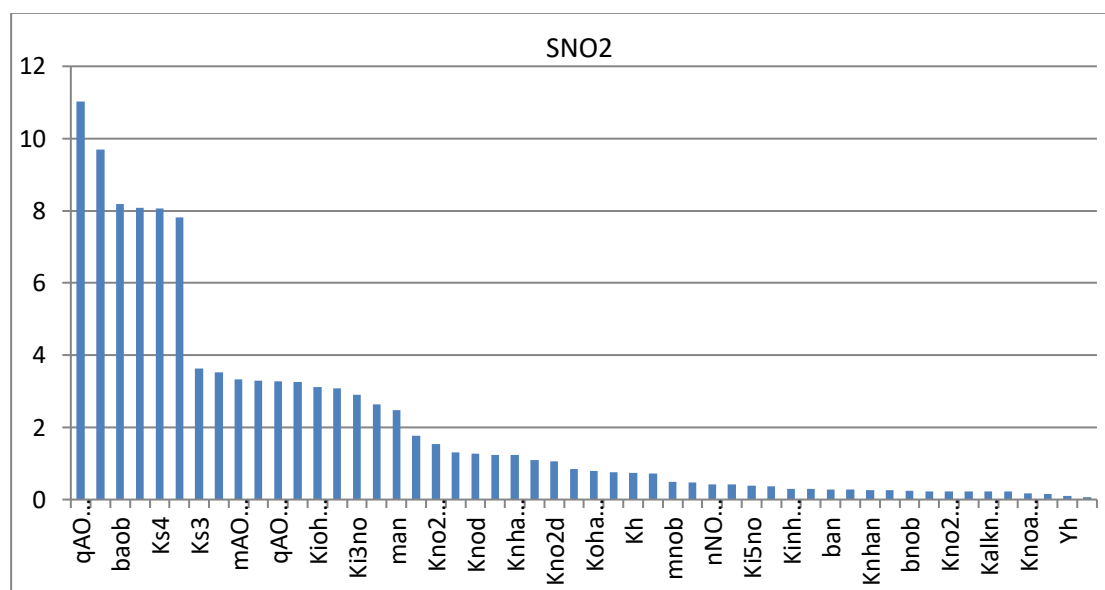
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα, που προέκυψαν για κάθε μεταβλητή στην ανάλυση ευαισθησίας της πρώτης διάταξης.



Σχήμα 12: Επίδραση των παραμέτρων στο αμμωνιακό άζωτο

Το αμμωνιακό άζωτο (SNH) επηρεάζεται περισσότερο από τις παρακάτω οχτώ παραμέτρους. Ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της υδροξυλαμίνης **qAOBAMO**

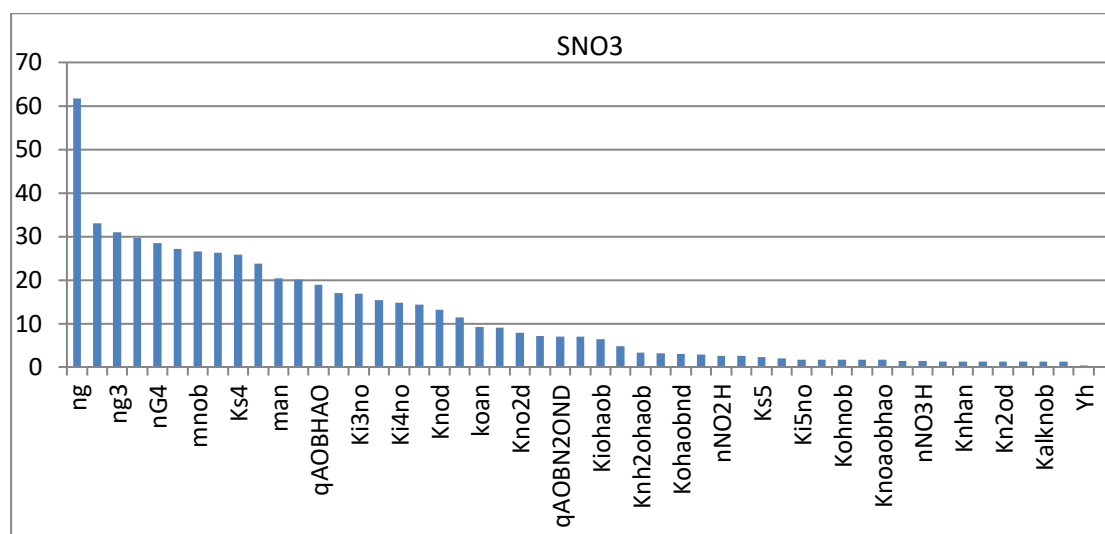
καθορίζει άμεσα την ποσότητα του SNH που χάνεται με την διαδικασία της μερικής νιτρωδοποίησης. Ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των AOB βακτηρίων **baob** επηρεάζει τον πληθυσμό τους και άρα την ταχύτητα πραγματοποίησης των κινητικών εξισώσεων, που καταναλώνουν το SNH. Ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την μετατροπή του SNH σε υδροξυλαμίνη **kohaob1** και ο αντίστοιχος για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης **kohaob2** επηρεάζουν τον πληθυσμό των AOB βακτηρίων. Επιπλέον, η σταθερά του υποξειδίου του αζώτου για περιορισμό του κορεσμού του οξυγόνου **Kiohaob**, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των AOB βακτηρίων **mAOBHAO**, η απόδοση ανάπτυξης βιομάζας των AOB **Yaob** και η μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των νιτροποιητών **qAOBN2OND** επιδρούν σημαντικά στον πληθυσμό των AOB και επομένως στην κατανάλωση της SNH.



Σχήμα 13: Επίδραση των παραμέτρων στα νιτρώδη

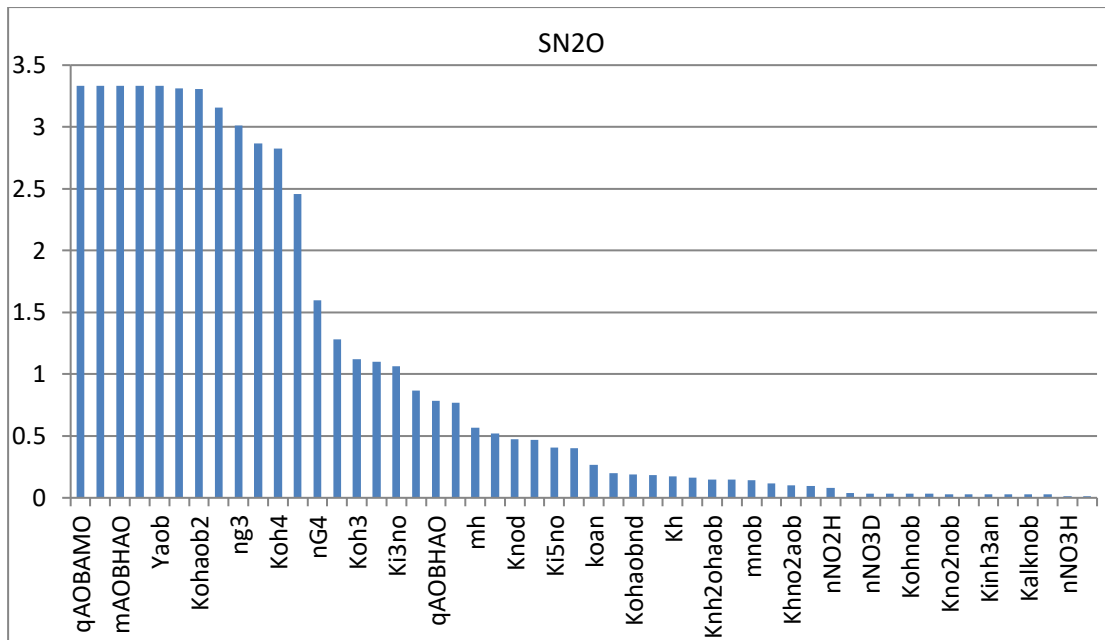
Ο μέγιστος ρυθμός της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης από το ένζυμο της αμμωνίας (qAOBAMO), ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των AOB βακτηρίων **baob**, η απόδοση ανάπτυξης βιομάζας των AOB **Yaob** και ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την μετατροπή του SNH σε υδροξυλαμίνη **kohaob1**, επιδρούν καθοριστικά στην συγκέντρωση των νιτρωδών, αφού εμπλέκονται στις διεργασίες της νιτρωδοποίησης και στην ανάπτυξη των AOB. Επίσης, ο συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου **ks4** και ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατά την μετατροπή του νιτρικού

οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου επηρεάζουν την διαδικασία της απονιτροποίησης και έχουν σημαντική επίδραση στην συγκέντρωση των νιτρικών.



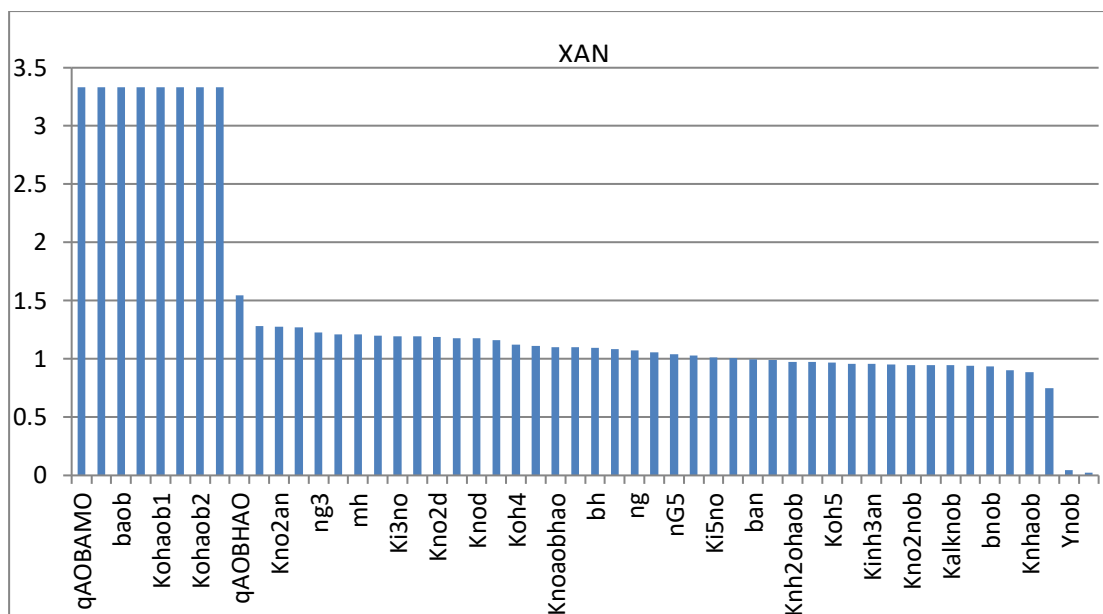
Σχήμα 14: Επίδραση των παραμέτρων στα νιτρικά

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ο διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών **ng** παίζει τον σπουδαιότερο ρόλο στην συγκέντρωση των νιτρικών **SNO3**. Καθορίζει τον πληθυσμό των απονιτροποιητικών μικροοργανισμών και επομένως την απόδοση της απονιτροποίησης. Είναι γεγονός ότι σε περιπτώσεις πλήρους απουσίας οργανικού άνθρακα στη δεξαμενή (ιδεατό σενάριο) η επίδραση της ανωτέρω παραμέτρου στη συγκέντρωση των νιτρικών στην ανοξική δεξαμενή θα ήταν αμελητέα.



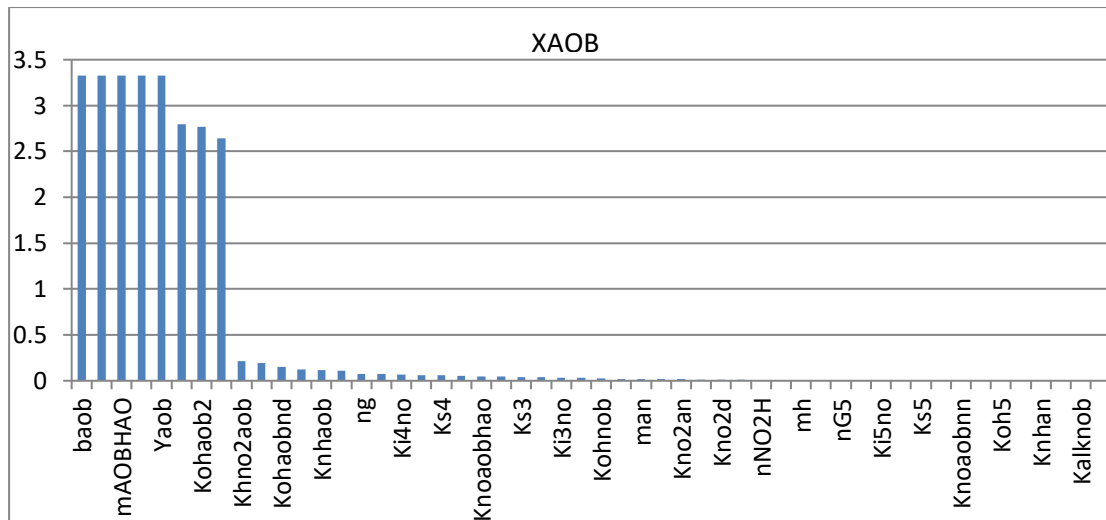
Σχήμα 15: Επίδραση των παραμέτρων στο υποξείδιο του αζώτου

Η συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου **SN2O** επηρεάζεται σημαντικά από δώδεκα παραμέτρους. Ο μέγιστος ρυθμός της οξειδωσης της υδροξυλαμίνης από το ένζυμο της αμμωνίας – την μονοοξυγενάση **qAOBAMO**, ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των αυτοτροφικών βακτηρίων **baob**, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων **mAOBHAO**, ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας- την μονοοξυγενάση **Kohaob1**, η μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των νιτροποιητών **qAOBN2OND**, ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου στην αντίδραση της υδροξυλαμίνης **kohaob2** και η σταθερά του υποξειδίου του αζώτου για περιορισμό κορεσμού του οξυγόνου **kiohaob** επηρεάζουν σημαντικά την συγκέντρωση του SN2O. Συμμετέχουν στην διεργασία της νιτροποίησης, η οποία έχει ως ενδιάμεσο στάδιο την παραγωγή SN2O. Επίσης, η απόδοση των Αυτοτροφικών Οξειδωτικών Βακτηρίων **Yaob** είναι σημαντική και επηρεάζει την ταχύτητα της προαναφερθείσας κινητικής διεργασίας. Σημαντικό ρόλο παίζουν ο ανοξικός μειωτικός συντελεστής μετατροπής νιτρώδων σε νιτρικό άζωτο **ng3**, ο συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου **ks4**, ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατά την μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου **koh4** και ο συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά την μετατροπή των νιτρώδων σε νιτρικό άζωτο **ks3**. Αυτές οι παράμετροι συμμετέχουν στην διεργασία της απονιτροποίησης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών που ως ενδιάμεσο στάδιο έχει την παραγωγή και κατανάλωση του N2O.



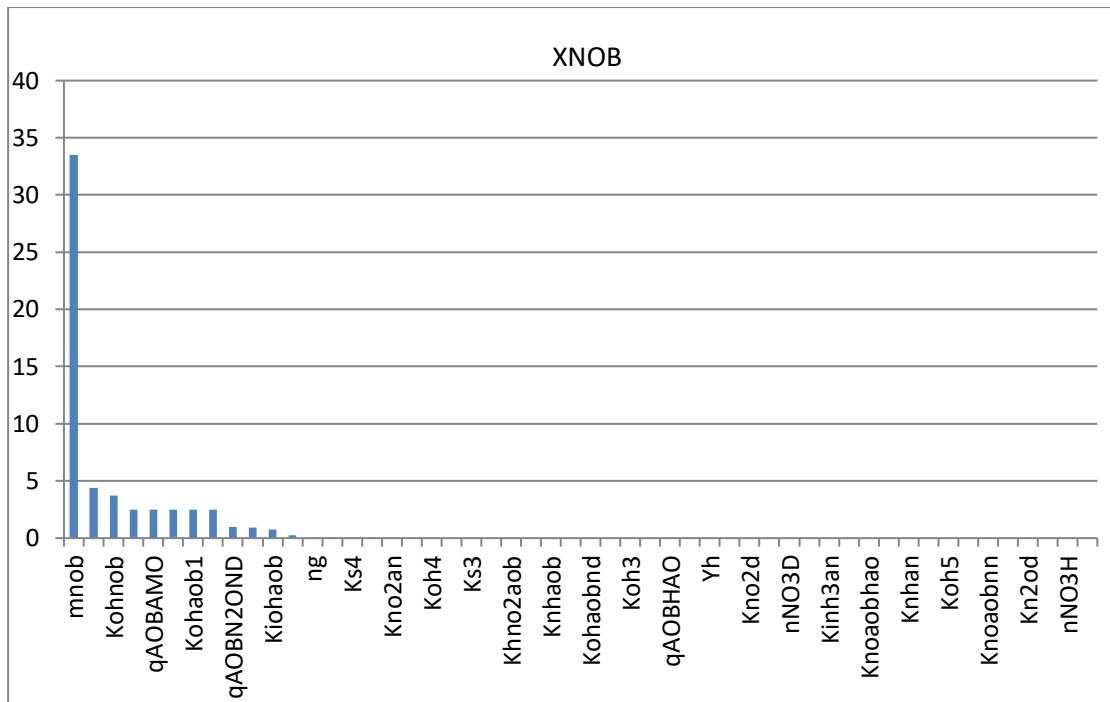
Σχήμα 16: Επίδραση των παραμέτρων στα ANAMMOX

Την μεγαλύτερη επίδραση στην συγκέντρωση των μικροοργανισμών anammox έχουν οκτώ παράμετροι. Αυτές είναι ο μέγιστος ρυθμός της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης από το ένζυμο της αμμωνίας- την μονοοξυγενάση **qAOBAMO**, ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των αυτοτροφικών βακτηρίων **baob**, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτοτροφικών βακτηρίων **mAOBHAO**, ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας- μονοοξυγενάση **kohaob1**, η μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των νιτροποιητών **qAOBN2OND**, ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου στην αντίδραση της υδροξυλαμίνης **kohaob2**, η σταθερά του υποξειδίου του αζώτου για περιορισμό κορεσμού του οξυγόνου **kihaob** και η απόδοση των Αυτοτροφικών Οξειδωτικών Βακτηρίων **baob**. Τα παραπάνω επηρεάζουν σημαντικά την διεργασία της μερικής νιτροδοποίησης και της αναχαίτησης των NOB βακτηρίων που πρέπει να συμβούν για να αναπτυχθούν τα anammox.



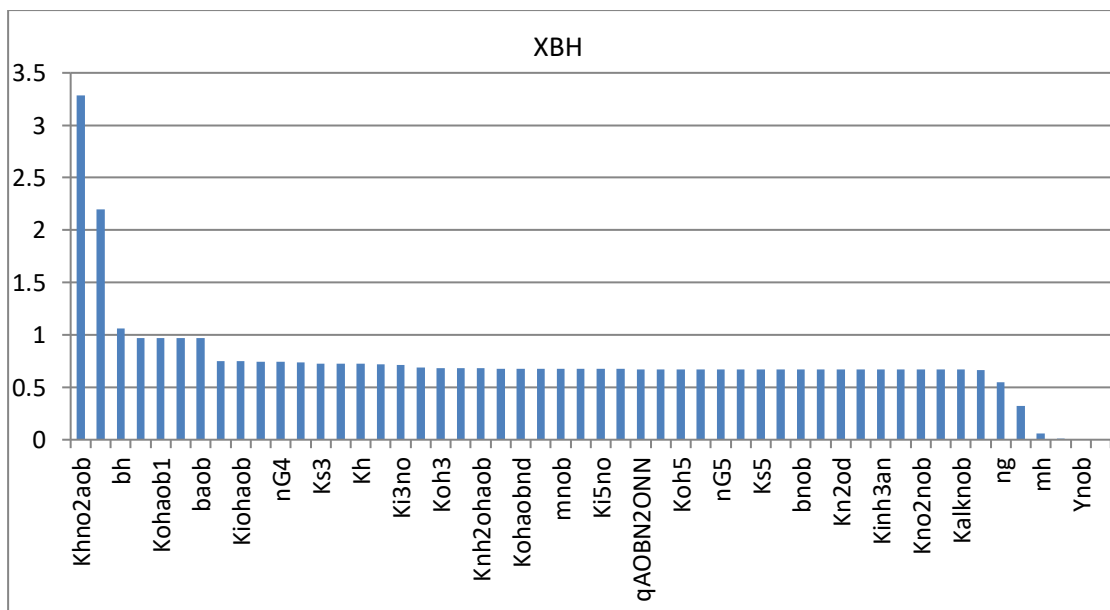
Σχήμα 17: Επίδραση των παραμέτρων στα αυτοτροφικά οξειδωτικά βακτήρια

Η συγκέντρωση των AOB βακτηρίων επηρεάζεται από οκτώ παραμέτρους. Ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των αυτοτροφικών βακτηρίων **baob** και η απόδοση των Αυτοτροφικών Οξειδωτικών Βακτηρίων **Yaob** έχουν σημαντική επίδραση και καθορίζουν άμεσα τον πληθυσμό των AOB. Επίσης η συγκέντρωσή τους επηρεάζεται σημαντικά από τον μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης αυτοτροφικών βακτηρίων **mAOBHAO**, τον μέγιστο ρυθμό κατάλυσης της υδροξυλαμίνης σε νιτρικά από το ένζυμο της υδροξυλαμίνης- της οξειδοαναγωγής **qAOBAMO**, τον συντελεστή κορεσμού του οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας- την μονοοξυγενάση **kohaob1**, τον συντελεστή κορεσμού του οξυγόνου στην αντίδραση της υδροξυλαμίνης **kohaob2** και την μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των νιτροποιητών **qAOBN2OND**. Οι παράμετροι αυτές καθορίζουν την απόδοση της νιτροποίησης, η οποία είναι καθοριστική για στην συγκέντρωση των AOB.



Σχήμα 18: Επίδραση των παραμέτρων στα νιτροποιητικά οξειδωτικά βακτήρια

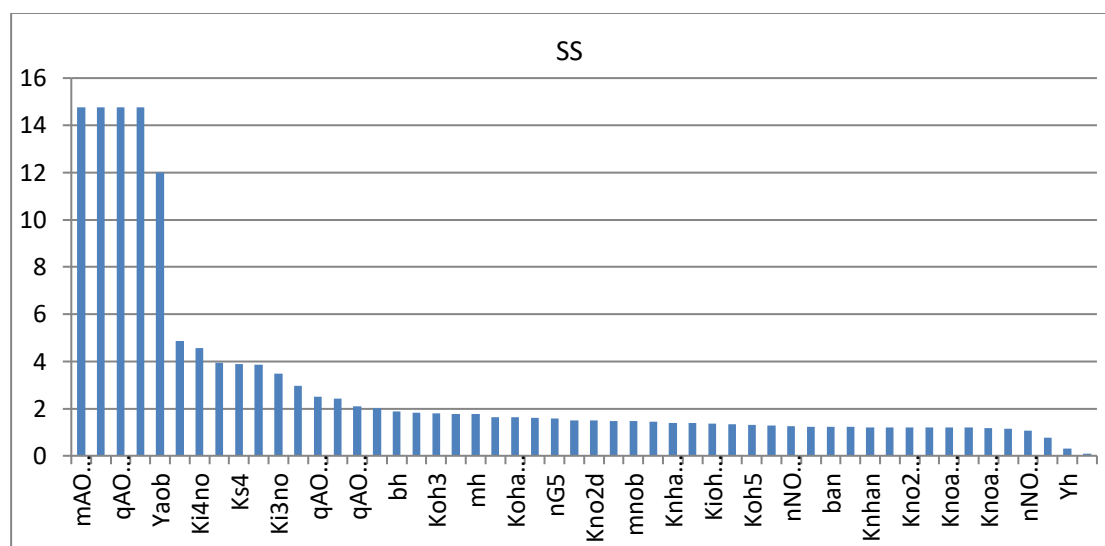
Η συγκέντρωση των NOB βακτηρίων εξαρτάται κυρίως από τον μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων **mnob**, ο οποίος καθορίζει την ταχύτητα πολλαπλασιασμού τους.



Σχήμα 19: Επίδραση των παραμέτρων στα ετεροτροφικά βακτήρια

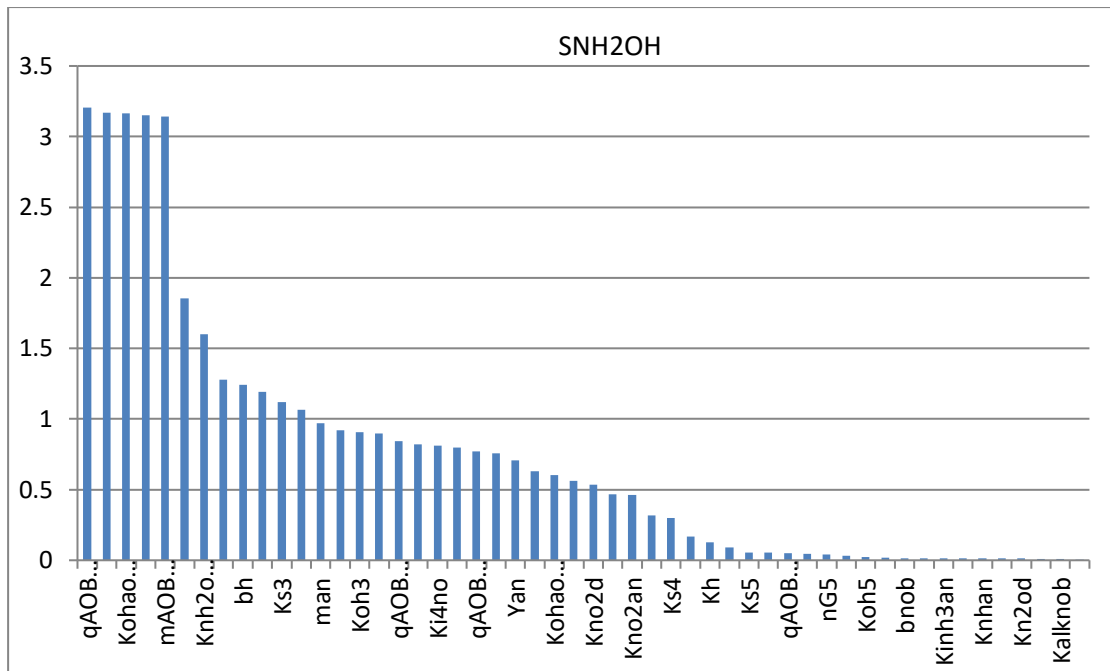
Η ανάπτυξη των ετεροτροφικών βακτηρίων φαίνεται ότι επηρεάζεται κυρίως από δύο παραμέτρους. Αυτές είναι ο συντελεστής κορεσμού του νιτρωδούς οξέος για

την απονιτροποίηση των νιτροποιητών **khno2aob** και η απόδοση στην σύνθεση της ετεροτροφικής βιομάζας **Yh**. Το **khno2aob** επηρεάζει την διεργασία της νιτροποίησης, η οποία με την σειρά της ευνοεί την ανάπτυξη των ετερότροφων απονιτροποιητικών μικροοργανισμών. Το **Yh** διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην συγκέντρωση των ΧΒΗ, επειδή επηρεάζει την απόδοση σχηματισμού της βιομάζας τους.



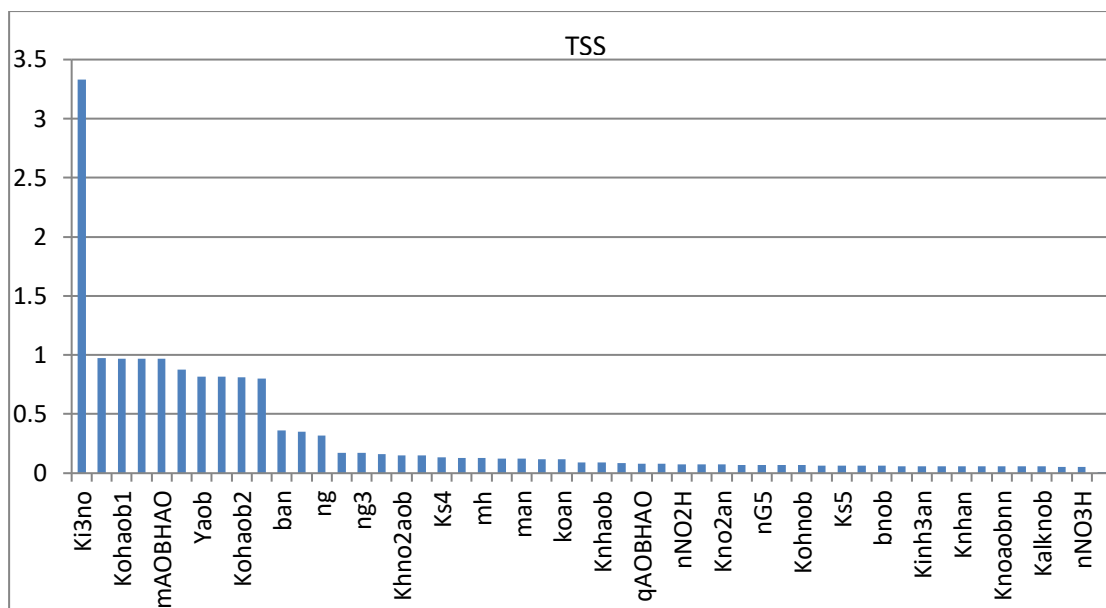
Σχήμα 20: Επίδραση των παραμέτρων στην εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη

Στην συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών επιδρούν πέντε παράμετροι σε μεγαλύτερο βαθμό. Ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των αυτοτροφικών βακτηρίων **baob**, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτοτροφικών βακτηρίων **mAOBHAO**, ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας- την μονοοξυγενάση **kohaob1**, η απόδοση Αυτοτροφικών Οξειδωτικών Βακτηρίων **Yaob** και ο μέγιστος ρυθμός κατάλυσης της υδροξυλαμίνης σε νιτρικά απο το ένζυμο της υδροξυλαμίνης-της οξειδοαναγωγής **qAOBAMO**. Η συγκέντρωση των SS μειώνεται από τους ετερότροφους μικροοργανισμούς που το καταναλώνουν κατά την ανάπτυξη τους. Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε στην ανοξική δεξαμενή στην οποία πραγματοποιείται η ανοξική ανάπτυξη των ετερότροφων μικροοργανισμών με κατανάλωση των νιτρικών. Συνεπώς οι παράμετροι που επηρεάζουν την συγκέντρωση των νιτρικών επηρεάζουν σημαντικά την συγκέντρωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης βιομάζας στην ανοξική δεξαμενή.



Σχήμα 21: Επίδραση των παραμέτρων στην υδροξυλαμίνη

Η συγκέντρωση της υδροξυλαμίνης επηρεάζεται καθοριστικά από πέντε παραμέτρους. Ο μέγιστος ρυθμός της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης από το ένζυμο της αμμωνίας- την μονοοξυγενάση **qAOBAMO**, ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας- την μονοοξυγενάση **kohaob1**, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτοτροφικών βακτηρίων **mAOBHAO**, ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των αυτοτροφικών βακτηρίων **baob** και η απόδοση των Αυτοτροφικών Οξειδωτικών Βακτηρίων **Yaob** επηρεάζουν την διεργασία της νιτροποίησης της οποίας ενδιάμεσο στάδιο αποτελεί η παραγωγή και η κατανάλωση της υδροξυλαμίνης NH₂OH.



Σχήμα 22: Επίδραση των παραμέτρων στα ολικά διαλυμένα στερεά

Η συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών επηρεάζεται κυρίως από τον συντελεστή κορεσμού του νιτρικού οξειδίου της οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή νιτρωδών σε νιτρικό άζωτο **ki3no**. Η συγκεκριμένη παράμετρος σχετίζεται με την ανοξική ανάπτυξη των ετερότροφων μικροοργανισμών οι οποίοι επηρεάζουν με την σειρά τους την συγκέντρωση των TSS.

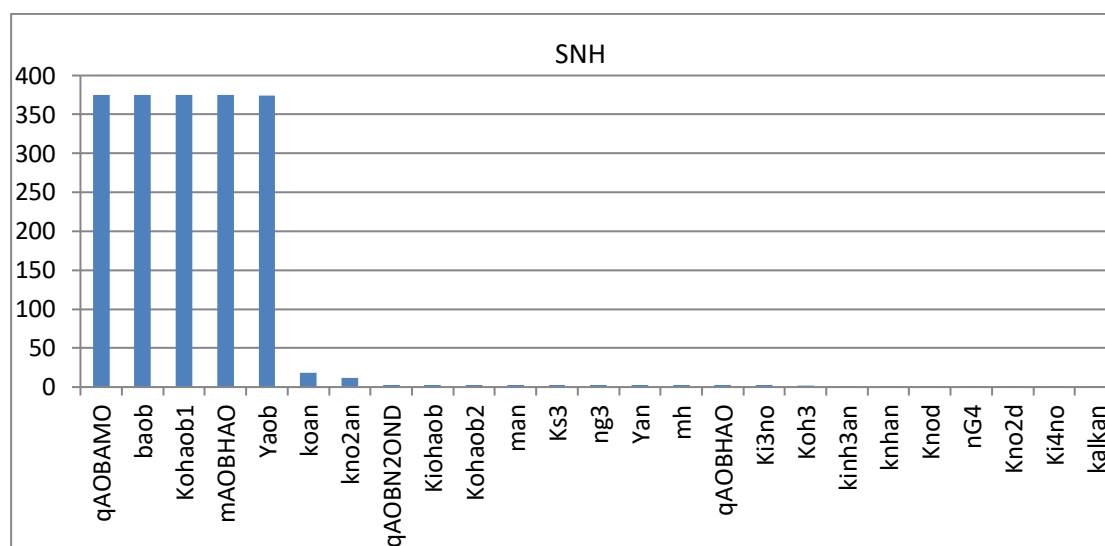
4.2.2. Δεύτερη διάταξη

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε και για την δεύτερη διάταξη των δεξαμενών για να εξεταστεί η επιρροή της χωρικής αλλαγής στο μοντέλο

Οι τιμές των παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας έχουν μια διαφοροποίηση σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, το οποίο θα αναλυθεί στην συνέχεια. Οι παράμετροι που τροποποιήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και οι υπόλοιπες παραμένουν ίδιες.

Πίνακας 5 : Η διαφοροποίηση των παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς

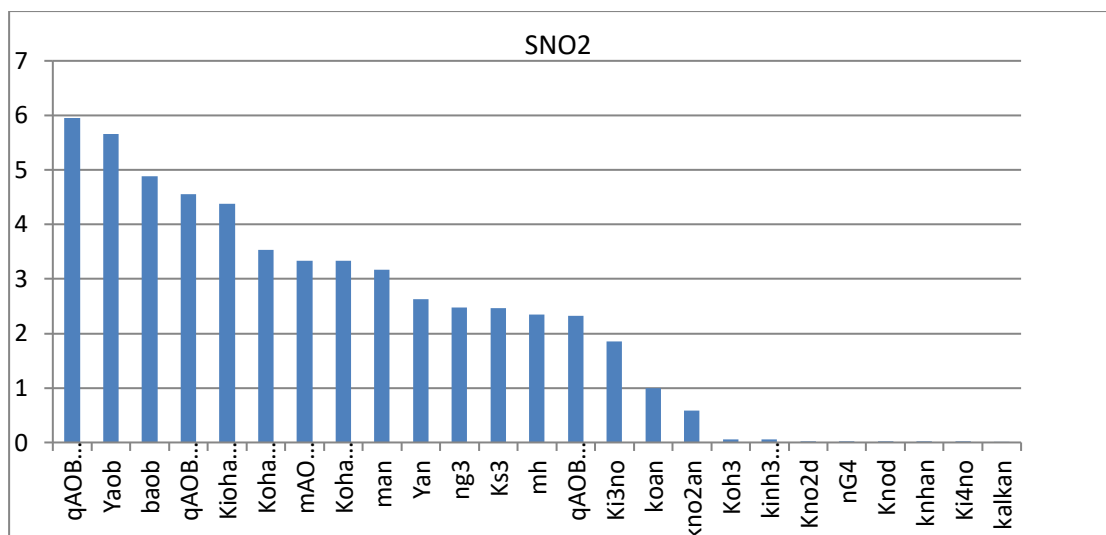
Συντελεστής κορεσμού του οξειγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας , μονοοξυγενάση	Kohaob1	1.5
Συντελεστής κορεσμού οξυγόνου για τα νιτροποιητικά βακτήρια	Kohnob	3.0



Σχήμα 23: Επίδραση των παραμέτρων στο αμμωνιακό άζωτο

Από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε ότι η μεγαλύτερη μεταβολή της αμμωνίας πραγματοποιείται για πέντε παραμέτρους. Αυτές είναι ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**, ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, ο συντελεστής κορεσμού για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση **kohaob1**, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων **maobhao** και ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob**. Τα qaobamo, kohaob1 και maobhao συμμετέχουν στις αντιδράσεις μετατροπής της αμμωνίας σε νιτρώδη. Τα baob και Yaob επηρεάζουν την συγκέντρωση των AOB, τα οποία συμμετέχουν και αυτά στην διεργασία της οξείδωσης της αμμωνίας.

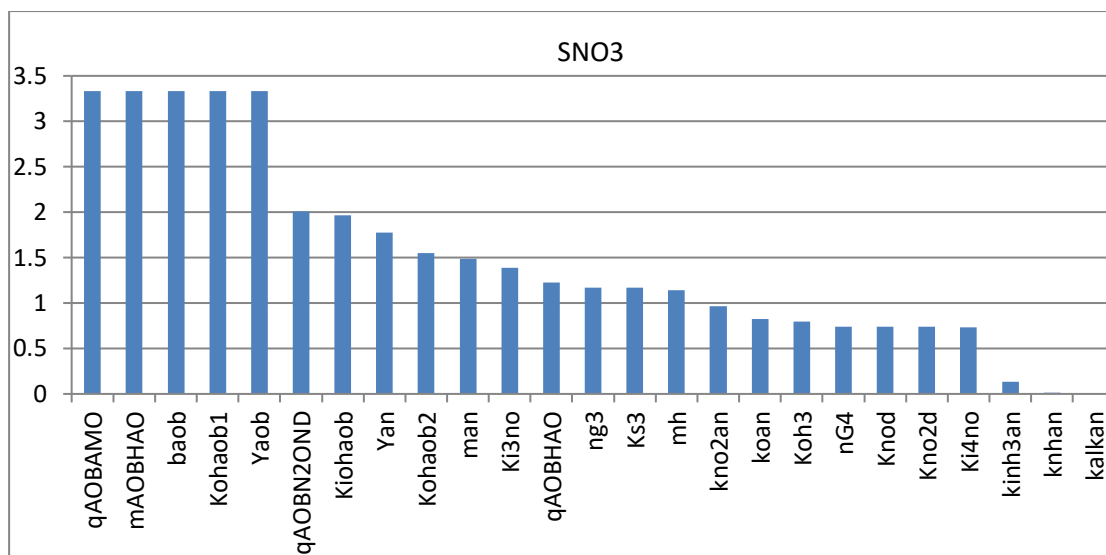
Οι παράμετροι που επηρεάζουν το αμμωνιακό άζωτο στην δεύτερη διάταξη είναι ίδιες με τις παραμέτρους που επιδρούν πιο καθοριστικά στην πρώτη διάταξη.



Σχήμα 24: επίδραση των παραμέτρων στα νιτρώδη

Στη μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρωδών συμβάλουν πιο καθοριστικά πέντε παράμετροι, ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**, ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob**, ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, η μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των απονιτροποιητών **qaobn2ond** και η σταθερά του υποξειδίου του αζώτου για τον περιορισμό κορεσμού του οξυγόνου **kiohaob**. Τα qaobamo, Yaob και baob επηρεάζουν τις διαδικασίες οξείδωσης της αμμωνίας σε νιτρώδη. Τα qaobn2ond και kiohaob επηρεάζουν την διεργασία της αναγωγής του νιτρώδους οξέος σε υποξείδιο του αζώτου.

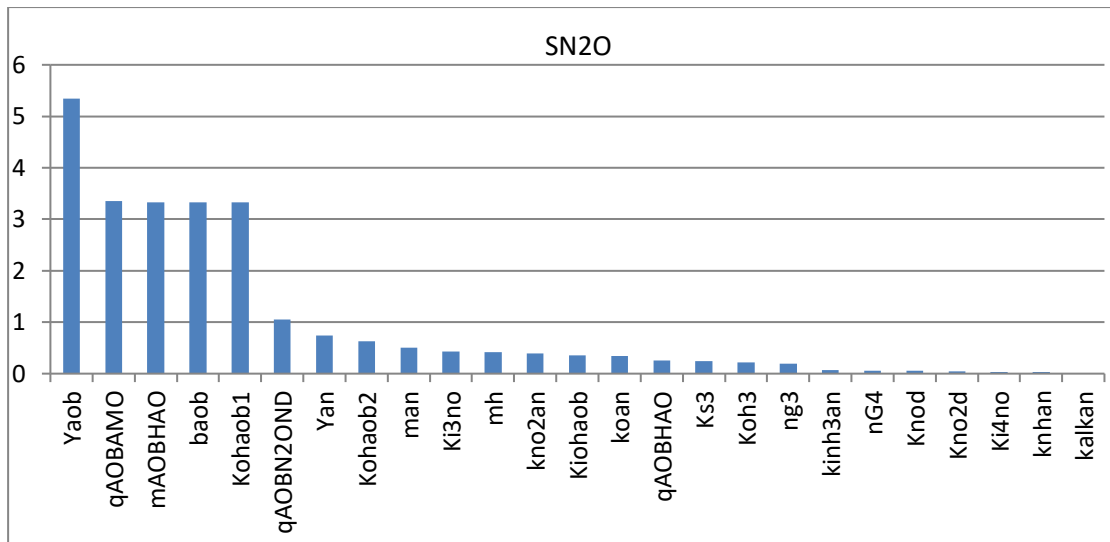
Στην δεύτερη διάταξη παρατηρούνται κάποιες διαφορές ως προς τις παραμέτρους που επηρεάζουν πιο καθοριστικά την συγκέντρωση των νιτρωδών. Στην πρώτη διάταξη οι διαφορετικές παράμετροι είναι ο συντελεστής κορεσμού για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοξυγενάση **kohaob1**, ο Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατά την μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου **koh4** και ο Συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου **ks4**. Η διαφορά είναι ότι στην πρώτη διάταξη επηρεάζει περισσότερο την συγκέντρωση των νιτρωδών η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.



Σχήμα 25: Επίδραση των παραμέτρων στα νιτρικά

Η μεταβολή της τιμής των νιτρικών επηρεάζεται περισσότερο από πέντε παραμέτρους. Ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων **maobhao**, ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, ο συντελεστής κορεσμού για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοξυγενάση **kohaob1** και ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob** είναι οι πιο σημαντικές. Οι παράμετροι αυτές συμμετέχουν στην διαδικασία της νιτρωδοποίησης, η οποία αποτελεί το πρώτο στάδιο της νιτροποίησης όπου το άζωτο που είναι δεσμευμένο στα λύματα μετατρέπεται σε νιτρικά.

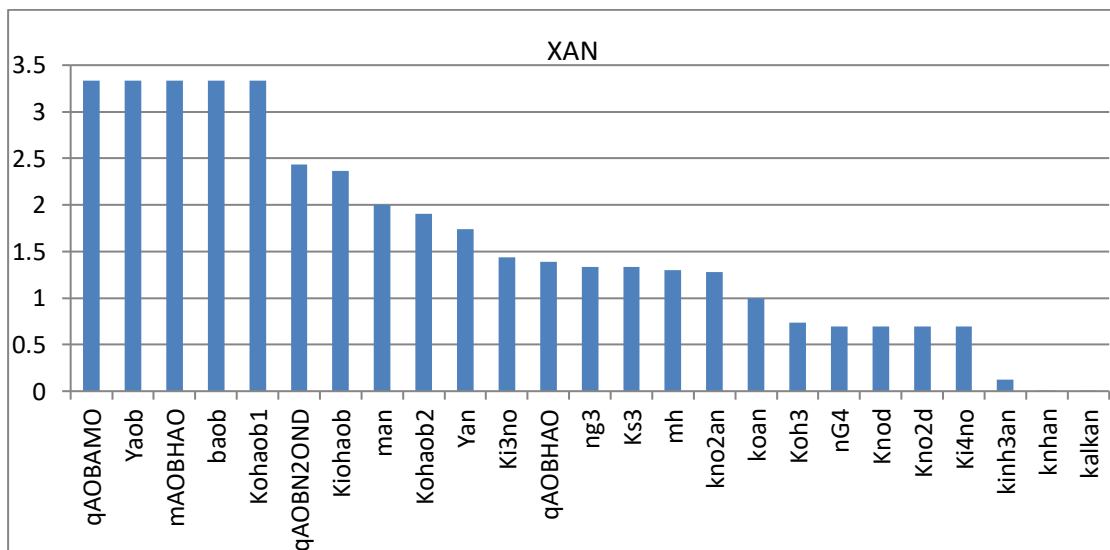
Τα νιτρικά στην πρώτη διάταξη επηρεάζονται περισσότερο από τον διορθωτικό συντελεστή για την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών **ng**.



Σχήμα 26: Επίδραση των παραμέτρων στο υποξείδιο του αζώτου

Όπως και στην περίπτωση των νιτρικών οι παράμετροι που επηρεάζουν πιο πολύ την μεταβολή του υποξειδίου του αζώτου είναι ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaoobamo**, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων **maobhao**, ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, ο συντελεστής κορεσμού για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοξυγενάση **kohaob1** και ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob**. Η νιτροδοποίηση είναι η διεργασία που επηρεάζει πιο πολύ την συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου καθώς παράγεται στα ενδιάμεσα στάδια της διεργασίας.

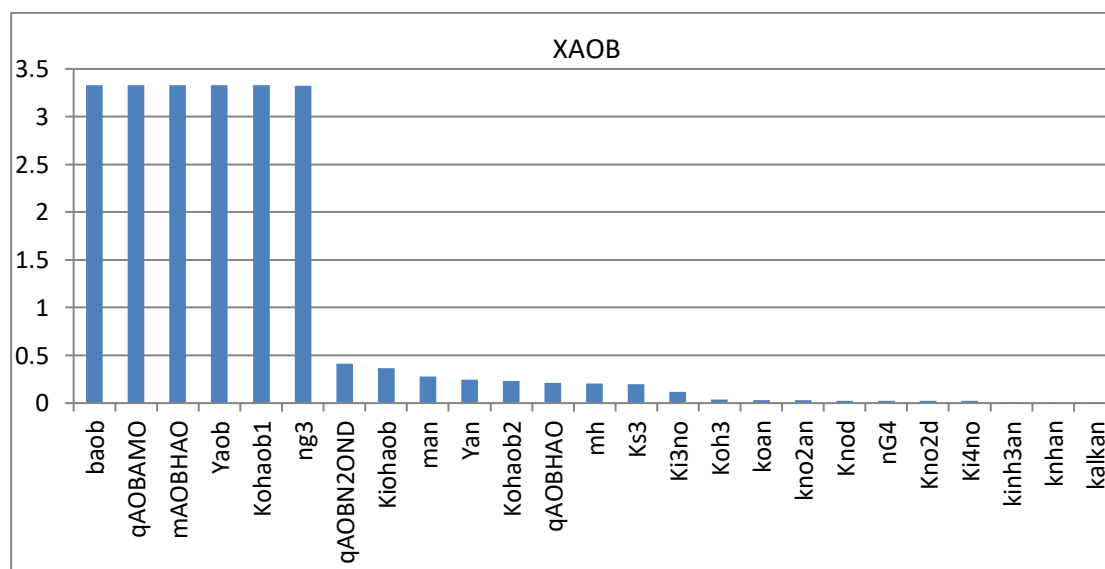
Οι παράμετροι που επηρεάζουν πιο πολύ την συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου στην δεύτερη διάταξη είναι οι ίδιες με αυτές που επηρεάζουν στην πρώτη.



Σχήμα 27: Επίδραση των παραμέτρων στα αναπνοοσ βακτήρια

Η συγκέντρωση της βιομάζας των αναπνοοχ βακτηρίων επηρεάζεται περισσότερο από επτά παραμέτρους. Αυτές είναι ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**, ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob**, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων **maobhao**, ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, ο συντελεστής κορεσμού για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοξυγενάση **kohaob1**, η μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των απονιτροποιητών **qaobn2ond** και η σταθερά του υποξειδίου του αζώτου για τον περιορισμό κορεσμού του οξυγόνου **kiohaob**. Από τις παραμέτρους γίνεται αντιληπτό ότι οι διεργασίες που επηρεάζουν περισσότερο την ανάπτυξη των αναπνοοχ είναι η νιτρωδοποίηση που παράγει τα νιτρώδη, τα οποία είναι απαραίτητα για την αναερόβια οξείδωση της αμμωνίας και η αγωγή του νιτρώδους οξέος σε υποξείδιο του αζώτου, η οποία αποτελεί στάδιο της μετατροπής των νιτρωδών σε υποξείδιο του αζώτου. Αν η αντίδραση αυτή ευνοηθεί καταναλώνει τα νιτρώδη που χρειάζονται τα αναπνοοχ για να οξειδώσουν την αμμωνία.

Στην πρώτη διάταξη επηρεάζει και ο Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου στην αντίδραση της υδροξυλαμίνης **kohaob2**, ενώ στην δεύτερη διάταξη επηρεάζει η μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των απονιτροποιητών **qaobn2ond**.

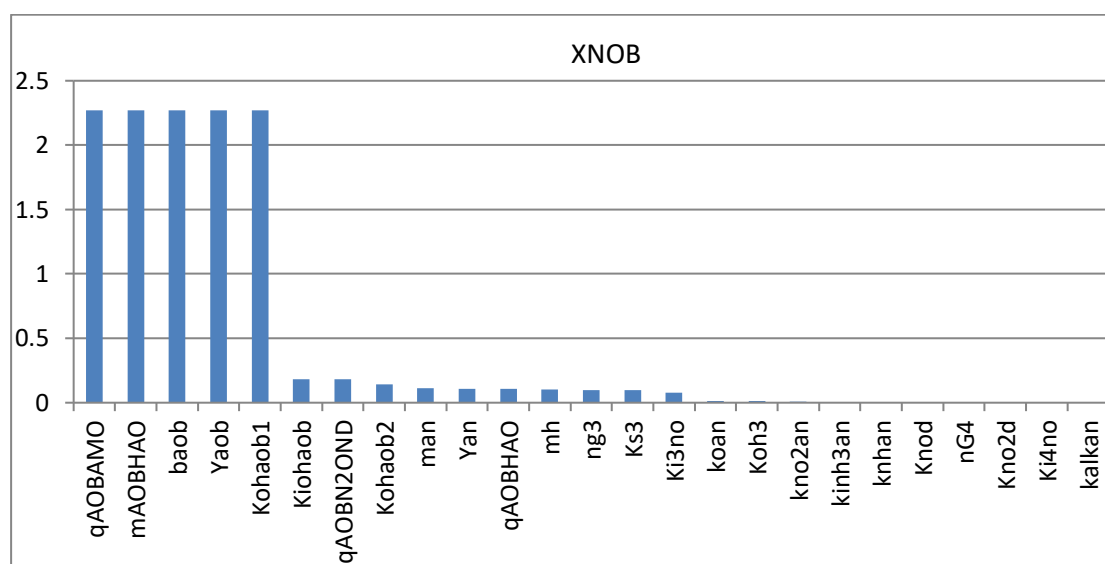


Σχήμα 28: Επίδραση των παραμέτρων στα AOB βακτήρια

Η μεταβολή της τιμής των αυτοτροφικών οξειδωτικών βακτηρίων επηρεάζεται περισσότερο από έξι μεταβλητές. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι είναι ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των

αυτοτροφικών βακτηρίων **maobhao**, ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob**, ο συντελεστής κορεσμού για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοξυγενάση **kohaob1** και ο ανοξικός μειωτικός συντελεστής μετατροπής νιτρωδών σε νιτρικό άζωτο **ng3**. Τα qaobamo, maobhao και kohaob1 συμμετέχουν στην διεργασία της νιτρωδοποίησης κατά την οποία αναπτύσσονται τα AOB. Επίσης, το baob επηρεάζει τον ρυθμό της φθοράς των AOB και το Yaob καθορίζει την ποσότητα των AOB που παράγονται για συγκεκριμένη ποσότητα αζώτου που καταναλώνουν. Τέλος, η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών που καταναλώνουν νιτρώδη επηρεάζει σημαντικά την συγκέντρωση των AOB καθώς τα νιτρώδη κυριαρχούν στην ανοξική δεξαμενή.

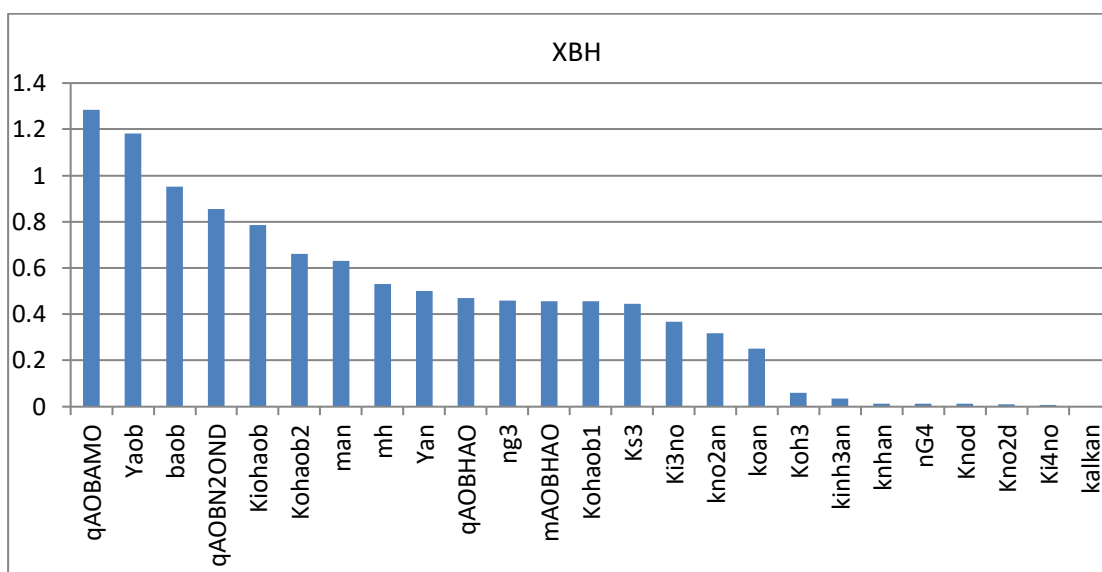
Στην δεύτερη διάταξη επηρεάζουν οι ίδιες παράμετροι με την πρώτη διάταξη και επιπλέον το **ng3**.



Σχήμα 29: Επίδραση των παραμέτρων στα NOB

Οι πέντε πιο καθοριστικές παράμετροι για την ανάπτυξη των νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων είναι ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων **maobhao**, είναι ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob** και ο συντελεστής κορεσμού για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοξυγενάση **kohaob1**. Επομένως βγαίνει το συμπέρασμα ότι η διεργασία της νιτρωδοποίησης είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη των NOB, των οποίων η ανάπτυξη γίνεται παρουσία νιτρωδών.

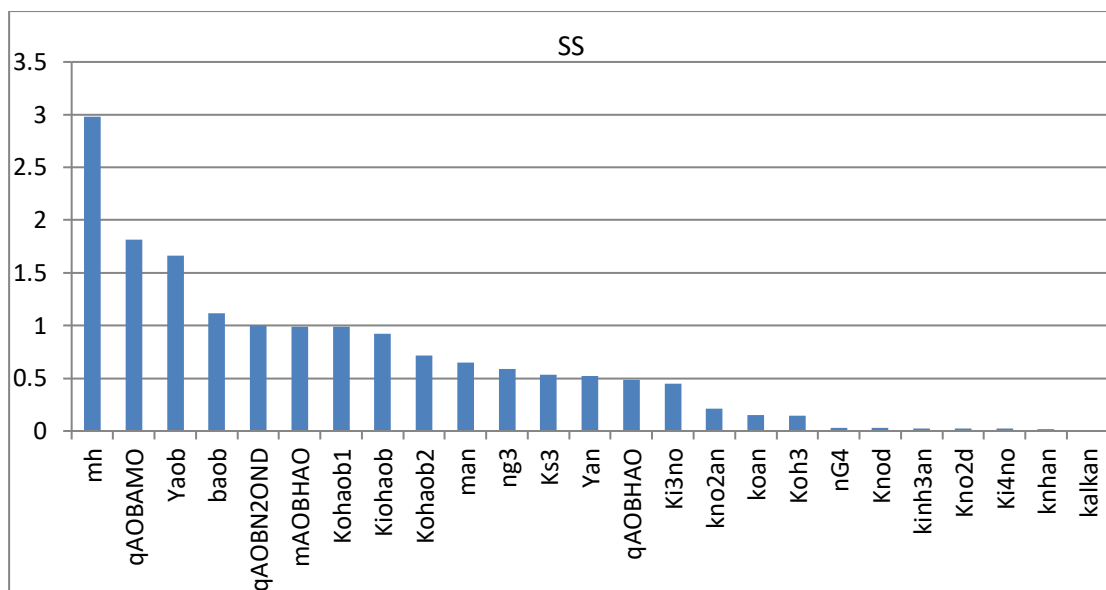
Στην πρώτη διάταξη η συγκέντρωση των NOB βακτηρίων επηρεάζεται περισσότερο από τον μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων. Ενώ στην δεύτερη διάταξη επηρεάζουν περισσότερο από τις παραμέτρους που καθορίζουν την συγκέντρωση των νιτρωδών.



Σχήμα 30: Επίδραση των παραμέτρων στους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς

Η μεταβολή της τιμής της συγκέντρωσης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών επηρεάζεται περισσότερο από τις εξής παραμέτρους: ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**, ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob**, ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, η μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των απονιτροποιητών **qaobn2ond** και η σταθερά του υποξειδίου του αζώτου για τον περιορισμό κορεσμού του οξυγόνου **kiohaob**. Επομένως, προκύπτει ότι οι διεργασίες που επηρεάζουν περισσότερο την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών είναι η νιτροδοποίηση και η αναγωγή του νιτρώδους οξέος σε υποξείδιο του αζώτου καθώς καταναλώνουν οξυγόνο, το οποίο χρειάζονται και οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί για να αναπτυχθούν.

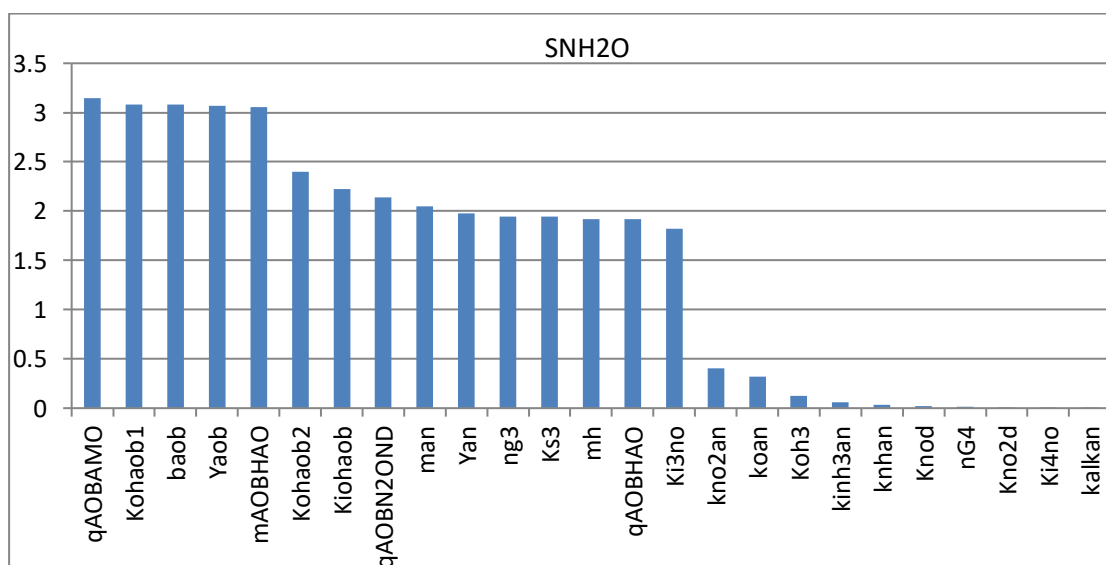
Στην πρώτη διάταξη παρατηρούνται διαφορές καθώς επηρεάζουν πιο πολύ ο Συντελεστής κορεσμού του νιτρώδους οξέως για την απονιτροποίηση των νιτροποιητών **Khno2aob** και η απόδοση της ετεροτροφικής βιομάζας **Yh**. Η μεγάλη διαφορά στις παραμέτρους που επηρεάζουν οφείλεται στην επανακυκλοφορία που πραγματοποιείται στην πρώτη διάταξη.



Σχήμα 31: Επίδραση των παραμέτρων στα διαλυμένα στερεά

Η παράμετρος που ξεχωρίζει όσον αφορά την μεταβολή της τιμής της εύκολα διασπάσιμης οργανικής ύλης είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας **mh**. Αυτό είναι λογικό καθώς η ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας πραγματοποιείται με την κατανάλωση της εύκολα διασπάσιμης οργανικής ύλης.

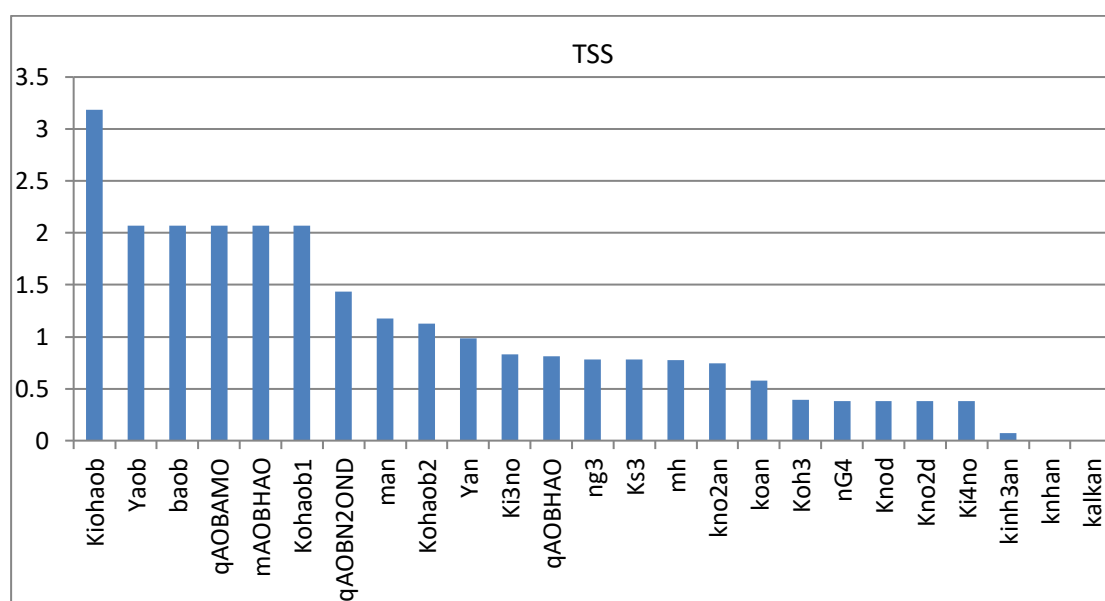
Παρατηρείται ότι στην πρώτη διάταξη επιδρούν περισσότερο ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτοτροφικών βακτηρίων, ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob** και ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**. Αυτό οφείλεται στην επίδραση της ανοξικής ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας, η οποία επηρεάζει περισσότερο στην πρώτη διάταξη.



Σχήμα 32: Επίδραση των παραμέτρων στην υδροξυλαμίνη

Ο ειδικός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη **qaobamo**, ο συντελεστής κορεσμού για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοξυγενάση **kohaob1**, ο συντελεστής αποσύνθεσης της βιομάζας των AOB **baob**, ο συντελεστής απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας **Yaob**, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων **maobhao** επηρεάζουν περισσότερο την συγκέντρωση της υδροξυλαμίνης. Συνεπώς οι πιο κρίσιμες αντιδράσεις είναι η οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη και η οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρικό άζωτο.

Στην δεύτερη διάταξη οι παράμετροι που επηρεάζουν της συγκέντρωση της υδροξυλαμίνης είναι οι ίδιες με τις αντίστοιχες στην πρώτη διάταξη.



Σχήμα 33: Επίδραση των παραμέτρων στα ολικά στερεά

Η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την συγκέντρωση των TSS είναι η σταθερά του υποξειδίου του αζώτου για τον περιορισμό κορεσμού του οξυγόνου **kiohaob**, η οποία συμμετέχει στην αναγωγή του νιτρώδους οξέος σε υποξείδιο του αζώτου και παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των αναπνοοχ βακτηρίων.

Στην πρώτη διάταξη η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο είναι ο Συντελεστής κορεσμού του νιτρικού οξειδίου οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή νιτρωδών σε νιτρικό άζωτο **ki3no**. Στην πρώτη διάταξη επηρεάζει σημαντικά η ανοξική ανάπτυξη των ετερότροφων μικροοργανισμών.

4.3. Σενάριο Αναφοράς της Πρώτης Διάταξης

Αρχικά, η προσομοίωση της πρώτης διάταξης των δεξαμενών έγινε με σκοπό την εύρεση των κατάλληλων λειτουργικών παραμέτρων, οι οποίες θα εκπληρώνουν

τους βασικούς στόχους. Έτσι τα κριτήρια επιλογής του σεναρίου αναφοράς ήταν η αναχαίτιση των NOB βακτηρίων, η μερική νιτρωδοποίηση της αμμωνίας και η πραγματοποίηση της ανοξικής απομάκρυνσης της αμμωνίας, μέσω της ανάπτυξης των αναπνοο βακτηρίων. Ο ορισμός του σεναρίου αναφοράς διευκολύνει την διερεύνηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση και δίνει μια καλή εικόνα, για το αν είναι δυνατή η πραγματοποίηση της ανοξικής απομάκρυνσης της αμμωνίας με ταυτόχρονη επίτευξη των ορίων εκροής, όπως ορίζει η νομοθεσία.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι το σενάριο αναφοράς περιγράφει μια ιδεατή κατάσταση, για την επίτευξη της οποίας έχει γίνει η ιδιαιτέρως ευνοϊκή θεώρηση της απομάκρυνσης μεγάλου μέρους του οργανικού άνθρακα των λυμάτων κατά την πρωτοβάθμια καθίζηση (>80%). Η επίτευξη τέτοιων ποσοστών απομάκρυνσης προϋποθέτει στην πράξη την υλοποίηση συστημάτων χημικής υποβοηθούμενης πρωτοβάθμιας επεξεργασίας ή την λειτουργία συστημάτων ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης στο στάδιο Α. Αυτό έγινε για την επίτευξη των στόχων που περιγράφηκαν και για να οριστεί ένα θεωρητικό όριο. Επίσης η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για θερμοκρασία περιβάλλοντος (20 °C), η οποία δεν αποτελεί την βέλτιστη κατάσταση για την ανάπτυξη των αναπνοο βακτηρίων, η οποία συνήθως ευνοείται από πιο υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος για την προσομοίωση είναι πολύ σημαντική η παραδοχή ότι πραγματοποιείται κατακρατηση των αναπνοο στην ΔTK με αποτέλεσμα να γίνεται άπειρος ο θεωρητικός χρόνος παραμονής τους στο σύστημα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται βιωσυσσώρευση.

4.3.1 Παρουσίαση του Σεναρίου Αναφοράς

Ο καθορισμός του υδραυλικού χρόνου παραμονής των λυμάτων στην δεξαμενή αερισμού και στην ανοξική δεξαμενή και του χρόνου παραμονής στερεών στο σύστημα ΒΑ-ΔTK έγινε με σκοπό την επίτευξη των στόχων της προσομοίωσης ταυτόχρονα με την διατήρηση όσο μικρότερων όγκων γίνεται. Επιπλέον, για την πραγματοποίηση της Α/Β διαδικασίας είναι απαραίτητο να επιλεγεί και η κατάλληλη παροχή του διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού. Οι παραπάνω λειτουργικές παράμετροι είναι άμεσα συσχετιζόμενες και οι αλλαγές που συμβαίνουν σε μία από αυτές επηρεάζουν και τις υπόλοιπες. Έτσι επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές:

Πίνακας 6: Λειτουργικές παράμετροι του σεναρίου αναφοράς

Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής στην δεξαμενή αερισμού (HRT)	6.0 h
Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής στην ανοξική δεξαμενή (HRT)	6.0 h
Χρόνος Παραμονής Στερεών (SRT)	9.3 d
Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού (SO)	2 mg/L

Όσον αφορά την σύσταση των εισερχόμενων λυμάτων ως προς τις διάφορες μορφές του αζώτου, τον οργανικό άνθρακα και την αλκαλικότητα, η επιλογή των περισσότερων τιμών έγινε από το προϋπάρχον μοντέλο. Επίσης, κάποια στοιχεία τέθηκαν με σκοπό την επίτευξη των στόχων του σεναρίου αναφοράς. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των μεταβλητών εισόδου:

Πίνακας 7: Συστατικά εισερχόμενων λυμάτων

Παράμετροι	Μονάδες Μέτρησης	Τιμές
Ολικός Οργανικός Άνθρακας COD _{total}	mg/L	629
Ολικό Άζωτο N _{total}	mg/L	135
Θερμοκρασία	°C	20
Αλκαλικότητα Salk	mg/L	500
Παροχή Λυμάτων	m ³ /s	0.717593

Η κλασματοποίηση των μεταβλητών εισόδου παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 8: Κλασματοποίηση COD και Αζώτου

Μεταβλητές	Σύμβολο	Ποσοστό
Δύσκολα Βιοδιασπάσιμο COD	Xs	63%
Εύκολα Βιοδιασπάσιμο COD	Ss	22%
Διαλυμένη Αδρανής Οργανική Ύλη	Si	4.8%
Σωματιδιακή Αδρανής Οργανική Ύλη	Xi	4.8%
Ετεροτροφική Βιομάζα	XBH	4.6%
Αμμωνιακά Οξειδωτικά Βακτήρια	XAOB	0.02%
Νιτρικά Οξειδωτικά Βακτήρια	XNOB	0.02%
Διαλυτό Αμμωνιακό Άζωτο	SNH	44.4%
Σωματιδιακό Οργανικό Άζωτο	XNV	55.6%

Οι βιοχημικές παράμετροι του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν από τις κινητικές εξισώσεις, για την αναπαράσταση των διεργασιών που συμβαίνουν στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων. Οι τιμές για τις περισσότερες από τις στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους του βασικού μοντέλου επιλέχθηκαν με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Επίσης μερικές παράμετροι ορίστηκαν με στόχο την επιτυχή ρύθμιση του μοντέλου. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι τιμές των κινητικών παραμέτρων: Ο βασικός στόχος για την επιτευξη της ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου είναι η αναχαίτηση των NOB βακτηρίων. Έτσι τροποποιήθηκαν οι παράμετροι που συμβάλουν στις κινητικές εξισώσεις ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας σε σχέση με την τιμή που λαμβάνουν στην βιβλιογραφία. Οι βασικές παράμετροι είναι ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας, μονοοξυγενάση **kohaob1**, ο συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου στην αντίδραση της υδροξυλαμίνης **kohaob2** και ο συντελεστής κορεσμού οξυγόνου για τα νιτροποιητικά βακτήρια **kohnob**.

Πίνακας 9: Δεδομένα κινητικών παραμέτρων της ετεροτροφικής βιομάζας

Ετεροτροφική Βιομάζα		
Κινητικές Παράμετροι	Σύμβολο	Τιμή στους 20°C
Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ετεροτροφικής βιομάζας	mh	6
Συντελεστής κορεσμού οξυγόνου	Koh	0.2
Συντελεστής κορεσμού της υδρόλυσης της αργά βιοδιασπάσιμης ύλης	Kx	0.03
Μέγιστος ειδικός ρυθμός υδρόλυσης	Kh	3
Συντελεστής κορεσμού νιτρικών	Kno3	0.5
Συντελεστής υδρόλυσης νιτρικών	nNO3H	0.6
Συντελεστής υδρόλυσης νιτρώδη	nNO2H	0.6
Συντελεστής κορεσμού νιτρώδη	Kno2	0.5
συντελεστής κορεσμού αμμωνιακού αζώτου	Knh	0.05
συντελεστής κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας	Ks	20

Συντελεστής κορεσμού αλκαλικότητας	Kalk	0.082
Μειωτικός συντελεστής απονιτροποίησης	nNO3D	0.8
Ανοξικός μειωτικός συντελεστής μετατροπής νιτρώδων σε νιτρικό άζωτο	ng3	0.6
Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατά την μετατροπή νιτρωδών σε νιτρικό άζωτο	Koh3	0.1
Συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά την μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικό άζωτο	Ks3	20
Συντελεστής κορεσμού του νιτρικού οξειδίου οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή νιτρωδών σε νιτρικό άζωτο	Ki3no	0.5
Ανοξικός μειωτικός συντελεστής μετατροπής του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου	nG4	0.6
Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατά την μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου	Koh4	0.1
Συντελεστής κορεσμού για το νιτρικό άζωτο στη μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου	Knod	0.05
Συντελεστής κορεσμού του νιτρικού οξειδίου οργανικής ύλης κατά την μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου	Ki4no	0.3
Συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου	Ks4	20
Ανοξικός μειωτικός συντελεστής μετατροπής του υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο	nG5	0.6

Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατα την μετατροπή του υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο	Koh5	0.1
Συντελεστής κορεσμού για το νιτρικό άζωτο κατα την μετατροπή του αέριου αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου	Kn2od	0.05
Συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατα την μετατροπή το υποξειδίου αζώτου σε αέριο άζωτο	Ks5	20
Συντελεστής κορεσμού του νιτρικού οξειδίου κατά την μετατροπή του υποξειδίου αζώτου σε αέριο άζωτο	Ki5no	0.075
Ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικής βιομάζας	bh	0.62
Μειωτικός συντελεστής αναερόβιας υδρόλυσης	nfe	0.4

Πίνακας 10: Δεδομένα κινητικών παραμέτρων αυτοτροφικής βιομάζας

Αυτοτροφική Βιομάζα		
Κινητικές Παράμετροι	Σύμβολο	Τιμή στους 20°C
Μέγιστος ρυθμός της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης από το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση	qAOBAMO	3.5
Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας , μονοοξυγενάση	Kohaob1	1.2
Συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης σε νιτρικά από το ένζυμο της αμμωνίας , μονοοξυγενάση	Knhaob	0.2

Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτοτροφικών βακτηρίων	mAOBHAO	0.8
Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου στην αντίδραση της υδροξυλαμίνης	Kohaob2	1
Συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου στην αντίδραση της	Knh2ohaob	0.9
Μέγιστος ρυθμός κατάλυσης της υδροξυλαμίνης σε νιτρικά από το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγής	qAOBHAO	5.5
Συντελεστής κορεσμού του νιτρικού οξειδίου στην αντίδραση της	Knoaobhao	0.0003
Μέγιστος ρυθμός παραγωγής υποξειδίου του αζώτου στην νιτροποίηση των νιτροποιητών	qAOBN2ONN	0.0078
Συντελεστής κορεσμού νιτρικού οξειδίου για την νιτροποίηση των νιτροποιητών	Knoaobnn	0.008
Μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των νιτροποιητών	qAOBN2OND	1.3008
Συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου στην αντίδραση της	Knh2ohaob	0.9
Συντελεστής κορεσμού του νιτρωδούς οξέως για την απονιτροποίηση των νιτροποιητών	Khno2aob	0.004
Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων	mnob	0.5
Συντελεστής κορεσμού οξυγόνου για τα νιτροποιητικά βακτήρια	Kohnob	2
Συντελεστής κορεσμού των νιτρωδών για τα νιτροποιητικά βακτήρια	Kno2nob	0.5

Συντελεστής κορεσμού των αλκαλικών για τα νιτροποιητικά βακτήρια	Kalknob	0.082
Ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των αυτοτροφικών βακτηρίων	baob	0.096
Ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των νιτροποιητικών βακτηρίων	bnob	0.096
Μέγιστη ειδική ταχύτητα ανάπτυξης αυτοτροφικής ANAMMOX βιομάζας	man	0.073
Σταθερά Monod για οξείδωση αμμωνιακού αζώτου από ANAMMOX	Knhan	0.05
Σταθερά Monod οξυγόνου για ανάπτυξη ANAMMOX βακτηρίων	koan	0.01
Σταθερά Monod για ανάπτυξη ANAMMOX με νιτρώδη	Kno2an	0.05
Συντελεστής κορεσμού ανάπτυξης ANAMMOX βακτηρίων λόγω παρουσίας ελεύθερης αμμωνίας	Kinh3an	150
Συντελεστής κορεσμού αλκαλικότητας για ανάπτυξη των ANAMMOX	Kalkan	1
Συντελεστής φθοράς αυτοτροφικής ANAMMOX βιομάζας	ban	0.003

Πίνακας 11: Δεδομένα στοιχειομετρικών παραμέτρων

Στοιχειομετρικές Παράμετροι	Σύμβολο	Τιμή στους 20°C
Απόδοση Ετεροτροφικής Βιομάζας	Yh	0.6
Απόδοση Αυτοτροφικών Οξειδωτικών Βακτηρίων	Yaob	0.18
Απόδοση Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτίων	Ynob	0.15
Συντελεστής παραγωγής	Yan	0.16

ANAMMOX βιομάζας		
Κομμάτι Βιομάζας που παράγει σωματιδιακά προϊόντα	fp	0.08
Μάζα αζώτου ανά μάζα COD στην βιομάζα	ixb	0.086
Μάζα αζώτου ανά μάζα COD στην αδρανή ύλη	iXP	0.01
Περιεκτικότητα Αζώτου στην αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη Xs	iNXS	0.04
Περιεκτικότητα Αζώτου στην ζυμώσιμη εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη Sf	iNSF	0.03
Περιεκτικότητα Αζώτου στην αδρανή διαλυμένη υλη	iNSI	0.01
Παραγωγή αδρανούς διαλυμένης οργανικής ύλης κατά την υδρόλυση	fSI	0
Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών	ng	0.8
Περιεκτικότητα Φωσφόρου στην αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη XS	iPXS	0.1
Περιεκτικότητα Φωσφόρου στην ζυμώσιμη εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη Sf	iPSF	0.1
Περιεκτικότητα Φωσφόρου στην αδιάλυτη αδρανή ύλη	iPXI	0.1
Περιεκτικότητα Φωσφόρου στην βιομάζα	iPBM	0.02
Περιεκτικότητα Φωσφόρου στην διαλυμένη αδρανή ύλη	iPSI	0

Με την ολοκλήρωση της ρύθμισης όλων των παραμέτρων, έγινε η προσομοίωση του σεναρίου αναφοράς. Τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στους παρακάτω πίνακες για κάθε παράμετρο και θέση της προσομοιούμενης ΕΕΛ:

Πίνακας 12: Αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς

Position	Q(mg/L)	SI (mg/L)	SS (mg/L)	XI(mg/L)	XS(mg/L)	XBH (mg/L)	XAOB (mg/L)	XNOB (mg/L)	XAN (mg/L)	SO (mg/L)	SNO (mg/L)	SNH (mg/L)	SNO2 (mg/L)
1	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
2	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
3	0.75	38.87	147.17	32.97	407.90	29.34	0.28	0.10	0.00	0.10	0.00	69.99	0.07
4	0.73	38.87	15.09	3.38	41.82	3.01	0.03	0.01	0.00	0.10	0.00	69.99	0.07
5	1.30	38.90	9.46	189.72	26.55	210.30	84.14	0.50	80.26	0.06	0.00	39.77	1.68
6	1.30	38.90	9.46	189.72	26.55	210.30	84.14	0.50	80.26	0.06	0.00	39.77	1.68
7	1.30	38.90	9.46	189.72	26.55	210.30	84.14	0.50	80.26	0.06	0.00	39.77	1.68
8	1.30	8.90	9.46	189.72	26.55	210.30	84.14	0.50	80.26	0.01	0.00	39.77	1.68
9	1.30	38.93	3.51	191.40	5.23	218.45	86.90	0.51	81.27	2.00	0.00	7.34	13.37
10-18	1.30	38.94	2.29	192.49	3.21	213.80	86.23	0.51	82.26	0.02	0.67	1.32	3.73
19	1.30	38.94	2.29	192.49	3.21	213.80	86.23	0.51	82.26	0.02	0.00	1.32	3.73
20	0.72	38.94	2.29	0.84	0.01	0.94	0.38	0.00	0.36	0.02	0.00	1.32	3.73
21	0.59	38.94	2.29	17.45	0.29	19.39	7.82	0.05	7.46	0.02	0.00	1.32	3.73
22	0.59	38.94	2.29	17.46	0.29	19.39	7.82	0.05	7.46	0.02	0.00	1.32	3.73
23	0.59	38.94	2.29	17.46	0.29	19.39	7.82	0.05	7.46	0.02	0.00	1.32	3.73
24	0.59	38.94	2.29	17.46	0.29	19.39	7.82	0.05	7.46	0.02	0.00	1.32	3.73
25	0.59	38.94	2.29	17.46	0.29	19.39	7.82	0.05	7.46	0.02	0.00	1.32	3.73
26	0.59	38.94	2.29	17.46	0.29	19.39	7.82	0.05	7.46	0.02	0.00	1.32	3.73
27	0.59	38.94	2.29	426.74	7.12	473.96	191.14	1.13	182.35	0.02	0.00	1.32	3.73
28	0.01	38.94	2.29	426.74	7.12	473.96	191.14	1.13	0.00	0.02	0.00	1.32	3.73
29	0.57	38.94	2.29	426.74	7.12	473.96	191.14	1.13	182.35	0.02	0.00	1.32	3.73
30	0.57	38.94	2.29	426.74	7.12	473.96	191.14	1.13	182.35	0.02	0.00	1.32	3.73
31	0.57	38.94	2.29	426.74	7.12	473.96	191.14	1.13	182.35	0.02	0.00	1.32	3.73
32	0.01	38.94	2.29	21.82	0.36	24.24	9.77	0.06	0.00	0.00	0.00	1.32	3.73
33	0.00	38.94	2.29	18254.94	304.56	20275.12	8176.51	48.32	0.00	0.00	0.00	1.32	3.73
34	0.72	38.94	2.29	0.84	0.01	0.94	0.38	0.00	0.36	0.02	0.00	1.32	3.73

Πίνακας 12: Αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς

Position	Q(mg/L)	SI (mg/L)	SS (mg/L)	XI(mg/L)	XS(mg/L)	XBH (mg/L)	XAOB (mg/L)	XNOB (mg/L)	XAN (mg/L)	SO (mg/L)	SNO (mg/L)	SNH (mg/L)	SNO2 (mg/L)
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.02	38.87	596.87	1203.47	14888.88	1071.01	10.09	3.70	0.00	0.10	0.00	69.99	0.07
38	0.01	38.87	596.87	4011.56	49629.61	3570.05	33.63	12.34	0.00	0.00	0.00	69.99	0.07
39	0.01	38.87	596.87	84.16	1041.18	74.90	0.71	0.26	0.00	0.00	0.00	69.99	0.07
40	0.01	38.88	565.56	4761.55	47032.40	4449.65	462.39	14.23	0.00	0.00	0.00	66.37	0.26
41	0.01	1312.23	361.71	6354.60	16556.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1680.39	0.00
42	0.01	1312.23	361.71	6354.60	16556.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1680.39	0.00
43	0.01	1312.23	361.71	352.85	919.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1680.39	0.00
44	0.03	243.82	312.67	101.57	590.34	41.85	4.35	0.13	0.00	0.00	0.00	300.70	1.57
45	0.00	1312.23	361.71	60656.14	158040.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1680.39	0.00

Πίνακας 13: Αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς

Position	SNO3 (mg/L)	SN2 (mg/L)	SN2O (mg/L)	SNH2OH (mg/L)	XNV (mg/L)	X(mg/L)	VSS (mg/L)	TSS (mg/L)	SALK (mg/L)	Ntot (mg/l)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
3	0.00	0.00	0.06	0.00	79.54	470.59	331.40	410.94	522.28	70.11
4	0.00	0.00	0.06	0.00	8.16	48.25	33.98	42.13	522.28	70.11
5	0.05	0.00	1.44	0.55	178.04	591.47	416.53	594.56	522.36	43.48
6	0.05	0.00	1.44	0.55	178.04	591.47	416.53	594.56	522.36	43.48
7	0.05	0.00	1.44	0.55	178.04	591.47	416.53	594.56	522.36	43.48
8	0.05	0.00	1.44	0.55	178.04	591.47	0.00	0.00	522.36	43.48
9	0.45	0.27	0.50	1.38	177.94	583.75	411.09	589.03	522.16	23.03
10-18	0.11	0.51	3.21	1.24	177.88	578.51	407.40	585.29	522.45	10.28
19	0.11	0.00	3.21	1.24	177.88	578.51	407.40	585.29	522.45	9.61

Position	SNO3 (mg/L)	SN2 (mg/L)	SN2O (mg/L)	SNH2OH (mg/L)	XNV (mg/L)	X(mg/L)	VSS (mg/L)	TSS (mg/L)	SALK (mg/L)	Ntot (mg/l)
20	0.11	0.00	3.21	1.24	0.78	2.53	1.78	2.56	522.45	9.61
21	0.11	0.00	3.21	1.24	16.13	52.46	36.94	53.07	522.45	9.61
22	0.11	0.00	3.21	1.24	16.13	52.46	36.94	53.07	522.45	9.61
23	0.11	0.00	3.21	1.24	16.13	52.46	36.94	53.08	522.45	9.61
24	0.11	0.00	3.21	1.24	16.13	52.46	36.95	53.08	522.45	9.61
25	0.11	0.00	3.21	1.24	16.13	52.47	36.95	53.08	522.45	9.61
26	0.11	0.00	3.21	1.24	16.13	52.47	36.95	53.08	522.45	9.61
27	0.11	0.00	3.21	1.24	394.12	1282.44	903.13	1297.24	522.45	9.61
28	0.11	0.00	3.21	1.24	394.12	1100.09	774.71	1168.83	522.45	9.61
29	0.11	0.00	3.21	1.24	394.12	1282.44	903.13	1297.24	522.45	9.61
30	0.11	0.00	3.21	1.24	394.12	1282.44	903.13	1297.24	522.45	9.61
31	0.11	0.00	3.21	1.24	394.12	1282.44	903.13	1297.24	522.45	9.61
32	0.11	0.00	3.21	0.00	20.15	56.25	39.62	59.77	522.45	8.37
33	0.11	0.00	3.21	1.24	16859.54	47059.46	33140.46	50000.00	522.45	9.61
34	0.11	0.00	3.21	1.24	0.78	2.53	1.78	2.56	522.45	9.61
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.00	0.00	0.06	0.00	2903.41	17177.15	12096.59	15000.00	522.28	70.11
38	0.00	0.00	0.06	0.00	9678.04	57257.17	40321.95	50000.00	522.28	70.11
39	0.00	0.00	0.06	0.00	203.04	1201.20	845.91	1048.95	522.28	70.11
40	0.01	0.00	0.22	0.07	10056.19	56720.21	39943.81	50000.00	522.29	66.93
41	0.00	0.00	0.00	0.00	10056.19	22911.57	16134.91	26191.10	3719.02	1680.39
42	0.00	0.00	0.00	0.00	10056.19	22911.57	16134.91	26191.10	3719.02	1680.39
43	0.00	0.00	0.00	0.00	558.38	1272.20	895.91	1454.30	3719.02	1680.39
44	0.05	0.00	1.35	0.00	184.45	738.24	519.89	704.34	1036.80	303.67
45	0.00	0.00	0.00	0.00	95988.59	218696.20	154011.40	250000.00	3719.02	1680.39

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου αναφοράς αναγράφεται η συγκέντρωση των μεταβλητών που μελετήθηκαν. Η στήλη position εκφράζει την θέση της ΕΕΛ και μπορεί να διαβαστεί μαζί με το σχήμα 9, όπου φαίνεται το σύνολο των θέσεων. Στη θέση 9 περιγράφεται η σύσταση των λυμάτων στην αερόβια δεξαμενή. Η πιο σημαντική διεργασία που πραγματοποιείται στην δεξαμενή αερισμού είναι η νιτροδοποίηση. Ο λόγος της αμμωνίας προς τα νιτρώδη μετά την πραγματοποίηση της μερικής νιτροδοποίησης είναι καθοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη των αναπνοχ στην ανοξική δεξαμενή. Για το σενάριο αναφοράς ο λόγος αυτός υπολογίστηκε ως 0.55. Στην θέση 10-18 βρίσκεται η ανοξική δεξαμενή, όπου πραγματοποιείται η ανοξική απομάκρυνση της αμμωνίας μέσω της ανάπτυξης των αναπνοχ βακτηρίων. Η τελική συγκέντρωση της αμμωνίας στην ανοξική δεξαμενή, μετά την πραγματοποίηση της ανοξικής απομάκρυνσης βρίσκεται στα 1.3 mg/L και των νιτρωδών στα 3.7 mg/L. Η συγκέντρωση των αναπνοχ στην ανοξική δεξαμενή αυξάνεται κατά 1 mg/L σε σχέση με την συγκέντρωση στην αερόβια δεξαμενή. Από την έρευνα των van Dongen et. al. (2001) έχει αποδειχθεί ότι η κατανάλωση της SNH:SNO₂ κατά την ανάπτυξη των αναπνοχ έχει λόγο 1.0:1.3. Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ο λόγος αυτός ισούται με 1:1,6 ο οποίος υπερβαίνει την ανωτέρω θεωρητική τιμή, γεγονός που καταδεικνύει ότι στην ανοξική δεξαμενή καταναλώθηκαν επιπλέον 1.84 mg/L SNO₂, τα οποία δεν οφείλονται στην ανάπτυξη των αναπνοχ. Είναι πολύ πιθανόν τα παραπάνω νιτρώδη στην ανοξική δεξαμενή να καταναλώνονται μέσω απονιτροποίησης των νιτροποιητών. Παρόλο που παράγονται νιτρικά στην ανοξική δεξαμενή μέσω της ανάπτυξης των αναπνοχ, παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσής τους κατά 0.34 mg/L σε σχέση με την δεξαμενή αερισμού. Η μείωση οφείλεται στους ετεροτροφικούς απονιτροποιητικούς μικροοργανισμούς, οι οποίοι καταναλώνουν νιτρικά και τα μετατρέπουν σε αέριο άζωτο συμβάλλοντας στην απομάκρυνση αζώτου από το σύστημα.

Συμπερασματικά, με βάση τα αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς φαίνεται ότι επιτυγχάνεται ικανοποιητική βιολογική απομάκρυνση αζώτου με συγκεντρωση ολικού αζώτου στην τελική εκροής ίση με 7 .mg/L. Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι αυτό αποτελεί ένα θεωρητικά βέλτιστο σενάριο το οποίο βασίζεται σε αρκετές 'ιδεατές' θεωρήσεις.-

4.4. Δεύτερο Εναλλακτικό Σενάριο

Το σενάριο αναφοράς προσομοιώθηκε ως μια εξιδανικευμένη κατάσταση, η οποία είναι σχεδόν απίθανο να επιτευχθεί κατά την λειτουργία μιας πραγματικής Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων. Με την πραγματοποίηση σειράς προσομοιώσεων, οι παράμετροι του μοντέλου ρυθμίστηκαν με τρόπο ώστε να

αναπαριστούν την λειτουργία της ΕΕΛ με παραμέτρους που βρίσκονται πιο κοντά στην διεθνή βιβλιογραφία. Οι στοιχειομετρικές και οι κινητικές παράμετροι της ετερότροφης βιομάζας παρέμειναν ίδιες και άρα φαίνονται στους πίνακες. Οι αλλαγές αφορούν τις παραμέτρους της αυτότροφης βιομάζας και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι και αυτό το σενάριο αποτελεί μια εξιδανικευμένη κατάσταση, η οποία είναι αρκετά απίθανο να επιτευχθεί στο πεδίο.

Πίνακας 14: Αλλαγές στα δεδομένα των παραμέτρων της αυτοτροφικής βιομάζας

Αυτοτροφική Βιομάζα		
Κινητικές Παράμετροι	Σύμβολο	Τιμή στους 20°C
Συντελεστής κορεσμού του οξειγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης με το ένζυμο της αμμωνίας, μονοοξυγενάση	Kohaob1	0.8
Συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης σε νιτρικά από το ένζυμο της αμμωνίας, μονοοξυγενάση	Knhaob	0.1
Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου στην αντίδραση της υδροξυλαμίνης	Kohaob2	0.5
Συντελεστής κορεσμού οξυγόνου για τα νιτροποιητικά βακτήρια	Kohnob	1.2

Το σενάριο προσομοιώθηκε σύμφωνα με τις παρακάτω λειτουργικές παραμέτρους:

Πίνακας 15: Λειτουργικές παράμετροι του δεύτερου σεναρίου

Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής στην δεξαμενή αερισμού (HRT)	6.0 h
Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής στην ανοξική δεξαμενή (HRT)	4.0 h
Χρόνος Παραμονής Στερεών (SRT)	6.0 d
Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού (SO)	2.5 mg/L

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 16: Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς

Position	Q (mg/L)	SI (mg/L)	SS (mg/L)	XI(mg/L)	XS(mg/L)	XBH (mg/L)	XAOB (mg/L)	XNOB (mg/L)	XAN (mg/L)	SO (mg/L)	SNO (mg/L)	SNH (mg/L)	SNO2 (mg/L)
1	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
2	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
3	0.76	38.96	145.63	32.62	403.53	29.09	0.32	0.10	0.00	0.09	0.00	69.39	0.18
4	0.74	38.96	14.93	3.34	41.36	2.98	0.03	0.01	0.00	0.09	0.00	69.39	0.18
5	1.31	38.99	9.68	112.62	26.76	148.28	64.94	0.43	50.21	0.06	0.00	40.30	2.87
6	1.31	38.99	9.68	112.62	26.76	148.28	64.94	0.43	50.21	0.06	0.00	40.30	2.87
7	1.31	38.99	9.68	112.62	26.76	148.28	64.94	0.43	50.21	0.06	0.00	40.30	2.87
8	1.31	38.99	9.68	112.62	26.76	148.28	64.94	0.43	50.21	0.01	0.00	40.30	2.87
9	1.31	39.01	4.83	114.12	6.54	155.80	67.93	0.44	50.86	2.50	0.00	11.20	17.77
10-18	1.31	39.03	2.93	115.09	3.63	152.35	67.46	0.44	52.18	0.02	0.55	2.89	6.34
19	1.31	39.03	2.93	115.09	3.63	152.35	67.46	0.44	52.18	0.02	0.00	2.89	6.34
20	0.72	39.03	2.93	0.50	0.02	0.66	0.29	0.00	0.23	0.02	0.00	2.89	6.34
21	0.60	39.03	2.93	10.40	0.33	13.77	6.10	0.04	4.72	0.02	0.00	2.89	6.34
22	0.60	39.03	2.93	10.40	0.33	13.77	6.10	0.04	4.72	0.02	0.00	2.89	6.34
23	0.60	39.03	2.93	10.40	0.33	13.77	6.10	0.04	4.72	0.02	0.00	2.89	6.34
24	0.60	39.03	2.93	10.40	0.33	13.77	6.10	0.04	4.72	0.02	0.00	2.89	6.34
25	0.60	39.03	2.93	10.40	0.33	13.77	6.10	0.04	4.72	0.02	0.00	2.89	6.34
26	0.60	39.03	2.93	10.40	0.33	13.77	6.10	0.04	4.72	0.02	0.00	2.89	6.34
27	0.60	39.03	2.93	253.19	7.97	335.18	148.42	0.97	114.79	0.02	0.00	2.89	6.34
28	0.02	39.03	2.93	253.19	7.97	335.18	148.42	0.97	0.00	0.02	0.00	2.89	6.34
29	0.57	39.03	2.93	253.19	7.97	335.18	148.42	0.97	114.79	0.02	0.00	2.89	6.34
30	0.57	39.03	2.93	253.19	7.97	335.18	148.42	0.97	114.79	0.02	0.00	2.89	6.34
31	0.57	39.03	2.93	253.19	7.97	335.18	148.42	0.97	114.79	0.02	0.00	2.89	6.34
32	0.02	39.03	2.93	12.85	0.40	17.01	7.53	0.05	0.00	0.00	0.00	2.89	6.34
33	0.00	39.03	2.93	16170.32	509.33	21406.32	9478.96	61.73	0.00	0.00	0.00	2.89	6.34
34	0.72	39.03	2.93	0.50	0.02	0.66	0.29	0.00	0.23	0.02	0.00	2.89	6.34

Πίνακας 16: Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς

Position	Q (mg/L)	SI (mg/L)	SS (mg/L)	XI(mg/L)	XS(mg/L)	XBH (mg/L)	XAOB (mg/L)	XNOB (mg/L)	XAN (mg/L)	SO (mg/L)	SNO (mg/L)	SNH (mg/L)	SNO2 (mg/L)
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.02	38.96	596.86	1203.38	14884.75	1072.93	11.76	3.71	0.00	0.09	0.00	69.39	0.18
38	0.01	38.96	596.86	4011.25	49615.82	3576.42	39.21	12.38	0.00	0.00	0.00	69.39	0.18
39	0.01	38.96	596.86	84.15	1040.89	75.03	0.82	0.26	0.00	0.00	0.00	69.39	0.18
40	0.01	38.96	563.00	4704.37	46816.54	4592.80	577.31	15.20	0.00	0.00	0.00	65.60	0.53
41	0.01	1318.48	362.13	6388.66	16616.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1689.90	0.00
42	0.01	1318.48	362.13	6388.66	16616.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1689.90	0.00
43	0.01	1318.48	362.13	354.85	922.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1689.90	0.00
44	0.04	202.58	248.41	80.53	467.94	34.33	4.32	0.11	0.00	0.00	0.00	240.91	3.46
45	0.00	1318.48	362.13	60805.30	158150.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1689.90	0.00

Πίνακας 17: Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς

Position	SNO3 (mg/L)	SN2 (mg/L)	SN2O (mg/L)	SNH2OH (mg/L)	XNV(mg/L)	X(mg/L)	VSS(mg/L)	TSS(mg/L)	SALK(mg/L)	Ntot (mg/l)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
3	0.00	0.00	0.08	0.00	78.72	465.66	327.93	406.65	522.76	69.66
4	0.00	0.00	0.08	0.00	8.07	47.73	33.61	41.68	522.76	69.66
5	0.07	0.00	1.35	0.55	117.27	403.24	283.97	401.24	522.86	45.14
6	0.07	0.00	1.35	0.55	117.27	403.24	283.97	401.24	522.86	45.14
7	0.07	0.00	1.35	0.55	117.27	403.24	283.97	401.24	522.86	45.14
8	0.07	0.00	1.35	0.55	117.27	403.24	0.00	0.00	522.86	45.14

Position	SNO3 (mg/L)	SN2 (mg/L)	SN2O (mg/L)	SNH2OH (mg/L)	XNV(mg/L)	X(mg/L)	VSS(mg/L)	TSS(mg/L)	SALK(mg/L)	Ntot (mg/l)
9	0.37	0.19	0.35	1.47	117.23	395.69	278.65	395.89	522.69	31.15
10-18	0.15	0.45	2.97	1.26	117.20	391.15	275.46	392.66	522.98	14.14
19	0.15	0.00	2.97	1.26	117.20	391.15	275.46	392.66	522.98	13.60
20	0.15	0.00	2.97	1.26	0.51	1.70	1.20	1.71	522.98	13.60
21	0.15	0.00	2.97	1.26	10.59	35.35	24.89	35.49	522.98	13.60
22	0.15	0.00	2.97	1.26	10.59	35.35	24.90	35.49	522.98	13.60
23	0.15	0.00	2.97	1.26	10.59	35.35	24.90	35.49	522.98	13.60
24	0.15	0.00	2.97	1.26	10.59	35.35	24.90	35.49	522.98	13.60
25	0.15	0.00	2.97	1.26	10.59	35.36	24.90	35.49	522.98	13.60
26	0.15	0.00	2.97	1.26	10.59	35.36	24.90	35.49	522.98	13.60
27	0.15	0.00	2.97	1.26	257.73	860.52	606.00	863.73	522.98	13.60
28	0.15	0.00	2.97	1.26	257.73	745.73	525.16	782.89	522.98	13.60
29	0.15	0.00	2.97	1.26	257.73	860.52	606.00	863.73	522.98	13.60
30	0.15	0.00	2.97	1.26	257.73	860.52	606.00	863.73	522.98	13.60
31	0.15	0.00	2.97	1.26	257.73	860.52	606.00	863.73	522.98	13.60
32	0.15	0.00	2.97	0.00	13.08	37.85	26.65	39.74	522.98	12.34
33	0.15	0.00	2.97	1.26	16460.09	47626.66	33539.91	50000.00	522.98	13.60
34	0.15	0.00	2.97	1.26	0.51	1.70	1.20	1.71	522.98	13.60
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.00	0.00	0.08	0.00	2903.86	17176.53	12096.14	15000.00	522.76	69.66
38	0.00	0.00	0.08	0.00	9679.52	57255.08	40320.48	50000.00	522.76	69.66
39	0.00	0.00	0.08	0.00	203.07	1201.16	845.88	1048.95	522.76	69.66
40	0.01	0.00	0.25	0.07	10066.04	56706.22	39933.96	50000.00	522.77	66.47
41	0.00	0.00	0.00	0.00	10066.04	23005.18	16200.83	26266.87	3772.54	1689.90
42	0.00	0.00	0.00	0.00	10066.04	23005.18	16200.83	26266.87	3772.54	1689.90
43	0.00	0.00	0.00	0.00	559.11	1277.80	899.86	1458.97	3772.54	1689.90

Position	SNO3 (mg/L)	SN2 (mg/L)	SN2O (mg/L)	SNH2OH (mg/L)	XNV(mg/L)	X(mg/L)	VSS(mg/L)	TSS(mg/L)	SALK(mg/L)	Ntot (mg/l)
44	0.08	0.00	1.62	0.00	146.72	587.23	413.54	560.26	938.35	246.07
45	0.00	0.00	0.00	0.00	95805.48	218956.20	154194.50	250000.00	3772.54	1689.90

Οι θέσεις των δεξαμενών της νέας προσομοίωσης διαβάζονται με τον ίδιο τρόπο όπως του σεναρίου αναφοράς. Στη θέση 9 διακρίνονται οι συγκεντρώσεις των μεταβλητών εξόδου στην αεριζόμενη δεξαμενή. Εκεί πραγματοποιείται η διεργασία της μερικής νιτρωδοποίησης. Η συγκέντρωση του $\text{SNH} = 11.2 \text{ mg/L}$ και των $\text{SNO}_2 = 17.8 \text{ mg/L}$ και ο λόγος τους είναι 0.63. Επίσης, η συγκέντρωση των αναπνοοβακτηρίων είναι $\text{XAN} = 50.9 \text{ mg/L}$, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι τα αναπνοοβακτηριακά κυκλώματα επανακυκλοφορούνται στο σύστημα από την Δεξαμενή Τελικής Καθίζησης και δεν απομακρύνονται μέσω της περίσσειας ιλύος. Οι συγκεντρώσεις των XNOB και των SNO_3 είναι 0.4 mg/L και 0.4 mg/L αντίστοιχα. Αυτό υποδεικνύει ότι είναι επιτυχής η μη ολοκλήρωση της διαδικασίας της νιτροποίησης και η αναχαίτιση των NOB βακτηρίων. Στην θέση 10-18 βρίσκεται η ανοξική δεξαμενή, όπου συμβαίνει η ανοξική απομάκρυνση του SNH με κατανάλωση του SNO_2 ως δότη ηλεκτρονίων για την πραγματοποίηση της οξειδωσης. Σε σχέση με το σενάριο αναφοράς η ανάπτυξη των XAN είναι ευνοϊκότερη, το οποίο οφείλεται στον μεγαλύτερο λόγο $\text{SNH}:\text{SNO}_2$. Παρόλα αυτά, οι συγκεντρώσεις των SNH και SNO_2 στην ανοξική δεξαμενή είναι μεγαλύτερες από ότι οι αντίστοιχες του σεναρίου αναφοράς επειδή παραμένουν μεγαλύτερες οι συγκεντρώσεις τους μετά την μερική νιτρωδοποίηση. Όπως φαίνεται στον πίνακα το $\text{SNH} = 2.9 \text{ mg/L}$ και τα $\text{SNO}_2 = 6.3 \text{ mg/L}$. Ειδικότερα η συγκέντρωση των SNO_2 είναι ιδιαίτερα δυσμενής και δεν είναι δυνατή η διάθεση των λυμάτων, με αυτή την σύσταση σε κάποιον υδάτινο αποδέκτη. Ενδεχομένως η πρόβλεψη μία επιπλέον ανοξικής δεξαμενής μετά την δεξαμενή καθίζησης στην οποία θα προστίθεται εύκολα βιοδιασπάσιμος οργανικός άνθρακας (π.χ. μεθανόλη) θα μπορούσε να οδηγήσει σε απομάκρυνση των νιτρωδών. Σε κάθε περίπτωση γίνεται αντιληπτό ότι η επιτυχής απομάκρυνση του αζώτου από τα λύματα, μέσω της ανάπτυξης των αναπνοοβακτηρίων, στην διάταξη 1 αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα τουλάχιστον για θερμοκρασίες 20°C , ακόμα και εάν έχει προηγηθεί πολύ σημαντική απομάκρυνση οργανικού άνθρακα μέσω χημικά υποβοηθούμενης πρωτοβάθμιας καθίζησης και εάν χρησιμοποιηθούν διατάξεις κατακράτησης των μικροοργανισμών αναπνοοβακτηρίων στο σύστημα ενεργού ιλύος.

4.5 Διερεύνηση των Λειτουργικών παραμέτρων

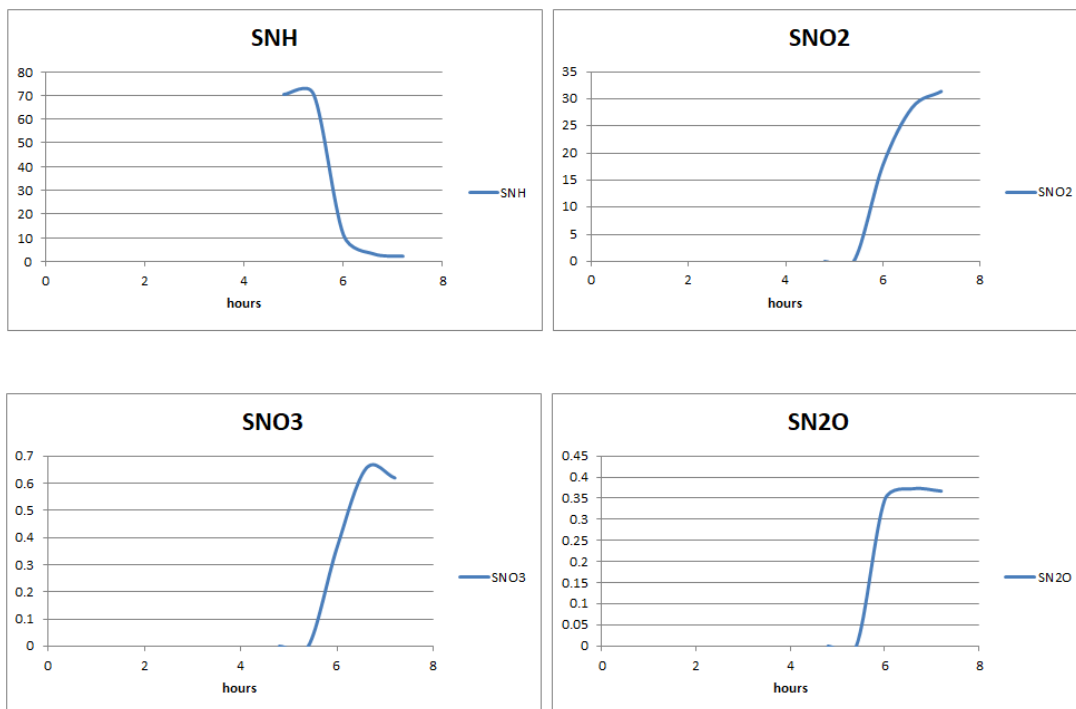
Από την μέχρι τώρα διερεύνηση έχει διαπιστωθεί η επίδραση των τιμών κρίσιμων στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων στην απόδοση της διεργασίας. Η λειτουργία του μοντέλου και συνεπώς τα αποτελέσματα των μεταβλητών επηρεάζονται και από τις λειτουργικές παραμέτρους. Ως τέτοιες είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής της αερόβιας δεξαμενής (HRT aerobic), ο υδραυλικός χρόνος παραμονής της ανοξικής δεξαμενής (HRT anoxic), η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού (SO), το ποσοστό της απομάκρυνσης των

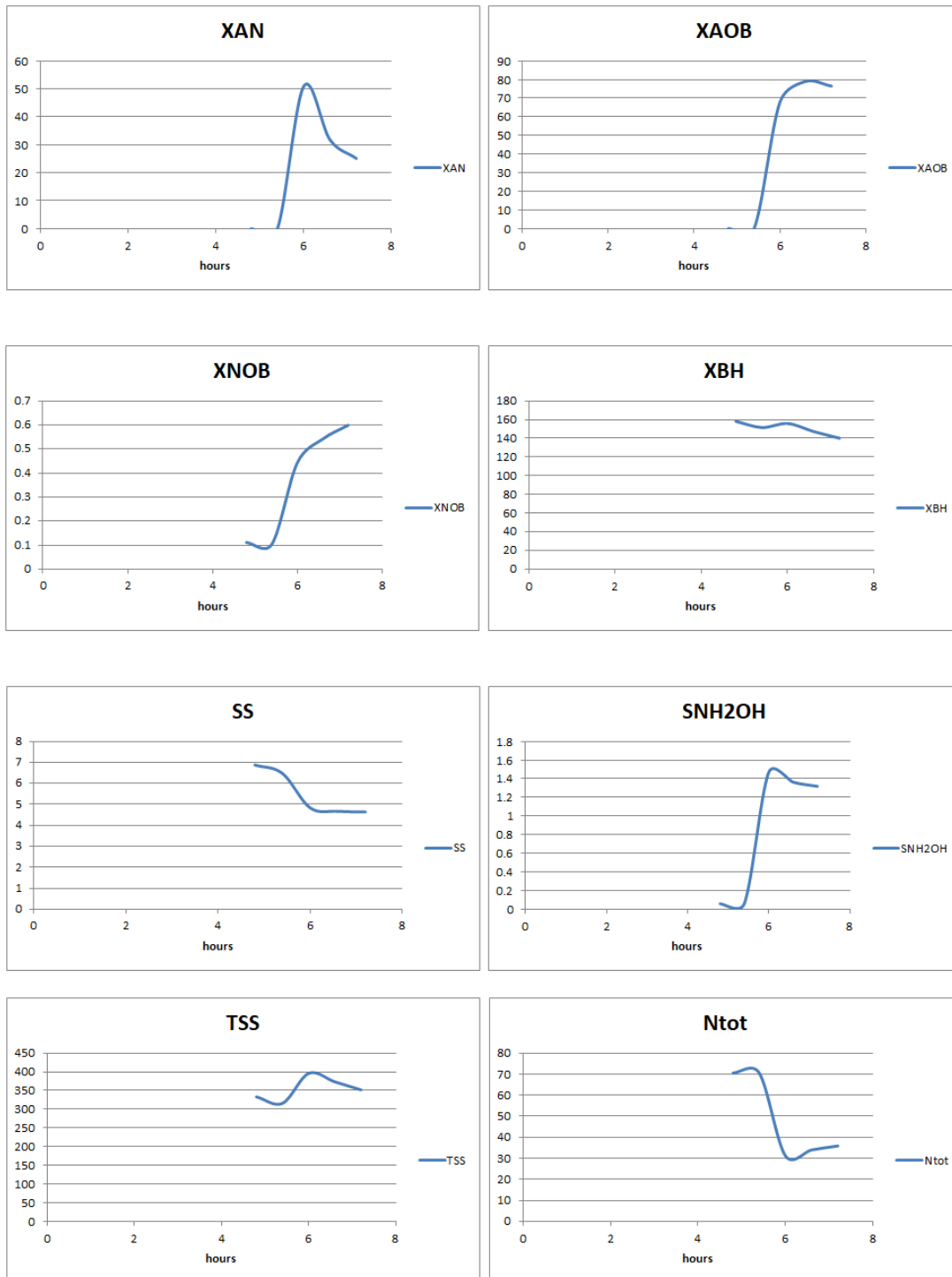
στερεών στην Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης και ο χρόνος παραμονής των στερεών.

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει παρουσίαση της επίδρασης των ανωτέρω λειτουργικών παραμέτρων προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως η λειτουργία του σύνθετου συστήματος. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για 4 διαφορετικές τιμές κάθε λειτουργικής παραμέτρου και μορφοποιήθηκαν τα διαγράμματα των μεταβλητών εξόδου σε σχέση με αυτές. Οι τιμές των διαγραμμάτων, που προέκυψαν από τις μεταβολές στις λειτουργικές παραμέτρους, επιλέχθηκαν από την θέση 9, που βρίσκεται η αερόβια δεξαμενή και απο την θέση 10-18, που βρίσκεται η ανοξική δεξαμενή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα, που προέκυψαν για τις μεταβλητές εξόδου στην αερόβια δεξαμενή.

4.5.1 Επίδραση του Υδραυλικού Χρόνου Παραμονής της Αερόβιας Δεξαμενής

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα για την αερόβια και την ανοξική δεξαμενή.



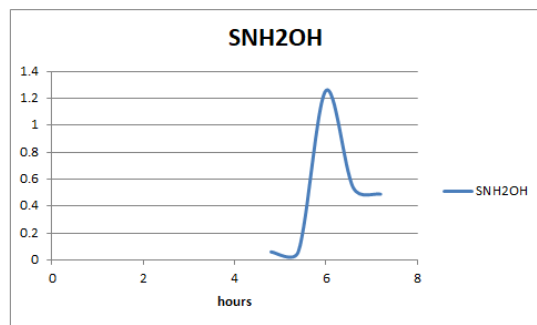
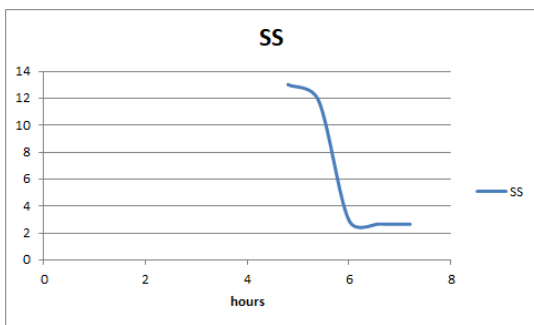
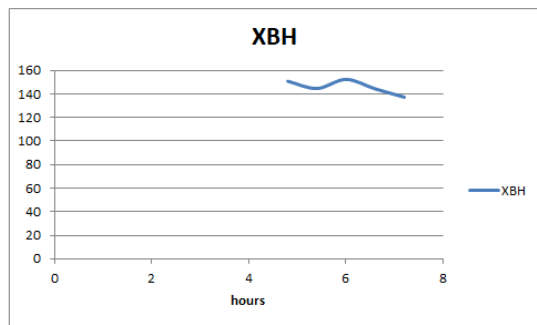
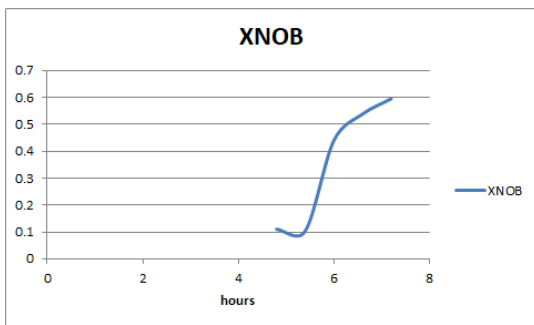
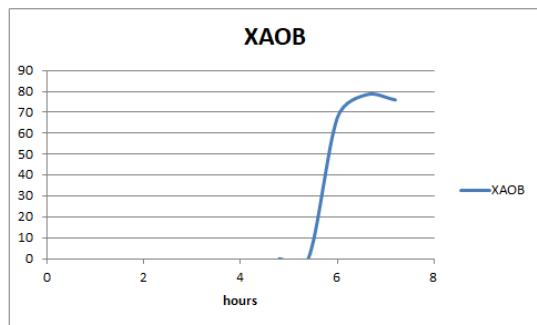
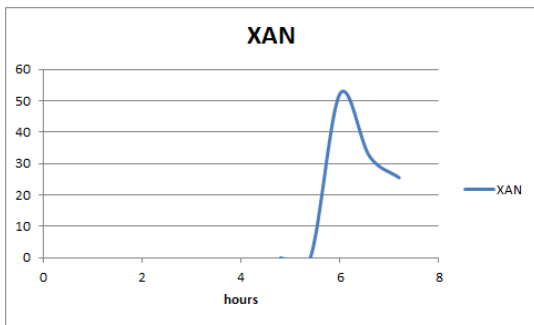
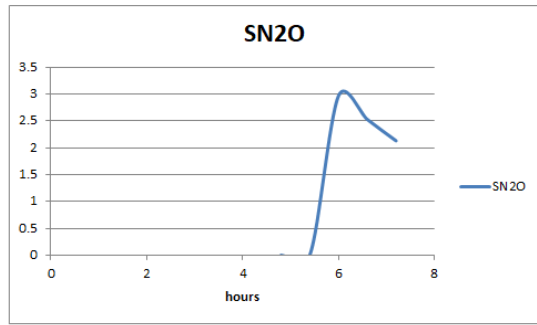
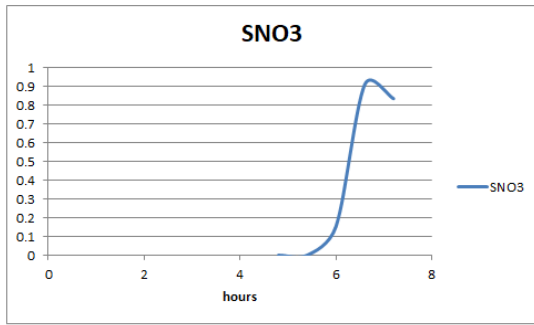
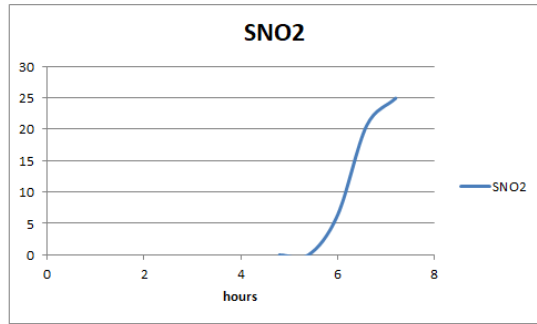
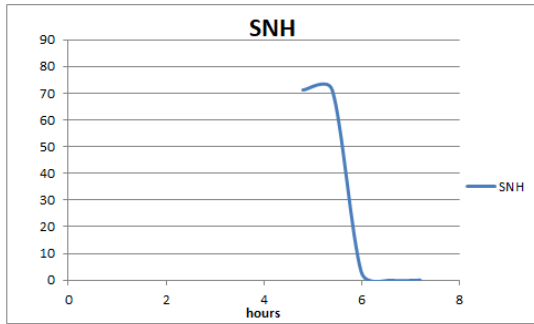


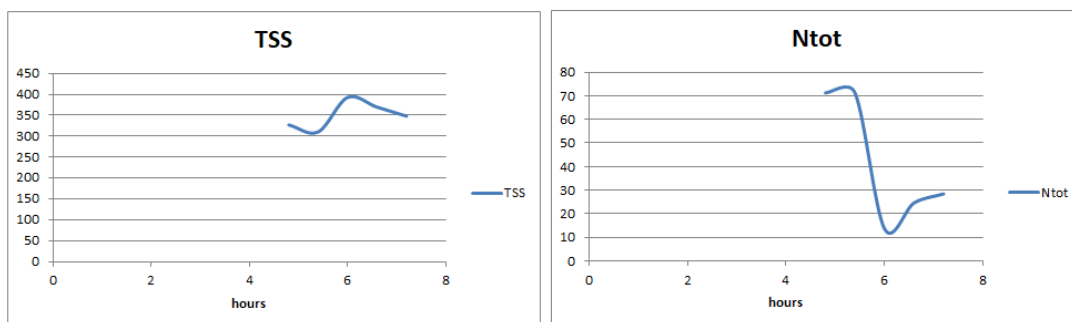
Σχήμα 34: Επίδραση του υδραυλικού χρόνου παραμονής της αερόβιας δεξαμενής στις συγκεντρώσεις των μεταβλητών στην αερόβια δεξαμενή

Η τιμή του αμμωνιακού αζώτου (SNH) είναι ευαίσθητη στις μεταβολές του υδραυλικού χρόνου παραμονής στην αερόβια δεξαμενή (HRT aerobic), καθώς όπως φαίνεται στο διάγραμμα όταν ο αερόβιος υδραυλικός χρόνος παραμονής παίρνει τιμές μικρότερες από τις 5 ώρες το αμμωνιακό άζωτο δεν νιτρωδοποιείται ενώ σε τιμές πάνω από τις 6 ώρες καταναλώνεται όλη η ποσότητά του. Η ίδια απότομη μεταβολή παρατηρείται και στα υπόλοιπα διαγράμματα που αφορούν τις

διαλυμένες αζωτούχες χημικές ενώσεις. Τα νιτρώδη (SNO_2), τα νιτρικά (SNO_3), το υποξείδιο του αζώτου (SN_2O) και η υδροξυλαμίνη (SNH_2OH) σε τιμές του HRT γύρω από τις 5 h έχουν μηδενική συγκέντρωση. Τα νιτρώδη αυξάνονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα της νιτρωδοποίησης. Τα νιτρικά αυξάνονται ταυτόχρονα με τα νιτρώδη και φτάνουν στο μέγιστο τους για hrt aerobic 6.6 ώρες. Για μεγαλύτερους χρόνους τα νιτρικά αρχίζουν να μειώνονται, καθώς μειώνεται η ταχύτητα των κινητικών της νιτροδωποίησης-νιτροποίησης. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα του υποξειδίου του αζώτου, της υδροξυλαμίνης και των αυτοτροφικών βακτηρίων ΧΑΟΒ. Το υποξείδιο του αζώτου και η υδροξυλαμίνη παράγονται με μεγαλύτερους ρυθμούς για hrt aerobic μεγαλύτερο των 5.5 ωρών. Το υποξείδιο του αζώτου έχει μέγιστο στις 6 ώρες και στην συνέχεια παρουσιάζει μικρή μείωση και η υδροξυλαμίνη έχει μέγιστο στις 6 ώρες και μετά έχει πτωτική τάση. Η μεγαλύτερη μείωση της υδροξυλαμίνης οφείλεται και στην κατανάλωση, για την παραγωγή νιτρωδών, ενώ η παραγωγή της μειώνεται. Επίσης τα ΧΑΟΒ για τιμές μεγαλύτερες των 7 ωρών αρχίζουν να μειώνονται. Τα ΧΝΟΒ αυξάνονται όσο μεγαλώνει ο χρόνος παραμονής αλλά η συγκεντρώσεις τους δεν είναι μεγάλες, επειδή το σύστημα δεν ευνοεί την νιτροποίηση όπως φαίνεται και από τις χαμηλές συγκεντρώσεις των νιτρικών. Τα ΧΑΝ αυξάνονται από μηδενική συγκέντρωση για hrt aerobic μεγαλύτερο των 5.7 ωρών και φτάνουν στο μέγιστο τους στις 6 ώρες. Αυτό σημαίνει ότι εκεί είναι το βέλτιστο σημείο της μερικής νιτρωδοποίησης. Για μεγαλύτερους χρόνους παραμονής μειώνεται η συγκέντρωσή τους με μεγάλο ρυθμό, καθώς τα νιτρώδη αυξάνονται πολύ σε σχέση με την αμμωνία. Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί στην δεξαμενή αερισμού μειώνονται για χρόνους από 4.8-5.4 ώρες με ήπιο ρυθμό, αλλά στην συνέχεια αυξάνονται ως τις 6 ώρες. Για τιμές του hrt aerobic μεγαλύτερες των 6 ωρών μειώνεται σταθερά η συγκέντρωσή τους. Τα SS παρουσιάζουν απότομη μείωση για τιμές μεταξύ των 5.5 και 6 ωρών, ενώ στην συνέχεια μειώνονται ανεπαίσθητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κινητικές, που τα καταναλώνουν έχουν περισσότερο χρόνο για να ολοκληρωθούν ακόμα και όταν μειώνεται ο ρυθμός τους. Τα TSS παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση στο διάστημα 5.5-6 ωρών καθώς η κινητική της νιτρωδοποίησης αποκτά μεγαλύτερη ταχύτητα και αυξάνονται τα πτητικά στερεά στην δεξαμενή. Σε χαμηλές τιμές του hrt aerobic, που δεν πραγματοποιείται η νιτρωδοποίηση το ολικό άζωτο (N_{tot}) έχει τις μέγιστες τιμές του, καθώς δεν απομακρύνεται άζωτο από το σύστημα. Η ελάχιστη τιμή του βρίσκεται στις 6 ώρες, όπου βελτιστοποιείται η ανάπτυξη των ΧΑΝ, τα οποία πραγματοποιούν την ανοξική απομάκρυνση της αμμωνίας με κατανάλωση νιτρωδών

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μεταβλητών στην ανοξική δεξαμενή:





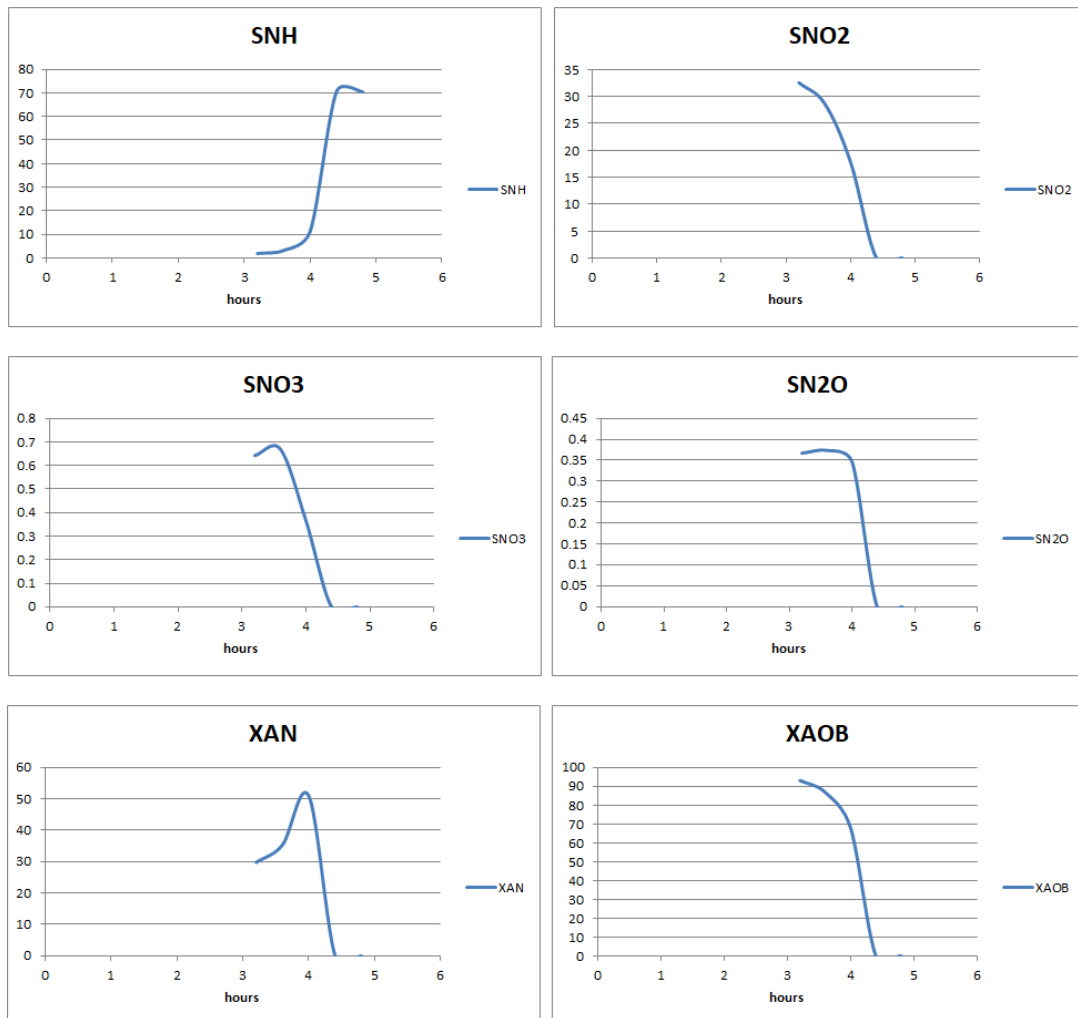
Σχήμα 35: Επίδραση του υδραυλικού χρόνου παραμονής της αερόβιας δεξαμενής στις συγκεντρώσεις των μεταβλητών της ανοξικής δεξαμενής

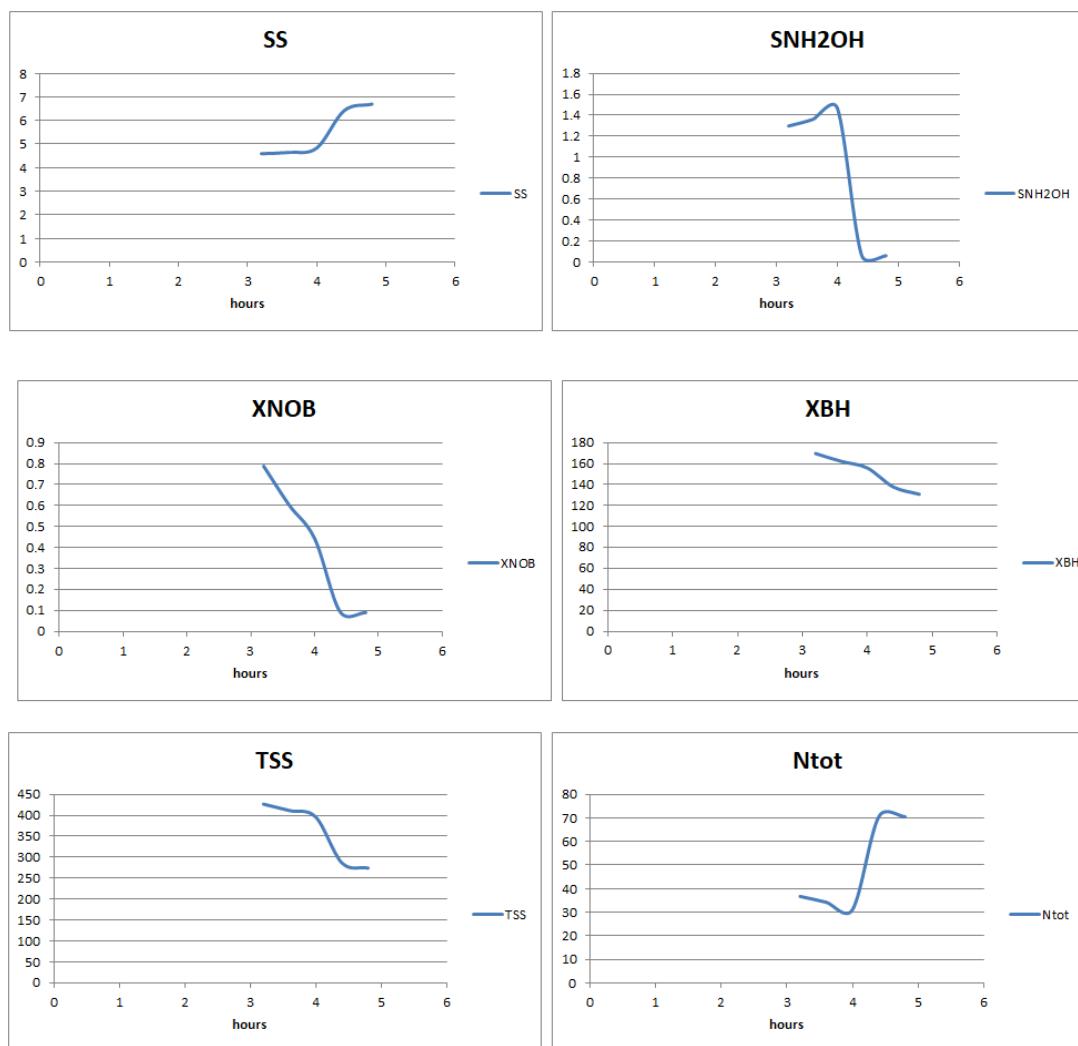
Το αμμωνιακό άζωτο, τα νιτρώδη και τα νιτρικά έχουν την ίδια συμπεριφορά στην ανοξική δεξαμενή για τις διακυμάνσεις του hrt aerobic. Το αμμωνιακό άζωτο και τα νιτρώδη έχουν μικρότερες συγκεντρώσεις για τους αντίστοιχους χρόνους, εξαιτίας της ανάπτυξης των αναπνοοκ και της απονιτροποίησης των νιτροποιητών, ενώ τα νιτρικά έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις καθώς παράγονται κατά την ανάπτυξη των αναπνοοκ βακτηρίων. Οι ΧΑΟΒ έχουν την ίδια συμπεριφορά στην ανοξική δεξαμενή με την αερόβια δεξαμενή. Οι συγκεντρώσεις τους όμως είναι λίγο μικρότερες. Αυτό συμβαίνει επειδή το ανοξικό περιβάλλον δεν ευνοεί την ανάπτυξή τους. Τα ΧΑΝ παρουσιάζουν παρόμοια μεταβολή με την αερόβια δεξαμενή αλλά οι συγκεντρώσεις τους είναι μεγαλύτερες για τους αντίστοιχους χρόνους παραμονής, αφού στην ανοξική δεξαμενή πραγματοποιείται η ανάπτυξή τους. Τα ΧΝΟΒ παραμένουν σχεδόν σταθερά και παρουσιάζουν το ίδιο μοτίβο με αυτό της αερόβιας δεξαμενής στις διάφορες αλλαγές του hrt aerobic. Το υποξείδιο του αζώτου και η υδροξυλαμίνη αρχίζουν να παράγονται από τις 5.5 ώρες και φτάνουν το μέγιστό τους στις 6 ώρες. Από εκεί και μετά παρουσιάζουν μεγάλη μείωση. Το υποξείδιο του αζώτου έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση στην ανοξική δεξαμενή, καθώς παράγεται κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Η υδροξυλαμίνη έχει χαμηλότερες συγκεντρώσεις για τους αντίστοιχους χρόνους παραμονής σε σχέση με την συγκέντρωση στην αερόβια δεξαμενή, καθώς καταναλώνεται κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Τα SS παρουσιάζουν μεγάλη μείωση για hrt aerobic μεγαλύτερο των 6 h και η συγκέντρωσή τους είναι μικρότερη από αυτήν στην αερόβια δεξαμενή. Αυτό οφείλεται στην απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών (ΧΒΗ), η οποία πραγματοποιείται στην ανοξική δεξαμενή. Τα TSS και το συνολικό άζωτο στην ανοξική δεξαμενή παρουσιάζουν παρόμοιες μεταβολές με την αερόβια δεξαμενή, για τις αλλαγές στις τιμές του hrt aerobic. Η συγκέντρωση των TSS είναι μικρότερη, το οποίο σημαίνει ότι μειώνονται τα συνολικά πηκτικά στερεά. Επίσης η συγκέντρωση του ολικού αζώτου είναι μικρότερη στην ανοξική δεξαμενή, όπου πραγματοποιείται η απομάκρυνση του αζώτου με τις διεργασίες που αναφέρθηκαν.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ως βέλτιστη τιμή του αερόβιου υδραυλικού χρόνου παραμονής οι 6 ώρες.

4.5.2 Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής της Ανοξικής Δεξαμενής

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα για την αερόβια και την ανοξική δεξαμενή.



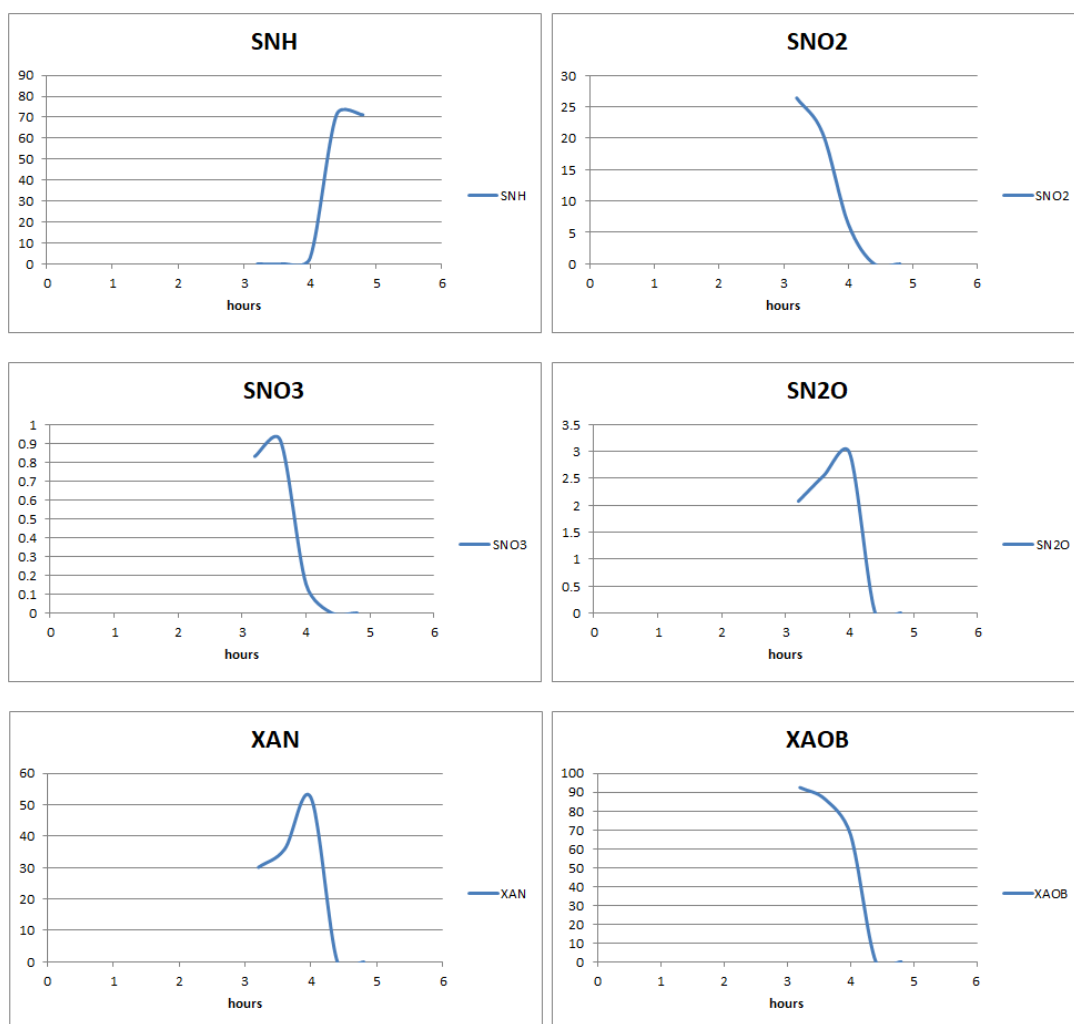


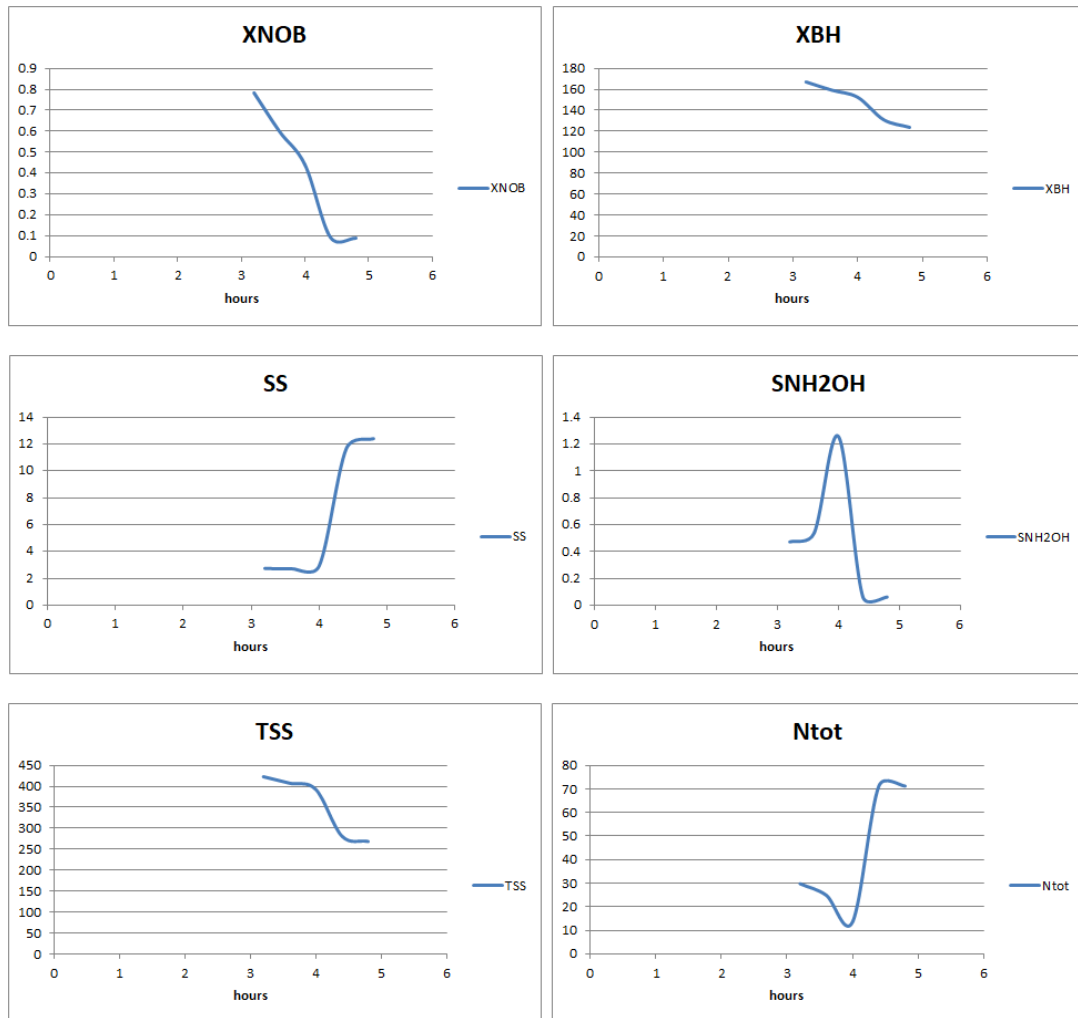
Σχήμα 36: Επίδραση του ανοξικού υδραυλικού χρόνου παραμονής στην αερόβια δεξαμενή

Στο διάγραμμα του αμμωνιακού αζώτου (SNH) φαίνεται ότι για υδραυλικό χρόνο παραμονής στην ανοξική δεξαμενή (hrt apoxic) μικρότερου των 3.2 ώρες, το SNH καταναλώνεται σχεδόν εξ ολοκλήρου μέσω της νιτροδοποίησης και όσο αυξάνεται το hrt apoxic η διεργασία δυσχαιρένεται. Για χρόνο παραμονής μεγαλύτερο των 4.4 ωρών δεν πραγματοποιείται καθόλου. Το ίδιο δύναται να διαπιστωθεί από το διάγραμμα των νιτρωδών, τα οποία έχουν μέγιστη συγκέντρωση στις 3.2 ώρες και από τις 4.4 ώρες η συγκέντρωσή τους μηδενίζεται. Τα αυτοτροφικά βακτήρια (XAOB) ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με τα νιτρώδη, τα οποία παράγουν με την ανάπτυξή τους κατά την νιρωδοποίηση. Τα νιτρικά (SNO₃) παρουσιάζουν μέγιστο στις 3.6 ώρες και μετά μειώνονται με ταχύ ρυθμό. Τα νιτροποιητικά βακτήρια (XNOB) παρουσιάζουν μέγιστο στις 3.2 ώρες και μετά όσο αυξάνεται το hrt apoxic μειώνονται. Τα νιτρικά συνδέονται με την συμπεριφορά των NOB, καθώς παράγονται κατά την ανάπτυξη των NOB βακτηρίων. Τα αναπνοο (XAN) αυξάνονται στο διάστημα μεταξύ 3.2-4 ωρών όπου παρουσιάζουν το μέγιστό τους. Για μεγαλύτερους χρόνους παραμονής μειώνεται ραγδαία η συγκέντρωσή τους στο

σύστημα. Η παραγωγή του υποξειδίου του αζώτου (SN2O), ως ενδιάμεσου σταδίου της νιτρωδοποίησης, φτάνει στο μέγιστό της για hrt αποxic 3.6 ώρες και στην συνέχεια μειώνεται με μεγάλο ρυθμό. Η υδροξυλαμίνη (SNH2OH), η οποία παράγεται επίσης σε ενδιάμεσο στάδιο της νιτρωδοποίησης, παρουσιάζει μέγιστο για hrt αποxic=4 ώρες. Για μεγαλύτερους χρόνους μειώνεται απότομα μέχρι τον μηδενισμό, καθώς μειώνεται ο ρυθμός της νιτρωδοποίησης στην αερόβια δεξαμενή. Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί (XBH) μειώνονται όσο αυξάνεται το hrt αποxic. Αυτό αποτυπώνεται και στην συγκέντρωση των SS, τα οποία αυξάνονται με την αύξηση του χρόνου παραμονής, αφού καταναλώνονται λιγότερο από τα XBH στην αερόβια ανάπτυξή τους. Τα TSS μειώνονται σημαντικά όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής, καθώς μειώνονται οι XBH και οι XAOB στην αερόβια δεξαμενή. Το ολικό άζωτο μειώνεται στο διάστημα των 3.2-4 ωρών, όπου φτάνει στο ελάχιστό του. Για μεγαλύτερους hrt αποxic η συγκέντρωση του ολικού αζώτου αυξάνεται, επειδή δεν πραγματοποιείται η νιτρωδοποίηση και δεν απομακρύνεται άζωτο από το σύστημα.

Τα διαγράμματα που προέκυψαν για την ανοξική δεξαμενή παρουσιάζονται παρακάτω:





Σχήμα 37: Επίδραση του ανοξικού υδραυλικού χρόνου παραμονής στην ανοξική δεξαμενή

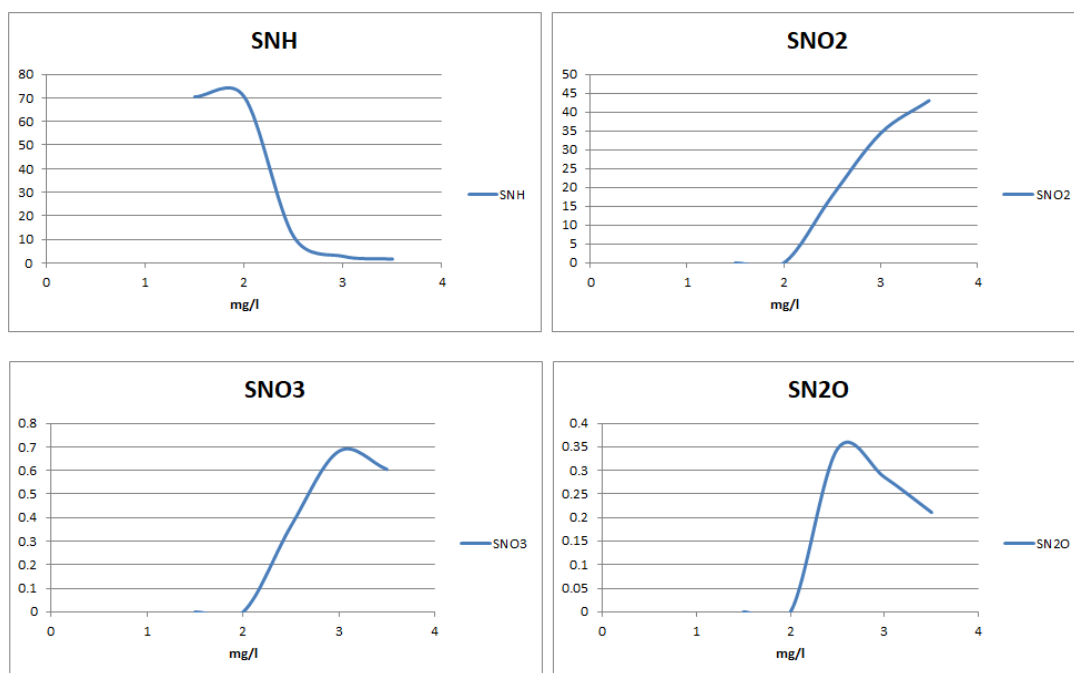
Το αμμωνιακό άζωτο, τα νιτρώδη και τα AOB βακτήρια παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με την αερόβια δεξαμενή, στις μεταβολές του hrt ανοξικ. Το αμμωνιακό άζωτο και τα νιτρικά έχουν συγκριτικά μικρότερες συγκεντρώσεις στην ανοξική δεξαμενή, λόγω της ανάπτυξης των αναπνοχ. Σε μικρούς hrt ανοξικ τα νιτρώδη και τα NOB βρίσκονται στο μέγιστό τους, ενώ όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής η συγκεντρώσεις τους μειώνονται. Τα νιτρικά έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση στην ανοξική δεξαμενή από ότι στην αερόβια. Αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη των αναπνοχ που παράγει νιτρικά. Τα ΧΑΝ παρουσιάζουν παρόμοια μεταβολή στις τιμές τους με την μεταβολή στην αερόβια δεξαμενή. Η συγκέντρωσή τους στην ανοξική δεξαμενή είναι μεγαλύτερη καθώς αναπτύσσονται σε ανοξικές συνθήκες. Η συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου αυξάνεται στην ανοξική δεξαμενή για το διάστημα μεταξύ 3.2-4 ωρών, όπου φτάνει το μέγιστό της. Η αύξηση οφείλεται στην απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Από εκεί για μεγαλύτερους χρόνους παραμονής η συγκέντρωσή του μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί, αφού δεν πραγματοποιείται η νιτρωδοποίηση στην αερόβια δεξαμενή.

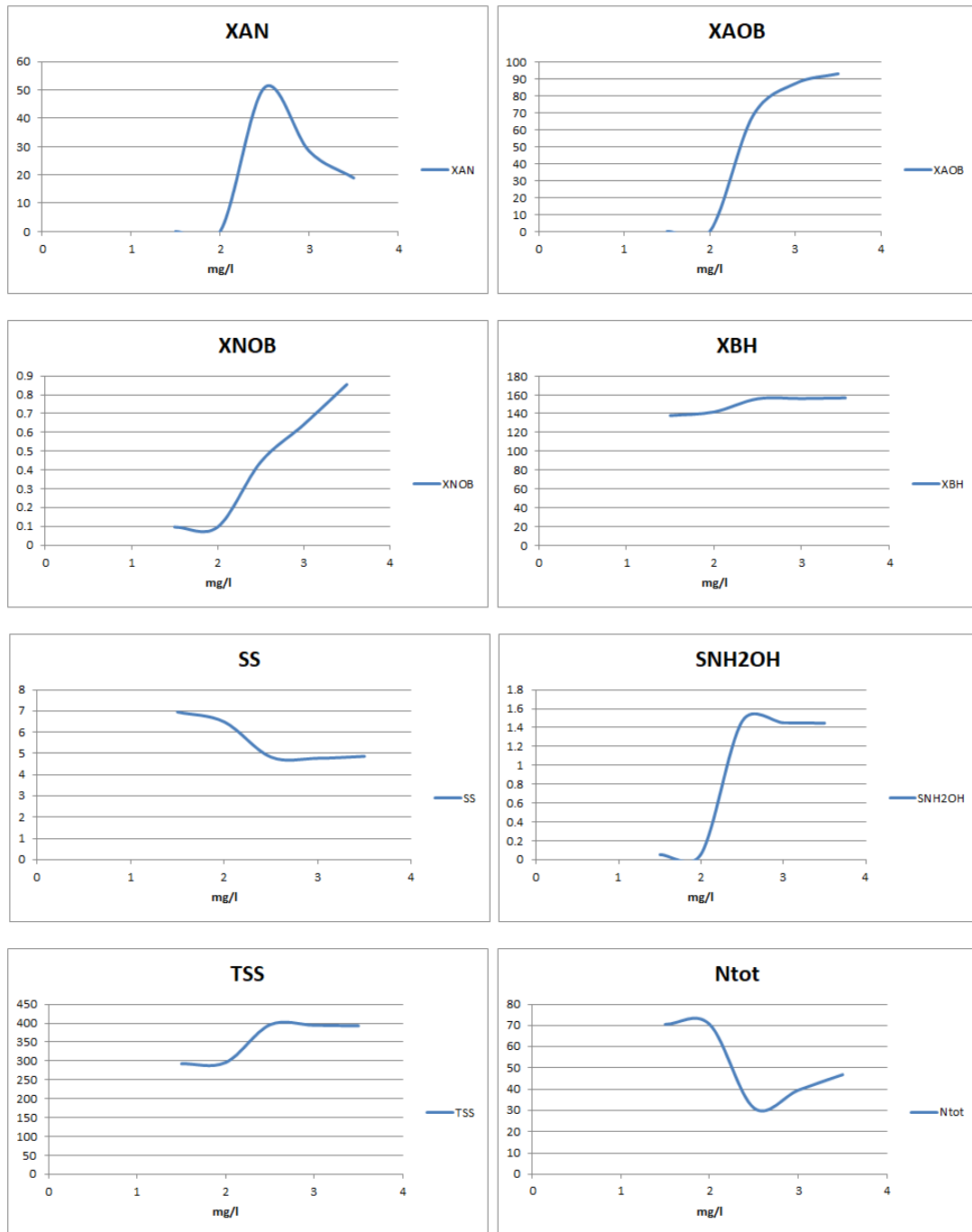
Η υδροξυλαμίνη αυξάνεται στο διάστημα των 3.2-4 ωρών και στην συνέχεια μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί. Η συγκέντρωσή της είναι μικρότερη στην ανοξική δεξαμενή σε σχέση με την αερόβια, επειδή καταναλώνεται κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί έχουν παρόμοια συμπεριφορά στις διάφορες διακυμάνσεις του hrt αποxic, όπως στην αερόβια δεξαμενή. Τα SS έχουν επίσης παρόμοια συμπεριφορά και η συγκέντρωσή τους είναι μικρότερη στην ανοξική δεξαμενή από ότι στην αερόβια για αντίστοιχους χρόνους παραμονής. Αυτό συμβαίνει λόγω της απονιτροποίησης που προκαλούν οι ΧΒΗ σε ανοξικές συνθήκες. Τα TSS έχουν παρόμοια μεταβολή για τις διακυμάνσεις του hrt αποxic και μικρότερες συγκεντρώσεις συγκριτικά με την αερόβια δεξαμενή. Το ίδιο ισχύει και για το ολικό άζωτο, όπου οι μικρότερες συγκεντρώσεις οφείλονται στην απομάκρυνση αζώτου από τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στην ανοξική δεξαμενή.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ως βέλτιστη τιμή του ανοξικού υδραυλικού χρόνου παραμονής οι 4 ώρες.

4.5.3 Επίδραση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα για την αερόβια και την ανοξική δεξαμενή.



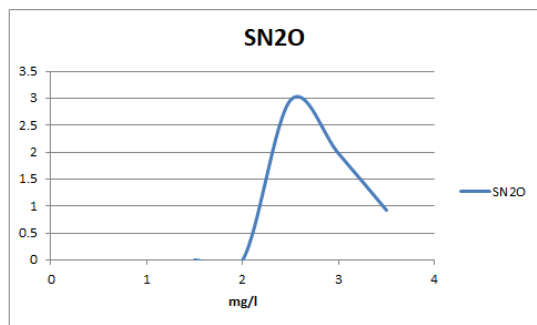
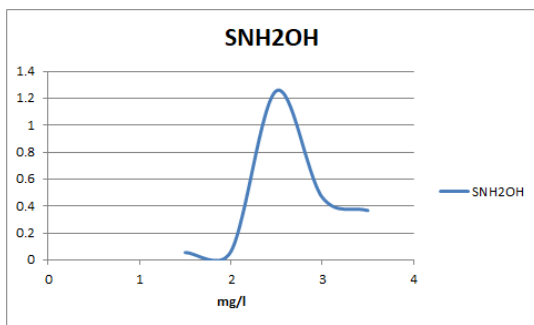
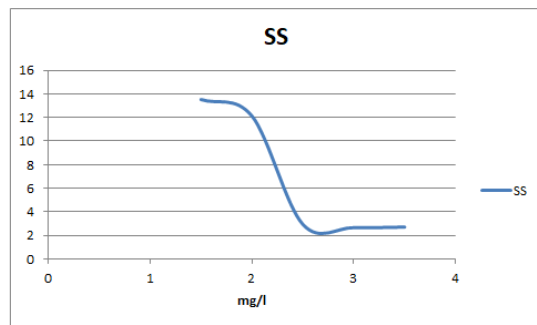
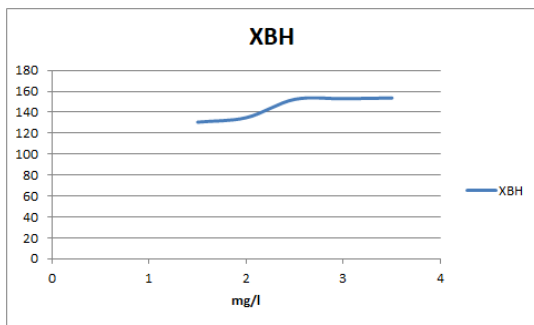
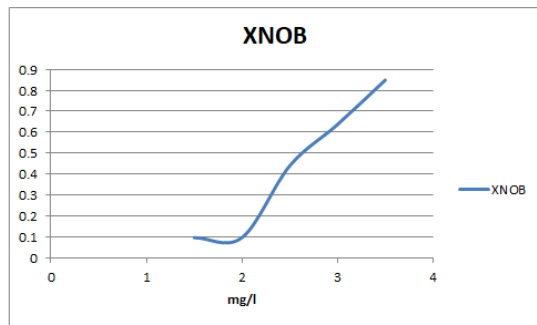
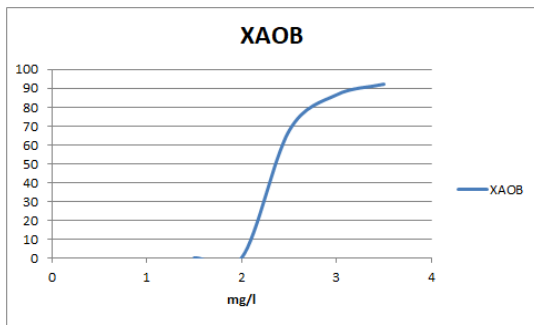
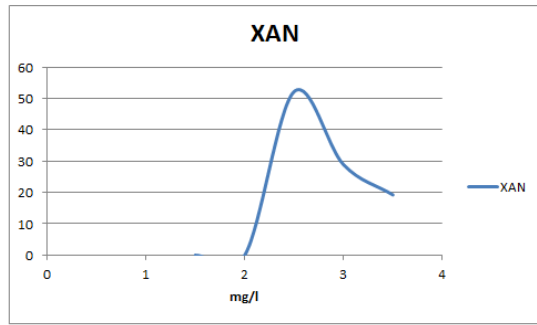
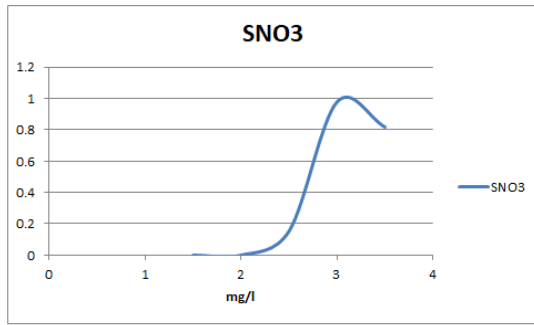
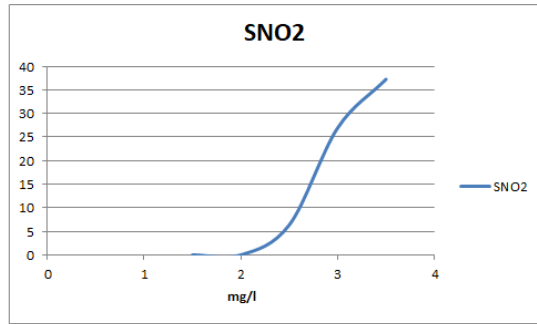
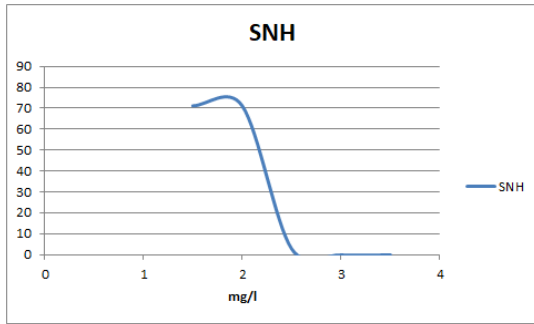


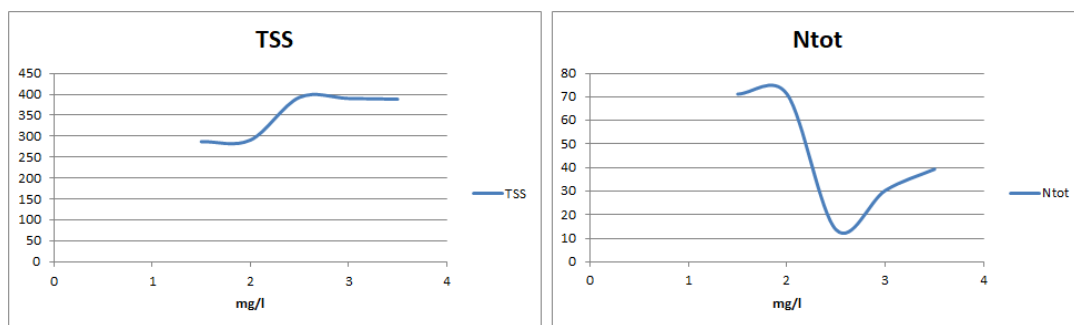
Σχήμα 38: Επίδραση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στην αερόβια δεξαμενή

Από τα διαγράμματα του αμμωνιακού αζώτου (SNH), των νιτρικών (SNO₂) και των αυτοτροφικών βακτηρίων (XAOB) φαίνεται ότι η αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου (SO) μετά την συγκέντρωση των 2 mg/L στην δεξαμενή αερισμού ευνοεί την διαδικασία της νιτροδοποίησης και άρα της παραγωγής SNO₂ με την αύξηση των XAOB. Τα νιτρικά αυξάνονται για τιμές του διαλυμένου οξυγόνου μεγαλύτερες των 2 mg/L μέχρι να φτάσουν το μέγιστό τους στα 2 mg/L. Για μεγαλύτερες παροχές οξυγόνου η συγκέντρωση των νιτρικών μειώνεται καθώς μειώνεται η ταχύτητα της

νιτροποίησης. Παράλληλα, όπως είναι λογικό τα νιτροποιητικά βακτήρια (XNOB) αυξάνονται και αυτά. Το αποτέλεσμα αυτής της αύξησης είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών που περιγράφηκε. Η συγκέντρωση των αναπνοοχ για παροχή διαλυμένου οξυγόνου μικρότερη των 2.1 mg/L είναι μηδενική και για μεγαλύτερες παροχές οξυγόνου αυξάνεται μέχρι το μέγιστο, που σημειώνεται στα 2.5 mg/L. Επομένως, αυτό είναι το σημείο στο οποίο πραγματοποιείται η βέλτιστη μερική νιτροποίηση για την ανάπτυξη των ΧΑΝ. Σε τιμές του SO μικρότερες των 2 mg/L η νιτροποίηση δεν πραγματοποιείται. Η συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου (SN₂O) για παροχή οξυγόνου μικρότερη των 2 mg/L είναι μηδενική και όσο αυξάνεται, μεγαλώνει η συγκέντρωσή του μέχρι το μέγιστο που σημειώνεται για παροχή 2.5 mg/L. Από εκεί και μετά μειώνεται η συγκέντρωσή του καθώς μειώνεται ο ρυθμός μεταβολής της νιτροποίησης, της οποίας αποτελεί ενδιάμεσο στάδιο. Η υδροξυλαμίνη (SNH₂OH) έχει μέγιστο στο σημείο, που πραγματοποιείται η μερική νιτροποίηση της αμμωνίας στα 2.5 mg/L. Σε μικρότερες παροχές οξυγόνου η συγκέντρωσή της μειώνεται, ώπου στα 2 mg/L μηδενίζεται. Για μεγαλύτερες τιμές του οξυγόνου παρατηρείται μια ανεπαίσθητη μείωση και η συγκέντρωσή της πιάνει μια κατάσταση ισορροπίας. Όσο αυξάνεται η διαθεσιμότητα οξυγόνου αυξάνεται ο πληθυσμός των ΧΒΗ και ταυτόχρονα μειώνεται η συγκέντρωση των SS, τα οποία καταναλώνονται κατά την ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας. Αυτή η διαδικασία όμως δεν ευνοείται θεαματικά, καθώς τα AOB βακτήρια δρουν ανταγωνιστικά στην κατανάλωση του οξυγόνου. Από τα 3.5 mg/L και μετά παρατηρείται ελαφριά μείωση στον πληθυσμό των ΧΒΗ. Τα TSS αυξάνονται για παροχή οξυγόνου μεγαλύτερη των 2 mg/L ωστόσο να φτάσουν στο μέγιστο τους στα 2.5 mg/L, όπου αρχίζουν να μειώνονται με μικρό ρυθμό. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην ταυτόχρονη αύξηση των ΧΑΝ, ΧΑΟΒ και ΧΒΗ. Ενώ η μικρή μείωση μετά το σημείο της μερικής νιτροποίησης οφείλεται στην απότομη μείωση των ΧΑΝ και την μικρή μείωση των ΧΒΗ. Το ολικό άζωτο αυξάνεται για παροχές οξυγόνου από το 1.5-2 mg/L. Από εκεί και μετά μειώνεται καθώς πραγματοποιείται η νιτροποίηση μέχρι να φτάσει στο ελάχιστο για 2.5 mg/L. Για μεγαλύτερες παροχές οξυγόνου η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στο σύστημα αυξάνεται, καθώς μειώνεται η αποτελεσματικότητα της νιτροποίησης.

Παρακάτω σχολιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν για την ανοξική δεξαμενή:





Σχήμα 39: Επίδραση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στην ανοξική δεξαμενή

Η αμμωνία και τα νιτρώδη έχουν την ίδια συμπεριφορά στις διάφορες μεταβολές του διαλυμένου οξυγόνου όπως στην αερόβια δεξαμενή. Οι συγκεντρώσεις για τις αντίστοιχες παροχές του διαλυμένου οξυγόνου είναι μικρότερες στην ανοξική δεξαμενή λόγω της απομάκρυνσης αζώτου από το σύστημα. Την ίδια συμπεριφορά έχει και το διάγραμμα των AOB με το αντίστοιχο της αερόβια δεξαμενής και η συγκέντρωσή τους είναι ελαφρώς μικρότερη, επειδή δεν ευνοείται η ανάπτυξη τους σε ανοξικές συνθήκες. Τα νιτροποιητικά βακτήρια (XNOB) επίσης ευνοούνται από τις μεγαλύτερες παροχές οξυγόνου καθώς καταναλώνουν τα νιτρώδη για να αναπτυχθούν και η συγκέντρωσή τους στην ανοξική δεξαμενή μειώνεται ελαφρώς σε σχέση με την ανοξική. Τα νιτρικά έχουν παρόμοια μεταβολή για τις διακυμάνσεις του διαλυμένου οξυγόνου με την αερόβια δεξαμενή και η συγκέντρωσή τους είναι μεγαλύτερη στην ανοξική δεξαμενή, καθώς παράγονται από την ανάπτυξη των αναπνοοχ. Τα αναπνοοχ ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με την αερόβια δεξαμενή για τις αλλαγές στην παροχή του οξυγόνου. Η συγκέντρωσή τους είναι μεγαλύτερη στην ανοξική δεξαμενή από ότι στην αερόβια, επειδή αναπτύσσονται σε ανοξικές συνθήκες. Η υδροξυλαμίνη για χαμηλή παροχή οξυγόνου στην αερισόμενη δεξαμενή είναι μηδενική και αυξάνεται όσο αυξάνεται το οξυγόνο, μέχρι την μέγιστη τιμή στα 2.5 mg/l όπου είναι το σημείο της βέλτιστης μερικής νιτρωδοποίησης. Στην συνέχεια, όσο η νιτρωδοποίηση πραγματοποιείται περισσότερο η υδροξυλαμίνη μειώνεται. Η συγκέντρωσή της στην ανοξική δεξαμενή είναι μικρότερη, καθώς ένα μέρος της καταναλώνεται κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Το υποξείδιο του αζώτου έχει παρόμοια αντίδραση στις μεταβολές του διαλυμένου οξυγόνου με την μεταβολή του στην αερόβια δεξαμενή. Η συγκέντρωση του σε τιμές του οξυγόνου γύρω από 2.5 mg/l είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν στην αερόβια δεξαμενή. Αυτό οφείλεται στην απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Τα SS στην ανοξική δεξαμενή μεταβάλλονται όπως και στην αερόβια. Για παροχές οξυγόνου όπου δεν πραγματοποιείται η νιτρωδοποίηση η συγκέντρωσή τους είναι μεγαλύτερη από ότι στην αερόβια δεξαμενή. Ενώ για πιο μεγάλες παροχές η συγκέντρωσή τους είναι μικρότερη, αφού καταναλώνονται κατά την απονιτροποίηση των ΧΒΗ. Η ΧΒΗ έχουν παρόμοια μεταβολή στην ανοξική δεξαμενή με αυτή της αερόβιας. Η συγκέντρωση τους

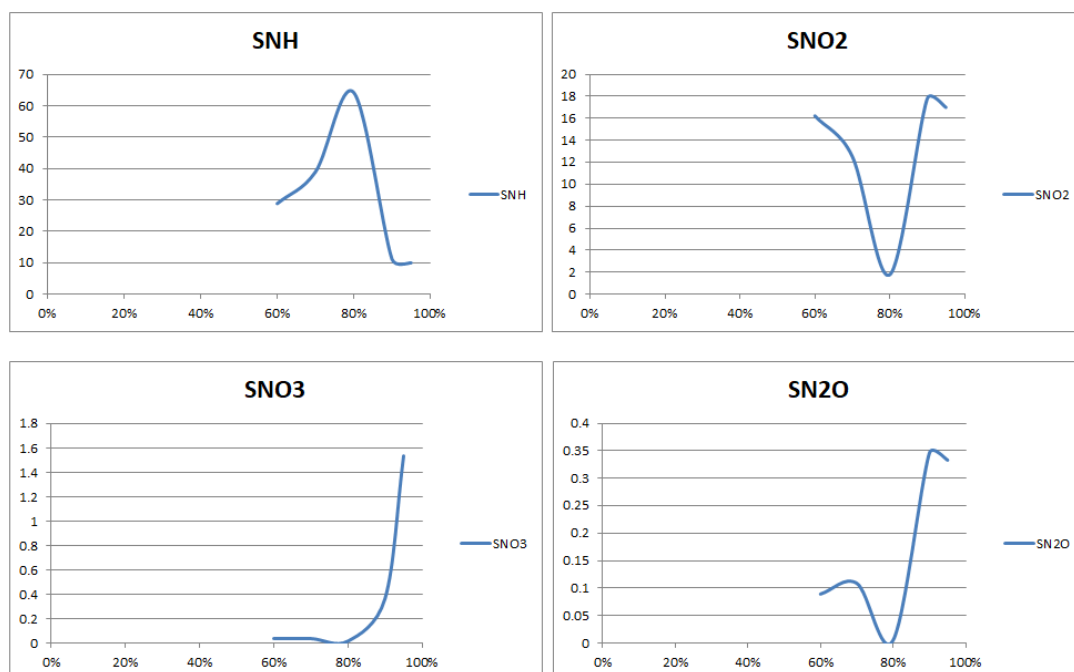
μειώνεται, παρόλο που είναι ενεργή η απονιτροποίηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αερόβια ανάπτυξη τους είναι πολύ πιο γρήγορη και αποτελεσματική. Τα TSS και το ολικό άζωτο έχουν παρόμοια συμπεριφορά με την αντίστοιχη στην αερόβια δεξαμενή. Τα TSS έχουν μικρότερη συγκέντρωση στην ανοξική δεξαμενή επειδή τα πτητικά στερεά είναι λιγότερα. Επίσης, το ολικό άζωτο έχει μικρότερες συγκεντρώσεις καθώς στην ανοξική δεξαμενή πραγματοποιείται το μεγαλύτερο μέρος της απομάκρυνσης αζώτου.

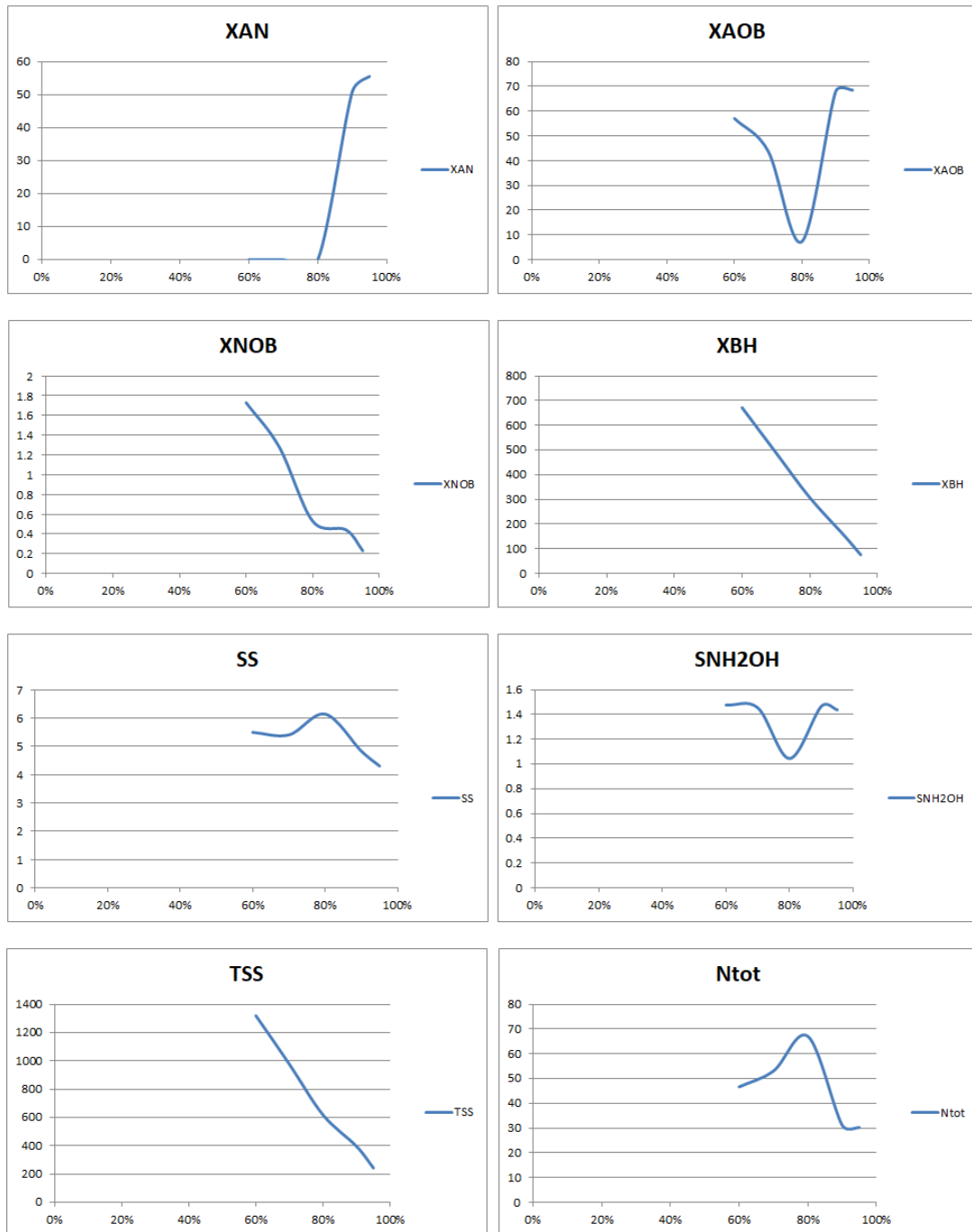
Με βάση τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ως βέλτιστη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην αερόβια δεξαμενή τα 2.5 mg/L.

4.5.4. Επίδραση του ποσοστού απομάκρυνσης των στερεών στην πρωτοβάθμια καθίζηση

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα για την αερόβια και την ανοξική δεξαμενή.

Για την δεξαμενή αερισμού προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα:



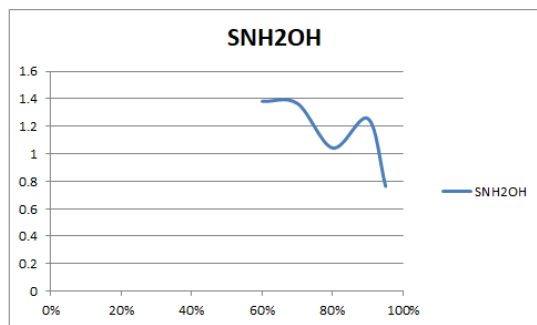
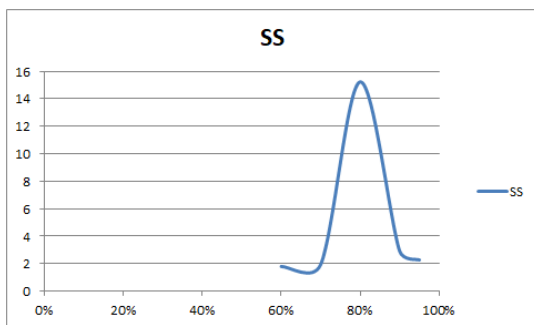
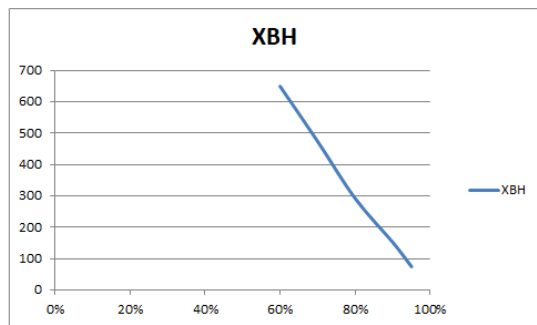
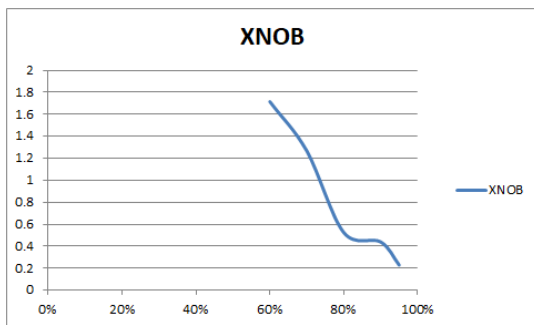
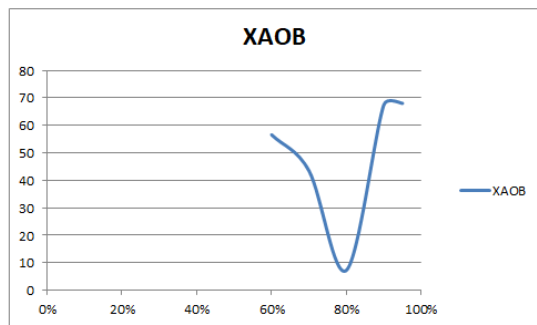
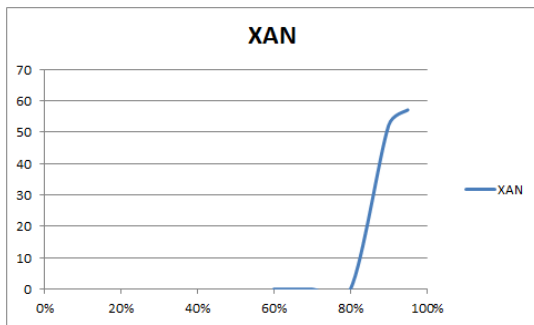
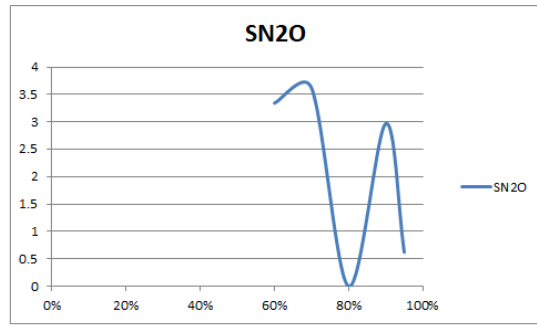
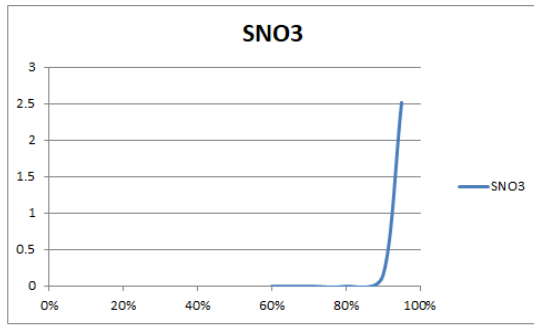
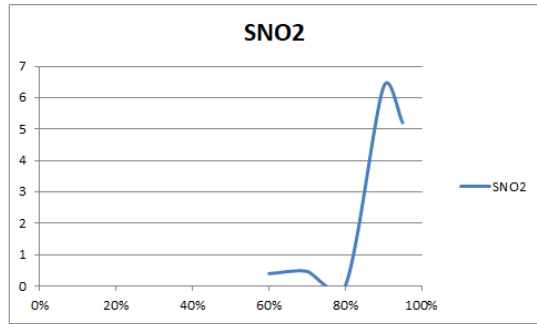
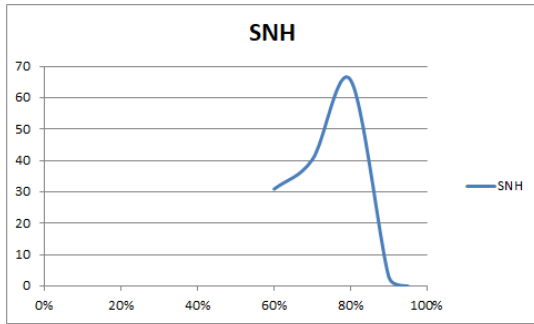


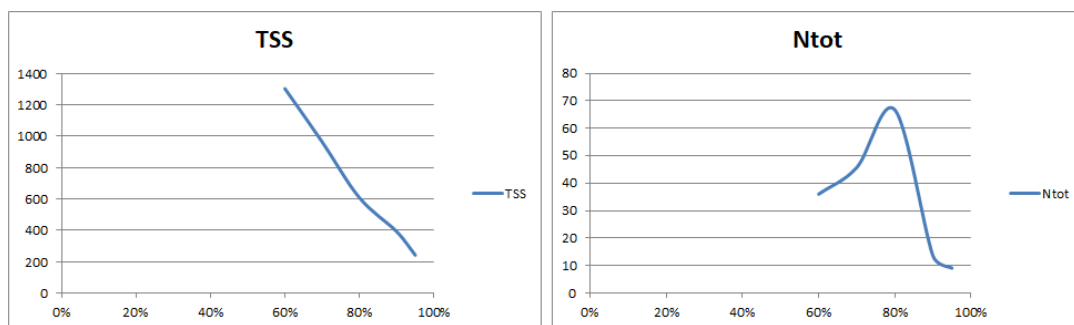
Σχήμα 40: Επίδραση της απομάκρυνσης των στερεών από την ΔΠΚ στην αερόβια δεξαμενή

Στο διάγραμμα του αμμωνιακού αζώτου (SNH) φαίνεται ότι η συγκέντρωσή της στην αερόβια δεξαμενή αυξάνεται όσο αυξάνεται και η απομάκρυνση στερεών από την δεξαμενή πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ). Η μέγιστη συγκέντρωση σημειώνεται για $sr=80\%$ και για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αυτή η τιμή μειώνεται. Τα νιτρώδη (SNO₂) έχουν αντιστρόφως ανάλογη αντίδραση σε σχέση με την αμμωνία. Σε πιο μικρές τιμές απομάκρυνσης στερεών ευνοείται η νιτρωδοποίηση και για $sr=80\%$ πέφτει στην χαμηλότερη απόδοση της. Στην συνέχεια για μεγαλύτερη απομάκρυνση

στερεών στην ΔΠΚ αυξάνεται ραγδαία η απόδοση της νιτροδοποίησης. Τα νιτροποιητικά βακτήρια (XNOB) έχουν πιο μεγάλες συγκεντρώσεις για μικρή απομάκρυνση στερεών και νιτροποιούν μια ποσότητα των νιτρωδών και όσο αυξάνεται η απομάκρυνση στερεών τα NOB μειώνονται. Τα νιτρικά έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση για sr μεγαλύτερα του 80%. Καθώς η διεργασία της νιτροποίησης δε χρειάζεται οργανικό άνθρακα για να πραγματοποιηθεί και γίνεται πιο ανταγωνιστική έναντι άλλων διεργασιών που καταναλώνουν οξυγόνο και χρειάζονται οργανικό άνθρακα. Η παραγωγή υποξειδίου του αζώτου είναι μικρή όταν η νιτροδοποίηση γίνεται σε χαμηλότερα sr και στο 80%, που η διεργασία δεν πραγματοποιείται η συγκέντρωσή τους πέφτει στο μηδέν. Για μεγαλύτερες τιμές της απομάκρυνσης των στερεών αυξάνεται ραγδαία και φτάνει το μέγιστο για $sr=90%$, όπου από εκεί και μετά μειώνεται ελαφρώς. Η υδροξυλαμίνη έχει παρόμοια συμπεριφορά με τα νιτρώδη και το υποξείδιο του αζώτου, αλλά ο ρυθμός μεταβολής της είναι αρκετά μικρότερος. Η απομάκρυνση στερεών στην ΔΠΚ έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, των οποίων η ανάπτυξη ευνοείται για μικρή απομάκρυνση στερεών. Τα αναπνοοβακτήρια (XAN) δε μπορούν να αναπτυχθούν για απομάκρυνση στερεών μικρότερη του 80% και η ανάπτυξη τους φτάνει στο μέγιστο σε για απομάκρυνση στερεών 95%. Τα SS μειώνονται για απομάκρυνση από 60-70% και στην συνέχεια αυξάνονται μέχρι η απομάκρυνση να φτάσει το 80%, όπου παρατηρείται ξανά μείωση. Η τιμή τους μειώνεται για μεγάλα sr , παρόλο που μειώνεται και η συγκέντρωση των XBH , επειδή ένα μέρος τους απομακρύνεται από το σύστημα στην ΔΠΚ. Τα TSS μειώνονται ραγδαία όσο αυξάνεται η απομάκρυνση στερεών στην ΔΠΚ καθώς μεγάλο μέρος τους αποβάλλεται από το σύστημα στην ΔΠΚ. Το ολικό άζωτο έχει χαμηλότερες συγκεντρώσεις για $sr= 50%$ και στην συνέχεια αυξάνεται μέχρι που φτάνει το μέγιστό του στο 80% που πραγματοποιείται ελάχιστη απομάκρυνση αζώτου. Σε μεγαλύτερα sr η απομάκρυνση αζώτου από το σύστημα γίνεται αρκετά πιο αποδοτική και φτάνει στην μικρότερη συγκέντρωση για $sr=90%$, όπου η μερική νιτροδοποίηση γίνεται βέλτιστη για την απομάκρυνση αζώτου στην ανοξική δεξαμενή.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα όπως προέκυψαν για την ανοξική δεξαμενή:





Σχήμα 41: Επίδραση της απομάκρυνσης στερεών από την ΔΠΚ στην ανοξική δεξαμενή

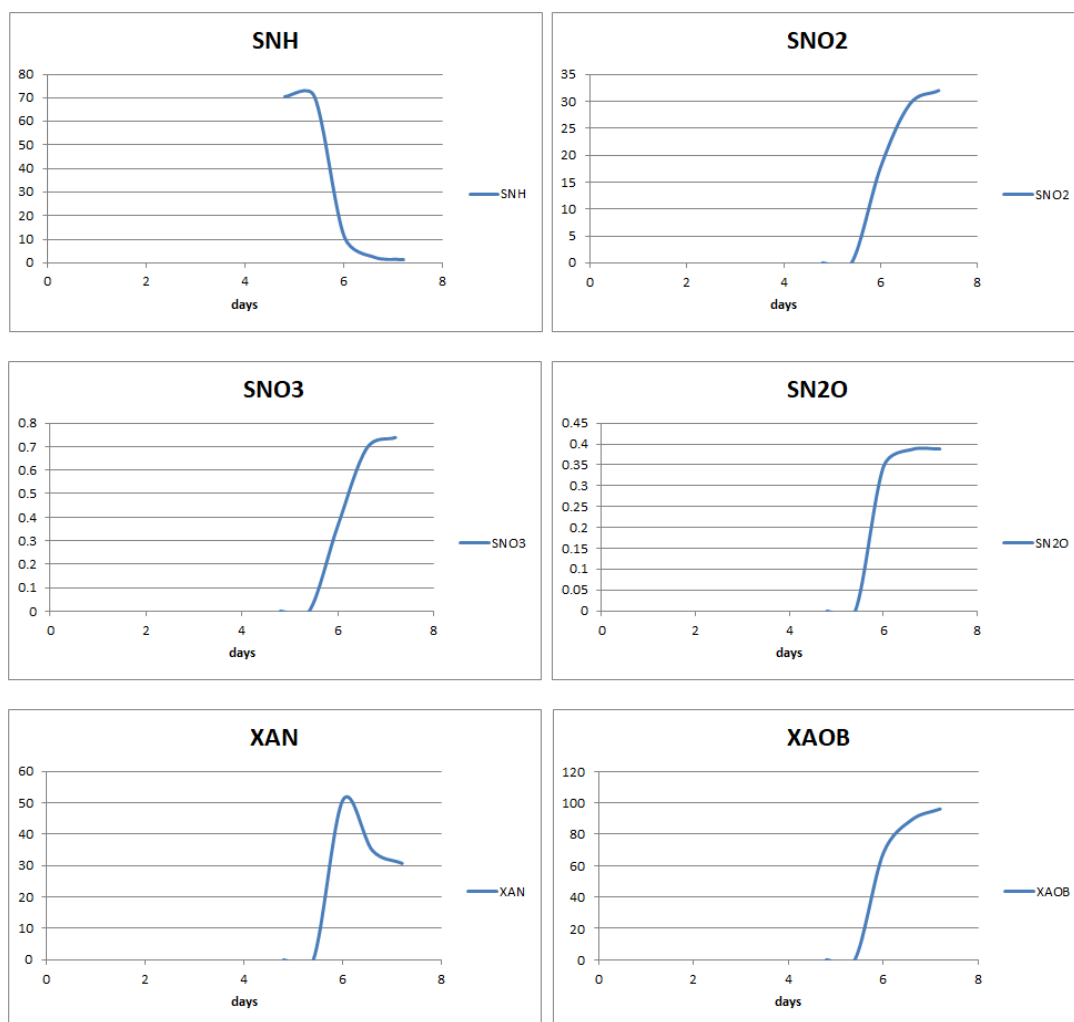
Το αμμωνιακό άζωτο στην ανοξική δεξαμενή έχει την ίδια συμπεριφορά στις αλλαγές του sr όπως και στην αερόβια δεξαμενή. Η αμμωνία για μικρό sr έχει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στην ανοξική δεξαμενή σε σχέση με την αερόβια καθώς δεν πραγματοποιείται περαιτέρω απομάκρυνση. Ενώ όσο αυξάνεται το sr πάνω από το 80% που ευνοεί την ανάπτυξη των αναπνοοχ η συγκέντρωσή της μειώνεται. Τα νιτρώδη για $sr=60\%$ έχουν μικρή συγκέντρωση, οποία μειώνεται μέχρι να φτάσει το 80%. Από εκεί και μετά αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό και έχει μέγιστο για 90%. Η μείωση της συγκέντρωσης των νιτρωδών στην ανοξική δεξαμενή σε σχέση με την αερόβια οφείλεται κυρίως στην απονιτροποίηση των νιτροποιητών για μικρή απομάκρυνση στερεών. Η ανάπτυξη των αναπνοοχ για sr μεγαλύτερο του 80% συμβάλει επίσης στην απομάκρυνση νιτρωδών από την ανοξική δεξαμενή. Τα νιτρικά έχουν παρόμοια συμπεριφορά στις διακυμάνσεις του sr με την αερόβια δεξαμενή. Η συγκέντρωσή τους για sr μεγαλύτερο του 80% είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην αερόβια, λόγω της ανάπτυξης των ΧΑΝ. Τα ΑΟΒ βακτήρια έχουν παρόμοια μεταβολή για τις διακυμάνσεις του sr με την αερόβια δεξαμενή και η συγκέντρωσή τους είναι λίγο μικρότερη καθώς η ανοξικές συνθήκες δεν ευνοούν την ανάπτυξή τους. Τα νιτροποιητικά βακτήρια έχουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά τις διακυμάνσεις του sr με αυτήν στην αερόβια δεξαμενή. Το υποξείδιο του αζώτου παρουσιάζει αύξηση για απομάκρυνση στερεών στο διάστημα 60-70%. Στην συνέχεια μειώνεται και μηδενίζεται για $sr=80\%$, όπου δεν πραγματοποιείται η νιτρωδοποίηση και αυξάνεται μέχρι το $sr=90\%$. Από εκεί και μετά ακολουθεί πάλι μείωση. Η συμπεριφορά αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις μεταβολές της αμμωνίας λόγω νιτρωδοποίησης στην αερόβια δεξαμενή. Η συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου είναι μεγαλύτερη στην ανοξική δεξαμενή επειδή πραγματοποιείται η απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Η υδροξυλαμίνη παίρνει για sr μικρότερο του 70% τις υψηλότερες τιμές της. Από 70-80% μειώνεται η τιμή της, μετά αυξάνεται ως το 90%, όπου από εκεί μειώνεται με μεγάλο ρυθμό και πιάνει την ελάχιστη τιμή της. Οι συγκεντρώσεις της υδροξυλαμίνης είναι μικρότερες στην ανοξική δεξαμενή σε σχέση με τις αντίστοιχες της αερόβιας, λόγω της απονιτροποίησης που πραγματοποιείται από τους νιτροποιητές. Τα TSS και το ολικό άζωτο έχουν την ίδια συμπεριφορά ως προς τις διακυμάνσεις του sr με τα

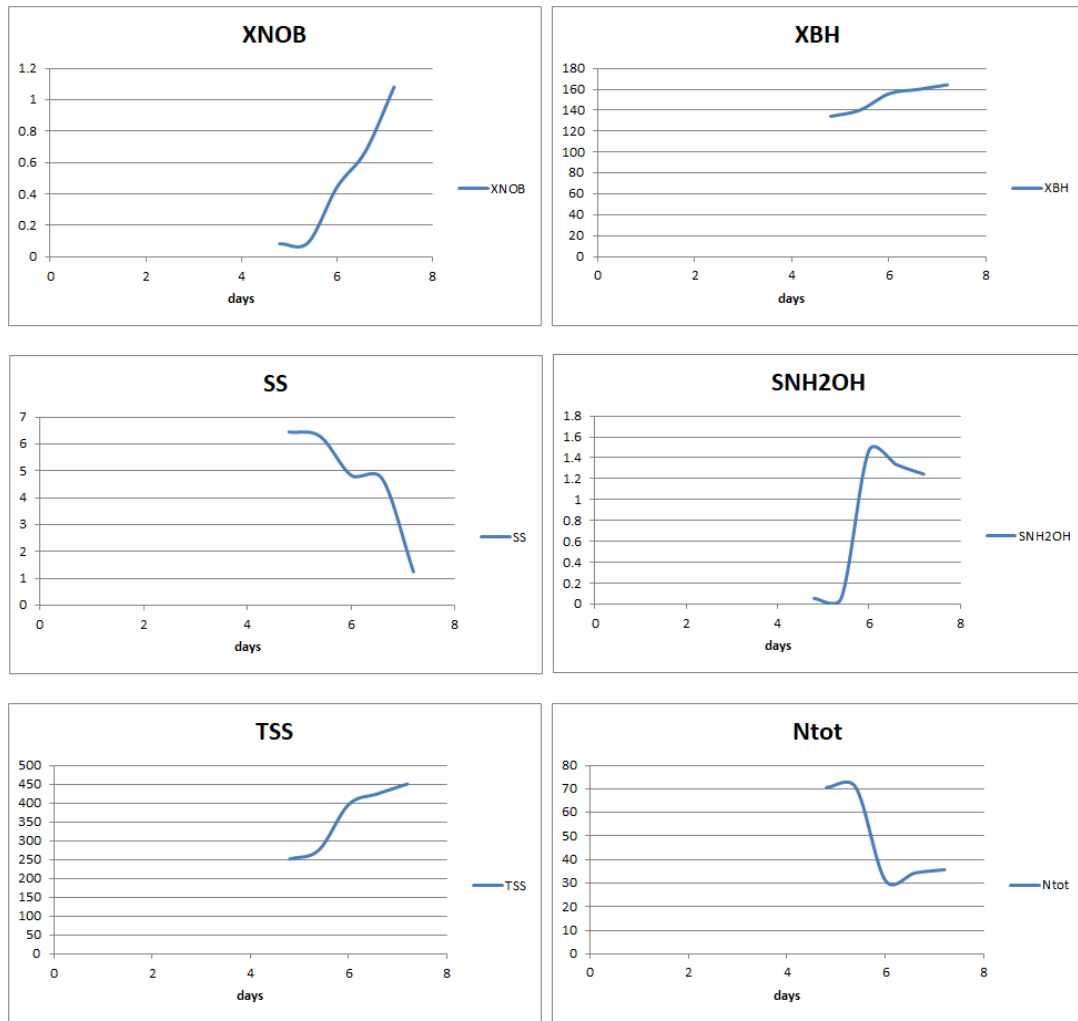
αντίστοιχα στην αερόβια δεξαμενή. Οι συγκεντρώσεις του ολικού αζώτου γενικά είναι πιο χαμηλές στην ανοξική δεξαμενή από ότι στην αερόβια, επειδή εκεί πραγματοποιείται η απομάκρυνση του αζώτου. Η πιο αποτελεσματική απομάκρυνση γίνεται για $sr=95\%$, όπου το N_{tot} παίρνει την μικρότερη τιμή του.

4.5.5 Επίδραση του χρόνου παραμονής στερεών (srt)

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα για την αερόβια και την ανοξική δεξαμενή.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την αερόβια δεξαμενή:



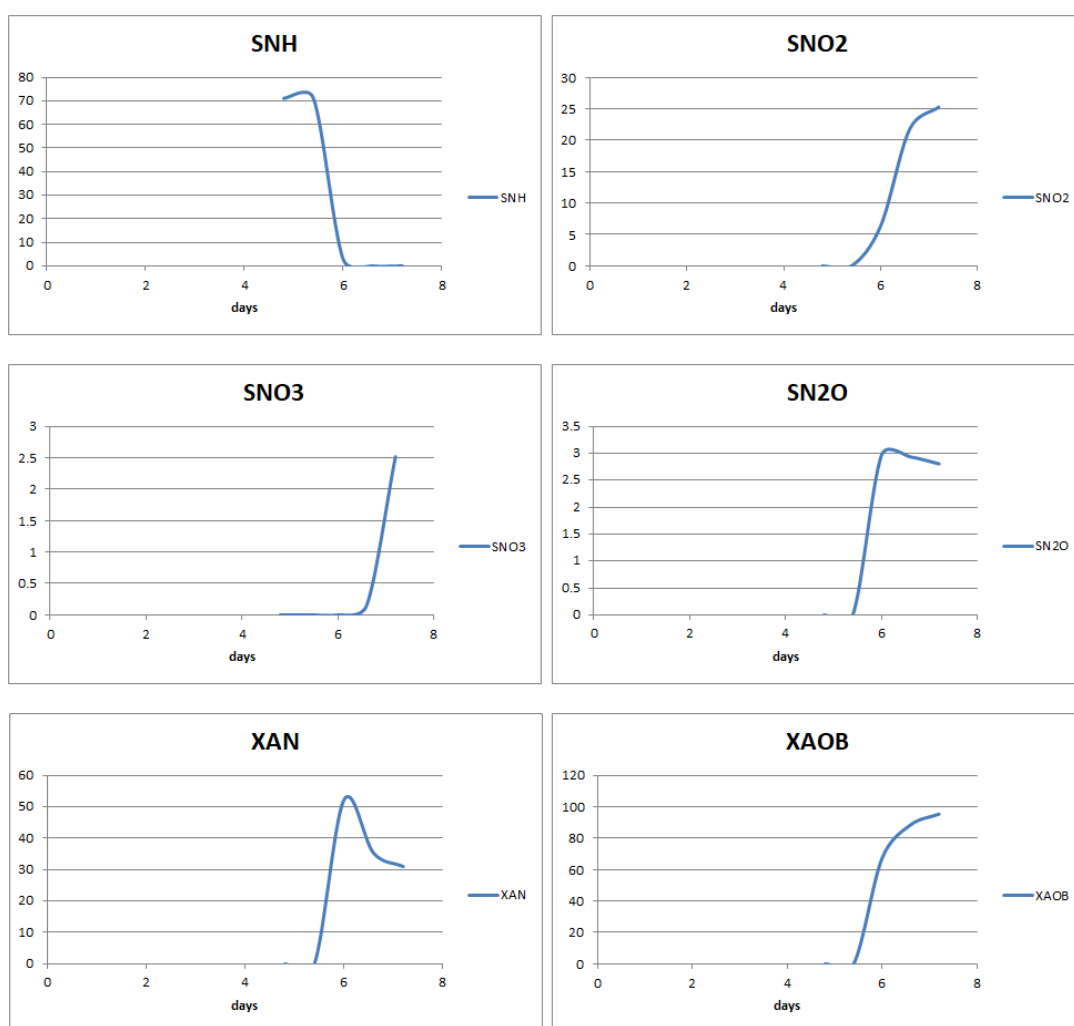


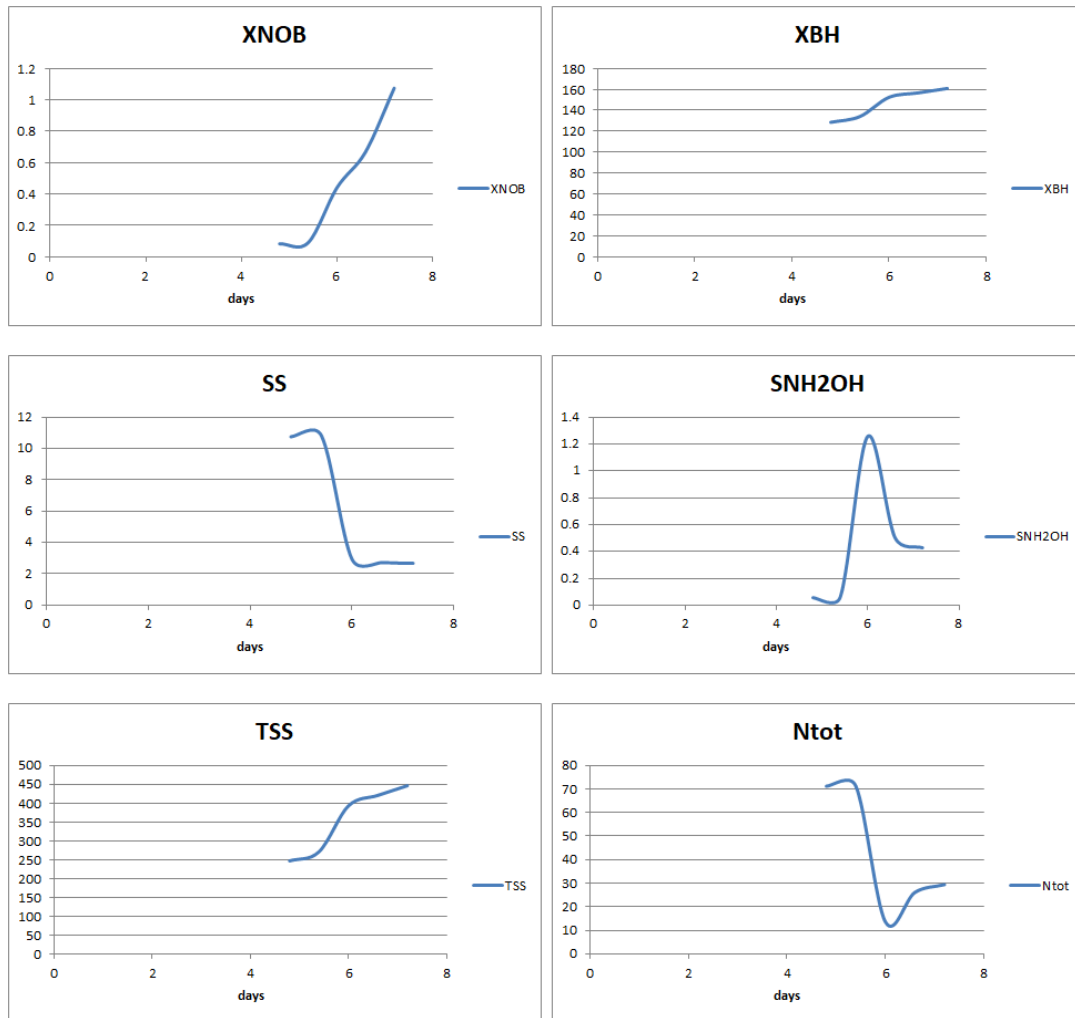
Σχήμα 42: Επίδραση του χρόνου παραμονής στερεών στην αερόβια δεξαμενή

Η διεργασία της νιτροδοποίησης, όπως φαίνεται από το διάγραμμα του αμμωνιακού αζώτου (SNH) και από το διάγραμμα των νιτρωδών (SNO₂), πραγματοποιείται για srt μεγαλύτερα των 5 ημερών. Από τις 5 ημέρες και μετά ενεργοποιείται η νιτροποίηση και η ανάπτυξη των NOB βακτηρίων. Αυτή όμως δεν φτάνει υψηλές συγκεντρώσεις καθώς οι παράμετροι του συστήματος δεν την ευνοούν. Η ανάπτυξη των AOB βακτηρίων επίσης ξεκινάει μετά τις 5 ημέρες και αυξάνεται όσο αυξάνεται το srt. Το υποξείδιο του αζώτου για srt μικρότερο των 5 ημερών έχει μηδενική συγκέντρωση, εξαιτίας της μη πραγματοποίησης της νιτροδοποίησης. Για μεγαλύτερα srt αυξάνεται η παραγωγή του SN₂O, η οποία φτάνει το μέγιστο τις στις 7.2 ημέρες. Επίσης, η υδροξυλαμίνη αρχίζει να παράγεται μετά τις 5 ημέρες και έχει μέγιστη τιμή στις 6 ημέρες, όπου μετά από αυτήν αρχίζει να μειώνεται. Η μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι η νιτροδοποίηση στην αερόβια δεξαμενή μετά το srt=6.6 γίνεται με μικρότερο ρυθμό. Η ανάπτυξη των αναπνοοπραγματοποιείται αφού ξεκινήσει η μερική νιτροδοποίηση, φτάνει στο μέγιστο της στις 6 ημέρες και στην συνέχεια φθίνει καθώς ο λόγος αμμωνίας: νιτρωδών δεν είναι πλέον ευνοϊκός. Η αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών ευνοεί, όπως είναι

λογικό και την ανάπτυξη των ετερότροφων μικροοργανισμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των SS που καταναλώνονται από τους ΧΒΗ. Τα TSS παρουσιάζουν αύξηση στην συγκέντρωση τους,όσο αυξάνεται το srt , καθώς αυξάνονται τα πτητικά στερεά στο σύστημα. Η συγκέντρωση του ολικού αζώτου έχει μέγιστο για $srt=5$ d, όπου δεν πραγματοποιείται απομάκρυνση αζώτου από τα λύματα. Με την πραγματοποίηση της νιτρωδοποίησης, απομακρύνεται και το άζωτο. Η μέγιστη απομάκρυνση σημειώνεται για $srt=6$ h και για πιο μεγάλους χρόνους αρχίζει και μειώνεται η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης, οπότε αυξάνεται η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στο διάγραμμα.

Τα διαγράμματα που προέκυψαν για την ανοξική δεξαμενή παρουσιάζονται παρακάτω:





Σχήμα 43: Επίδραση του χρόνου παραμονής στερεών στην ανοξική δεξαμενή

Το αμμωνιακό άζωτο και τα νιτρώδη έχουν την ίδια συμπεριφορά στις διακυμάνσεις του srt με τις αντιστοιχες στην αερόβια δεξαμενή. Οι συγκεντρώσεις τους στην ανοξική δεξαμενή είναι μικρότερες, λόγω της απομάκρυνσης του αζώτου από το σύστημα. Τα νιτρικά έχουν μηδενική συγκέντρωση μέχρι το srt να ξεπεράσει τις 6 ημέρες και για μεγαλύτερο srt η συγκέντρωσή τους αυξάνεται. Η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην ανοξική δεξαμενή σε σχέση με την αντίστοιχη στην αερόβια οφείλεται στην ανάπτυξη των αναπνοοχ (XAN). Τα αυτοτροφικά και τα νιτροποιητικά βακτήρια έχουν ίδια συμπεριφορά στις διακυμάνσεις του srt με τις αντίστοιχες στην αερόβια δεξαμενή. Η συγκέντρωση των AOB μειώνεται ελαφρώς όταν εισέρχονται στην ανοξική δεξαμενή, εξαιτίας της έλλειψης οξυγόνου. Το ίδιο ισχύει και για την συγκέντρωση των NOB. Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση στην συγκέντρωση των αναπνοοχ, καθώς στην ανοξική δεξαμενή λαμβάνει χώρα η ανάπτυξή τους. Ως προς τις διακυμάνσεις του srt τα XAN έχουν παρόμοιο διάγραμμα στην ανοξική με αυτό της αερόβιας. Το υποξείδιο του αζώτου πραγματοποιεί αλματώδη αύξηση στην συγκέντρωσή του για srt μεγαλύτερο των 5.5 ημερών, με μέγιστο στις 6 ημέρες όπου από εκεί και μετά αρχίζει να φθίνει. Η

συγκέντρωσή του είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες στην αερόβια δεξαμενή. Αυτό οφείλεται στην απονιτροποίηση των νιτροποιητών, που είναι παρόντες στην ανοξική δεξαμενή. Η υδροξυλαμίνη ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά, με αυτήν στην αερόβια δεξαμενή για srt μικρότερο των 6 ημερών. Όσο αυξάνεται το srt ευνοείται η απονιτροποίηση των νιτροποιητών, η οποία καταναλώνει υδροξυλαμίνη για να πραγματοποιηθεί και όπως φαίνεται στο διάγραμμα η συγκέντρωσή της μειώνεται αισθητά σε σύγκριση με την συγκέντρωση στην αερόβια δεξαμενή για τα αντίστοιχα srt. Το διάγραμμα των ΧΒΗ για τις διακυμάνσεις του srt στην ανοξική δεξαμενή είναι παρόμοιο με αυτό για τις διακυμάνσεις στην αερόβια δεξαμενή. Η συγκέντρωση των ΧΒΗ μειώνεται σε σχέση της αερόβιας δεξαμενής, καθώς η ανοξικές συνθήκες δεν ευνοούν την ανάπτυξη των ΧΒΗ. Η μείωση δεν είναι πολύ μεγάλη, επειδή αναπτύσσονται ανοξικά και αναπτύσσονται κατά την απονιτροποίηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση των SS στην ανοξική σε σχέση με την αερόβια για τις αντίστοιχες τιμές του srt. Η συμπεριφορά των TSS και του ολικού αζώτου για τις διακυμάνσεις του srt είναι παρόμοια με της αερόβιας δεξαμενής. Οι συγκεντρώσεις των TSS είναι μικρότερες στην ανοξική δεξαμενή από τις αντίστοιχες στην ανοξική γιατί μειώνονται τα συνολικά πτητικά στερεά. Το ίδιο ισχύει για τις συγκεντρώσεις του ολικού αζώτου, επειδή στην ανοξική δεξαμενή πραγματοποιείται η απομάκρυνση του αζώτου από το σύστημα, μέσω της ανάπτυξης των ΧΑΝ και της απονιτροποίησης.

Συμπερασματικά, με βάση την ανωτέρω διερεύνηση τα βέλτιστα αποτελέσματα ως προς την απομάκρυνση του αζώτου μέσω νιτροδοποίησης-αναπνοής επιτυγχάνονται για τις ακόλουθες συνθήκες:

Αερόβιος υδραυλικός χρόνος παραμονής = 6 h

Ανοξικός υδραυλικός χρόνος παραμονής = 4 h

Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού = 2.5 mg/L

Απομάκρυνση στερεών στην πρωτοβάθμια καθίζηση = 90 %

Χρόνος παραμονής στερεών = 6 d

Αξίζει να επισημανθεί ότι η επίτευξη συνθηκών απομάκρυνσης των στερεών κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία υψηλότερων από 80% προϋποθέτει η προσθήκη χημικών γεγονός που αναμένεται να αυξήσει το κόστος λειτουργίας μίας ΕΕΛ. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις βέλτιστες λειτουργικές παραμέτρους.

Πίνακας 18 : Αποτελέσματα για τις βέλτιστες λειτουργικές παραμέτρους

Position	Q (mg/l)	SI (mg/l)	SS (mg/l)	XI (mg/l)	XS (mg/l)	XBH (mg/l)	XAOB (mg/l)	XNOB (mg/l)	XAN (mg/l)	SO (mg/l)	SNO (mg/l)	SNH (mg/l)	SNO2 (mg/l)
1	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
2	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
3	0.76	39.04	145.61	32.64	403.59	29.20	0.32	0.10	0.00	0.09	0.00	69.44	0.14
4	0.74	39.04	14.92	3.35	41.37	2.99	0.03	0.01	0.00	0.09	0.00	69.44	0.14
5	1.31	39.07	9.05	109.24	25.36	180.96	65.89	0.44	53.35	0.06	0.00	39.10	2.25
6	1.31	39.07	9.05	109.24	25.36	180.96	65.89	0.44	53.35	0.06	0.00	39.10	2.25
7	1.31	39.07	9.05	109.24	25.36	180.96	65.89	0.44	53.35	0.06	0.00	39.10	2.25
8	1.31	39.07	9.05	109.24	25.36	180.96	65.89	0.44	53.35	0.01	0.00	39.10	2.25
9	1.31	39.09	3.75	110.65	4.98	189.30	68.90	0.45	54.00	2.50	0.00	9.43	17.24
10-18	1.31	39.11	1.49	111.57	2.17	186.28	68.45	0.45	55.47	0.02	0.17	0.08	4.96
19	1.31	39.11	1.49	111.57	2.17	186.28	68.45	0.45	55.47	0.02	0.00	0.08	4.96
20	0.72	39.11	1.49	0.49	0.01	0.81	0.30	0.00	0.24	0.02	0.00	0.08	4.96
21	0.60	39.11	1.49	10.10	0.20	16.86	6.20	0.04	5.02	0.02	0.00	0.08	4.96
22	0.60	39.11	1.49	10.10	0.20	16.86	6.20	0.04	5.02	0.02	0.00	0.08	4.96
23	0.60	39.11	1.49	10.10	0.20	16.86	6.20	0.04	5.02	0.02	0.00	0.08	4.96

Πίνακας 18 : Αποτελέσματα για τις βέλτιστες λειτουργικές παραμέτρους

Position	Q (mg/l)	SI (mg/l)	SS (mg/l)	XI (mg/l)	XS (mg/l)	XBH (mg/l)	XAOB (mg/l)	XNOB (mg/l)	XAN (mg/l)	SO (mg/l)	SNO (mg/l)	SNH (mg/l)	SNO2 (mg/l)
24	0.60	39.11	1.49	10.10	0.20	16.87	6.20	0.04	5.02	0.02	0.00	0.08	4.96
25	0.60	39.11	1.49	10.10	0.20	16.87	6.20	0.04	5.02	0.02	0.00	0.08	4.96
26	0.60	39.11	1.49	10.10	0.20	16.87	6.20	0.04	5.02	0.02	0.00	0.08	4.96
27	0.60	39.11	1.49	245.4 5	4.76	409.86	150.60	0.98	121.97	0.02	0.00	0.08	4.96
28	0.02	39.11	1.49	245.4 5	4.76	409.86	150.60	0.98	0.00	0.02	0.00	0.08	4.96
29	0.57	39.11	1.49	245.4 5	4.76	409.86	150.60	0.98	121.97	0.02	0.00	0.08	4.96
30	0.57	39.11	1.49	245.4 5	4.76	409.86	150.60	0.98	121.97	0.02	0.00	0.08	4.96
31	0.57	39.11	1.49	245.4 5	4.76	409.86	150.60	0.98	121.97	0.02	0.00	0.08	4.96
32	0.02	39.11	1.49	12.47	0.24	20.82	7.65	0.05	0.00	0.00	0.00	0.08	4.96
33	0.00	39.11	1.49	14794 .97	286.96	24705.4 1	9077.53	59.16	0.00	0.00	0.00	0.08	4.96
34	0.72	39.11	1.49	0.49	0.01	0.81	0.30	0.00	0.24	0.00	0.00	0.08	4.96
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.02	39.04	596.5 7	1203. 46	14882. 09	1076.65	11.86	3.71	0.00	0.09	0.00	69.44	0.14
38	0.01	39.04	596.5 7	4011. 52	49606. 97	3588.83	39.55	12.38	0.00	0.00	0.00	69.44	0.14
39	0.01	39.04	596.5	84.16	1040.7	75.29	0.83	0.26	0.00	0.00	0.00	69.44	0.14

Πίνακας 18 : Αποτελέσματα για τις βέλτιστες λειτουργικές παραμέτρους

Position	Q (mg/l)	SI (mg/l)	SS (mg/l)	XI (mg/l)	XS (mg/l)	XBH (mg/l)	XAOB (mg/l)	XNOB (mg/l)	XAN (mg/l)	SO (mg/l)	SNO (mg/l)	SNH (mg/l)	SNO2 (mg/l)
			7		1								
40	0.01	39.05	560.8 1	4659. 44	46643. 61	4857.60	582.59	15.19	0.00	0.00	0.00	65.27	0.43
41	0.01	1325. 76	362.9 2	6427. 51	16690. 21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1702.02	0.00
42	0.01	1325. 76	362.9 2	6427. 51	16690. 21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1702.02	0.00
43	0.01	1325. 76	362.9 2	357.0 7	927.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1702.02	0.00
44	0.04	204.2 7	248.0 5	80.83	469.23	36.47	4.37	0.11	0.00	0.00	0.00	241.91	2.70
45	0.00	1325. 76	362.9 2	61076 .27	15859 5.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1702.02	0.00

Πίνακας 19 : Αποτελέσματα για τις βέλτιστες λειτουργικές παραμέτρους

Position	SNO3(mg/l)	SN2(mg/l)	SN2O(mg/l)	SNH2OH(mg/l)	XNV(mg/l)	X(mg/l)	VSS(mg/l)	TSS(mg/l)	SALK(mg/l)	Ntot (mg/l)
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
3.00	0.02	0.00	0.06	0.00	78.73	465.85	328.06	406.79	523.18	69.66
4.00	0.02	0.00	0.06	0.00	8.07	47.75	33.63	41.70	523.18	69.66
5.00	0.28	0.00	0.99	0.42	117.35	435.23	306.50	423.86	523.27	43.03
6.00	0.28	0.00	0.99	0.42	117.35	435.23	306.50	423.86	523.27	43.03

Position	SNO3(mg/l)	SN2(mg/l)	SN2O(mg/l)	SNH2OH(mg/l)	XNV(mg/l)	X(mg/l)	VSS(mg/l)	TSS(mg/l)	SALK(mg/l)	Ntot (mg/l)
7.00	0.28	0.00	0.99	0.42	117.35	435.23	306.50	423.86	523.27	43.03
8.00	0.28	0.00	0.99	0.42	117.35	435.23	0.00	0.00	523.27	43.03
9.00	0.51	0.19	0.32	1.45	117.32	428.28	301.60	418.92	523.10	28.94
10-18	0.61	0.59	2.17	0.95	117.29	424.38	298.86	416.15	523.38	8.95
19.00	0.61	0.00	2.17	0.95	117.29	424.38	298.86	416.15	523.38	8.78
20.00	0.61	0.00	2.17	0.95	0.51	1.85	1.30	1.82	523.38	8.78
21.00	0.61	0.00	2.17	0.95	10.62	38.41	27.05	37.67	523.38	8.78
22.00	0.61	0.00	2.17	0.95	10.62	38.42	27.05	37.67	523.38	8.78
23.00	0.61	0.00	2.17	0.95	10.62	38.42	27.06	37.67	523.38	8.78
24.00	0.61	0.00	2.17	0.95	10.62	38.42	27.06	37.67	523.38	8.78
25.00	0.61	0.00	2.17	0.95	10.62	38.42	27.06	37.68	523.38	8.78
26.00	0.61	0.00	2.17	0.95	10.62	38.42	27.06	37.68	523.38	8.78
27.00	0.61	0.00	2.17	0.95	257.92	933.62	657.48	915.40	523.38	8.78
28.00	0.61	0.00	2.17	0.95	257.92	811.65	571.59	829.50	523.38	8.78
29.00	0.61	0.00	2.17	0.95	257.92	933.62	657.48	915.40	523.38	8.78
30.00	0.61	0.00	2.17	0.95	257.92	933.62	657.48	915.40	523.38	8.78
31.00	0.61	0.00	2.17	0.95	257.92	933.62	657.48	915.40	523.38	8.78
32.00	0.61	0.00	2.17	0.00	13.10	41.23	29.04	42.14	523.38	7.83
33.00	0.61	0.00	2.17	0.95	15546.47	48924.01	34453.53	50000.00	523.38	8.78
34.00	0.61	0.00	2.17	0.95	0.51	1.85	1.30	1.82	523.38	8.78
35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37.00	0.02	0.00	0.06	0.00	2902.98	17177.77	12097.02	15000.00	523.18	69.66
38.00	0.02	0.00	0.06	0.00	9676.59	57259.25	40323.41	50000.00	523.18	69.66

Position	SNO3(mg/l)	SN2(mg/l)	SN2O(mg/l)	SNH2OH(mg/l)	XNV(mg/l)	X(mg/l)	VSS(mg/l)	TSS(mg/l)	SALK(mg/l)	Ntot (mg/l)
39.00	0.02	0.00	0.06	0.00	203.01	1201.24	845.95	1048.95	523.18	69.66
40.00	0.05	0.00	0.19	0.06	10029.28	56758.43	39970.73	50000.00	523.19	66.00
41.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10029.28	23117.72	16280.09	26309.36	3821.44	1702.02
42.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10029.28	23117.72	16280.09	26309.36	3821.44	1702.02
43.00	0.00	0.00	0.00	0.00	557.17	1284.28	904.43	1461.59	3821.44	1702.02
44.00	0.33	0.00	1.18	0.00	146.83	591.01	416.21	563.04	946.74	246.14
45.00	0.00	0.00	0.00	0.00	95301.39	219672.00	154698.60	250000.00	3821.44	1702.02

4.6. Δεύτερη Διάταξη των Δεξαμενών

Η ανάπτυξη της αναπνοο βιομάζας και γενικότερα η πραγματοποίηση των περισσότερων διεργασιών που μοντελοποιήθηκαν επηρεάζονται από την χωρική διάταξη των δεξαμενών. Έτσι για την μελέτη των διεργασιών νιτροδοποίησης-ανοξικής απομάκρυνσης της αμμωνίας από τους αυτοτροφικούς μικροοργανισμούς και για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των αναπνοο βακτηρίων κρίθηκε σκόπιμο να προσομοιωθεί ένα διαφορετικό σύστημα δεξαμενών, το οποίο περιγράφηκε προηγουμένως στην αρχή του κεφαλαίου.

4.6.1. Παρουσίαση του Σεναρίου Αναφοράς για την Δεύτερη Διάταξη

το σενάριο αναφοράς επιλέχθηκε με την ίδια μέθοδο όπως στην περίπτωση της πρώτης διάταξης των δεξαμενών, το οποίο αποτελεί ένα ενδεικτικό παράδειγμα για τον τρόπο που ανταποκρίνεται το σύστημα στην δεύτερη χωρική διάταξη των δεξαμενών και την αποτελεσματικότητά του ως προς την απομάκρυνση του δεσμευμένου αζώτου από τα λύματα.

Ο καθορισμός των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος έγινε με σκοπό την βέλτιστη λειτουργία της διαδικασίας A/B. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που επιλέχθηκαν για τον υδραυλικό χρόνο παραμονής της αερόβιας και της ανοξικής δεξαμενής, ο χρόνος παραμονής στερεών στο σύστημα επανακυκλοφορίας μεταξύ της αερόβιας δεξαμενής και της δεξαμενής τελικής καθίζησης και η παροχή οξυγόνου στην αερόβια δεξαμενή.

Πίνακας 20: Λειτουργικές παράμετροι του πρώτου σεναρίου της δεύτερης διάταξης

Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής στην δεξαμενή αερισμού (HRT)	6.0 h
Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής στην ανοξική δεξαμενή (HRT)	44.0 h
Χρόνος Παραμονής Στερεών (SRT)	4.3 d
Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού (SO)	2.0 mg/l

Η επίδραση της μη επανακυκλοφορίας των λυμάτων στην ανοξική δεξαμενή είναι εμφανής καθώς για την πραγματοποίηση της ανάπτυξης των αναπνοο βακτηρίων απαιτείται πολύ μεγάλος χρόνος παραμονής που οδηγεί σε δεξαμενές με μεγάλους όγκους. Το σύστημα αποτελεί έναν χημειοστάτη και έχει ως πλεονέκτημα το διαχωρισμό των διεργασιών, ο οποίος διευκολύνει την μελέτη τους. Επίσης,

παρατηρείται ότι η ισορροπία της νιτρωδοποίησης, όταν δεν υπάρχει η ανοξική δεξαμενή επιτυγχάνεται σε μικρότερο χρόνο παραμονής στερεών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς της πρώτης διάταξης για την ίδια παροχή οξυγόνου. Η σύσταση των εισερχόμενων λυμάτων ακόμη που προσομοιώθηκαν στο μοντέλο είναι η ίδια με των σεναρίων της πρώτης διάταξης και φαίνεται στους πίνακες ταδε.

Οι κινητικές και στοιχειομετρικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο νέο σενάριο αναφοράς είναι οι ίδιες που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο αναφοράς της πρώτης διάταξης.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου αναφοράς για την νέα διάταξη των δεξαμενών. Ειδική προσοχή πρέπει να δοθεί στην αλλαγή των θέσεων, αφού αυτές περιγράφουν το σημείο που βρίσκεται η εικονική δεξαμενή. Στην πρώτη διάταξη η αερόβια δεξαμενή βρίσκεται στην θέση 9 και η ανοξική στην θέση 10-18, ενώ στην νέα διάταξη η αερόβια δεξαμενή βρίσκεται στην θέση 9-18 και η ανοξική δεξαμενή στην θέση 35. Στην εικόνα 4.1 δεν υπάρχει δεξαμενή στην θέση 35 καθώς αυτή κατασκευάστηκε για την πρώτη διάταξη.

Πίνακας 21 : Αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου της δεύτερης διάταξης

Position	Q (mg/l)	SI (mg/l)	SS (mg/l)	XI(mg/l)	XS(mg/l)	XBH (mg/l)	XAOB (mg/l)	XNOB (mg/l)	XAN (mg/l)	SO (mg/l)	SNO (mg/l)	SNH (mg/l)	SNO2 (mg/l)
1	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
2	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
3	0.75	39.19	146.42	32.83	405.77	29.50	0.36	0.10	0.00	0.10	0.00	70.43	0.81
4	0.73	39.19	15.01	3.37	41.60	3.02	0.04	0.01	0.00	0.10	0.00	70.43	0.81
5	1.31	39.21	9.84	126.08	29.12	276.88	94.47	0.56	2.17	0.93	0.00	47.15	15.84
6	1.31	39.21	9.84	126.08	29.12	276.88	94.47	0.56	2.17	0.93	0.00	47.15	15.84
7	1.31	39.21	9.84	126.08	29.12	276.88	94.47	0.56	2.17	0.93	0.00	47.15	15.84
8	1.31	39.21	9.84	126.08	29.12	276.88	94.47	0.56	2.17	0.01	0.00	47.15	15.84
9-18	1.31	39.23	3.23	128.20	5.96	284.09	97.51	0.57	2.24	2.00	0.00	17.37	35.08
19	1.31	39.23	3.23	128.20	5.96	284.09	97.51	0.57	2.24	1.99	0.00	17.37	35.08
20	0.72	39.23	3.23	0.56	0.03	1.24	0.43	0.00	0.01	1.99	0.00	17.37	35.08
21	0.59	39.23	3.23	11.63	0.54	25.76	8.84	0.05	0.20	1.99	0.00	17.37	35.08
22	0.59	39.23	3.23	11.63	0.54	25.76	8.84	0.05	0.20	1.99	0.00	17.37	35.08
23	0.59	39.23	3.23	11.63	0.54	25.76	8.84	0.05	0.20	1.99	0.00	17.37	35.08
24	0.59	39.23	3.23	11.63	0.54	25.77	8.84	0.05	0.20	1.99	0.00	17.37	35.08
25	0.59	39.23	3.23	11.63	0.54	25.77	8.84	0.05	0.20	1.99	0.00	17.37	35.08
26	0.59	39.23	3.23	11.63	0.54	25.77	8.84	0.05	0.20	1.99	0.00	17.37	35.08
27	0.59	39.23	3.23	283.09	13.15	627.25	215.30	1.27	4.94	1.99	0.00	17.37	35.08
28	0.02	39.23	3.23	283.09	13.15	627.25	215.30	1.27	0.00	1.99	0.00	17.37	35.08
29	0.57	39.23	3.23	283.09	13.15	627.25	215.30	1.27	4.94	1.99	0.00	17.37	35.08
30	0.57	39.23	3.23	283.09	13.15	627.25	215.30	1.27	4.94	1.99	0.00	17.37	35.08
31	0.57	39.23	3.23	283.09	13.15	627.25	215.30	1.27	4.94	1.99	0.00	17.37	35.08
32	0.02	39.23	3.23	14.46	0.67	32.04	11.00	0.06	0.00	0.00	0.00	17.37	35.08
33	0.00	39.23	3.23	12712.61	590.75	28168.25	9668.62	56.92	0.00	0.00	0.00	17.37	35.08

Position	Q (mg/l)	SI (mg/l)	SS (mg/l)	XI(mg/l)	XS(mg/l)	XBH (mg/l)	XAOB (mg/l)	XNOB (mg/l)	XAN (mg/l)	SO (mg/l)	SNO (mg/l)	SNH (mg/l)	SNO2 (mg/l)
34	0.72	39.23	3.23	0.56	0.03	1.24	0.43	0.00	0.01	1.99	0.00	17.37	35.08
35	0.72	39.53	2.28	0.67	0.01	1.13	0.43	0.00	2.66	0.30	0.00	0.14	16.44
36	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.02	39.19	596.50	1203.72	14878.14	1081.71	13.25	3.72	0.00	0.10	0.00	70.43	0.81
38	0.01	39.19	596.50	4012.38	49593.79	3605.71	44.17	12.38	0.00	0.00	0.00	70.43	0.81
39	0.01	39.19	596.50	84.18	1040.43	75.64	0.93	0.26	0.00	0.00	0.00	70.43	0.81
40	0.01	39.19	557.60	4582.92	46380.29	5216.47	675.32	15.30	0.00	0.00	0.00	66.95	3.06
41	0.01	1339.44	364.46	6500.69	16829.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1724.82	0.00
42	0.01	1339.44	364.46	6500.69	16829.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1724.82	0.00
43	0.01	1339.44	364.46	361.25	935.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1724.82	0.00
44	0.04	225.55	276.52	90.19	522.83	43.73	5.66	0.13	0.00	0.00	0.00	281.88	17.26
45	0.00	1339.44	364.46	61606.28	159488.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1724.82	0.00

Position	SNO3(mg/l)	SN2(mg/l)	SN2O(mg/l)	SNH2OH(mg/l)	XNV(mg/l)	X(mg/l)	VSS(mg/l)	TSS(mg/l)	SALK(mg/l)	Ntot
1	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
3	0.00	0.00	0.01	0.00	79.12	468.57	329.98	409.10	523.92	71.25
4	0.00	0.00	0.01	0.00	8.11	48.04	33.83	41.94	523.92	71.25
5	0.02	0.00	0.22	0.60	140.79	529.28	372.73	513.52	523.69	63.84
6	0.02	0.00	0.22	0.60	140.79	529.28	372.73	513.52	523.69	63.84
7	0.02	0.00	0.22	0.60	140.79	529.28	372.73	513.52	523.69	63.84
8	0.02	0.00	0.22	0.60	140.79	529.28	0.00	0.00	523.69	63.84
9-18	0.04	0.32	0.49	1.37	140.72	518.58	365.19	505.91	523.39	54.35
19	0.04	0.00	0.49	1.37	140.72	518.58	365.19	505.91	523.39	54.35

Position	SNO3(mg/l)	SN2(mg/l)	SN2O(mg/l)	SNH2OH(mg/l)	XNV(mg/l)	X(mg/l)	VSS(mg/l)	TSS(mg/l)	SALK(mg/l)	Ntot
20	0.04	0.00	0.49	1.37	0.62	2.27	1.60	2.21	523.39	54.35
21	0.04	0.00	0.49	1.37	12.76	47.03	33.12	45.88	523.39	54.35
22	0.04	0.00	0.49	1.37	12.76	47.03	33.12	45.88	523.39	54.35
23	0.04	0.00	0.49	1.37	12.76	47.03	33.12	45.88	523.39	54.35
24	0.04	0.00	0.49	1.37	12.76	47.03	33.12	45.88	523.39	54.35
25	0.04	0.00	0.49	1.37	12.76	47.03	33.12	45.89	523.39	54.35
26	0.04	0.00	0.49	1.37	12.76	47.04	33.12	45.89	523.39	54.35
27	0.04	0.00	0.49	1.37	310.54	1145.00	806.34	1116.88	523.39	54.35
28	0.04	0.00	0.49	1.37	310.54	1140.07	802.86	1113.41	523.39	54.35
29	0.04	0.00	0.49	1.37	310.54	1145.00	806.34	1116.88	523.39	54.35
30	0.04	0.00	0.49	1.37	310.54	1145.00	806.34	1116.88	523.39	54.35
31	0.04	0.00	0.49	1.37	310.54	1145.00	806.34	1116.88	523.39	54.35
32	0.04	0.00	0.49	0.00	15.86	58.24	41.01	56.87	523.39	52.98
33	0.04	0.00	0.49	1.37	13945.68	51197.13	36054.32	50000.00	523.39	54.35
34	0.04	0.00	0.49	1.37	0.62	2.27	1.60	2.21	523.39	54.35
35	2.85	0.07	0.73	0.90	0.62	4.90	3.45	4.07	528.21	21.06
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.00	0.00	0.01	0.00	2901.03	17180.54	12098.97	15000.00	523.92	71.25
38	0.00	0.00	0.01	0.00	9670.11	57268.44	40329.89	50000.00	523.92	71.25
39	0.00	0.00	0.01	0.00	202.87	1201.44	846.08	1048.95	523.92	71.25
40	0.00	0.00	0.04	0.09	9950.49	56870.30	40049.51	50000.00	523.88	70.14
41	0.00	0.00	0.00	0.00	9950.49	23329.87	16429.49	26379.98	3909.22	1724.82
42	0.00	0.00	0.00	0.00	9950.49	23329.87	16429.49	26379.98	3909.22	1724.82
43	0.00	0.00	0.00	0.00	552.95	1296.46	913.00	1465.95	3909.22	1724.82
44	0.02	0.00	0.24	0.00	162.66	662.54	466.58	629.24	1008.82	299.40

Position	SNO3(mg/l)	SN2(mg/l)	SN2O(mg/l)	SNH2OH(mg/l)	XNV(mg/l)	X(mg/l)	VSS(mg/l)	TSS(mg/l)	SALK(mg/l)	Ntot
45	0.00	0.00	0.00	0.00	94299.65	221094.50	155700.40	250000.00	3909.22	1724.82

Στη δεξαμενή αερισμού επιδρά η διεργασία της νιτρωδοποίησης, χωρίς να συνεχίζει στην περαιτέρω οξείδωση των νιτρωδών σε νιτρικά. Συνεπώς η αναχαίτιση των NOB πραγματοποιείται ικανοποιητικά. Ο λόγος των SNH:SNO₂ υπολογίζεται ως 0.5. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι η νιτρωδοποίηση πραγματοποιείται με αρκετά καλή απόδοση και δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των αναπνοο βακτηρίων. Στην ανοξική δεξαμενή πραγματοποιείται η αναερόβια οξείδωση της αμμωνίας και η συγκέντρωσή της μειώνεται στο 0.1 mg/l. Η διεργασία αυτή όπως έχει αναφερθεί χρησιμοποιεί τα νιτρώδη ως δέκτη ηλεκτρονίων και η συγκέντρωσή τους πέφτει στα 16.4 mg/l.

Η θεωρητική αναλογία για την οξείδωση και την αναγωγή της αμμωνίας και των νιτρωδών αντίστοιχα είναι SNH:SNO₂ = 1.0/1.3. Συνεπώς, για την μεταβολή ΔSNH = 17.2 mg/l αναγράφονται 13.3 mg/l νιτρωδών. Στην προσομοίωση υπολογίζεται ότι η συγκέντρωση των νιτρωδών μειώνεται κατά 18.6 mg/l το οποίο είναι περισσότερο από ότι αντιστοιχεί στην αναερόβια απομάκρυνση της αμμωνίας. Έτσι βγαίνει το συμπέρασμα ότι δρουν και άλλες διεργασίες στην ανοξική δεξαμενή. Οι διεργασίες που επιδρούν στα νιτρώδη και μειώνουν την συγκέντρωσή τους σε ανοξικές συνθήκες είναι η ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών και η αναγωγή του νιτρώδους οξέως σε υποοξειδίο του αζώτου. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται από την αύξηση της συγκέντρωσης του υποοξειδίου του αζώτου. Η αύξηση των νιτρικών στην ανοξική δεξαμενή οφείλεται στην αναπνοο διεργασία κατά την οποία παράγονται νιτρικά.

4.7. Δεύτερο Σενάριο για την Δεύτερη Διάταξη

Στο σενάριο αναφοράς της δεύτερης διάταξης παρατηρήθηκε ότι η ανοξική δεξαμενή για να λειτουργήσει κατάλληλα χρειάζεται πολύ μεγάλο όγκο, το οποίο είναι αντισυμβατικό στην φάση κατασκευής μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων. Ο κυριότερος λόγος είναι η μικρή παρουσία οξυγόνου στην ανοξική δεξαμενή, η οποία μειώνει την ταχύτητα της αναερόβιας απομάκρυνσης της αμμωνίας από τα λύματα. Η ταχύτητα πραγματοποίησης της αναπνοο διεργασίας είναι αρκετά μικρή και στις πιο ευνοϊκές συνθήκες οπότε η παρουσία του οξυγόνου την κάνει ακόμα πιο αργή. Έτσι προσομοιώθηκε ένα ακόμα σενάριο όπου η συγκέντρωση του οξυγόνου στα λύματα μηδενίζεται πριν αυτά εισέλθουν στην ανοξική δεξαμενή. Η σύσταση των αρχικών λυμάτων και σε αυτή την περίπτωση παρέμεινε ίδια με τα προηγούμενα σενάρια.

Για την επιτυχή πραγματοποίηση της επεξεργασίας με βάση την διαδοχή της νιτρωδοποίησης και της αναερόβια οξείδωσης της αμμωνίας από τους

αυτοτροφικούς μικροοργανισμούς προέκυψαν τα παρακάτω λειτουργικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 22: Λειτουργικές παράμετροι του δεύτερου σεναρίου της δεύτερης διάταξης

Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής στην δεξαμενή αερισμού (HRT)	6.0 h
Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής στην ανοξική δεξαμενή (HRT)	5.0 h
Χρόνος Παραμονής Στερεών (SRT)	4.8 d
Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού (SO)	2.0 mg/l

Οι κινητικές και στοιχειομετρικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του δεύτερου σεναρίου είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας. Επίσης η παροχή οξυγόνου στην αερόβια δεξαμενή είναι ίδια στα 2 mg/l. Από τον πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι ο μηδενισμός της μικρής συγκέντρωσης οξυγόνου στην ανοξική δεξαμενή που υπήρχε στην προηγούμενη περίπτωση μειώνει σημαντικά τον υδραυλικό χρόνο παραμονής που απαιτείται για την πραγματοποίηση της ανάπτυξης των αναερόβιων βακτηρίων και έτσι λύνεται και το κατασκευαστικό πρόβλημα του πολύ μεγάλου όγκου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δεύτερου σεναρίου:

Πίνακας 23: Αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου της δεύτερης διάταξης

Position	Q (mg/l)	SI (mg/l)	SS (mg/l)	XI (mg/l)	XS(mg/l)	XBH (mg/l)	XAOB (mg/l)	XNOB (mg/l)	XAN (mg/l)	SO (mg/l)	SNO (mg/l)	SNH (mg/l)	SNO2 (mg/l)
1	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
2	0.72	30.00	140.00	30.00	400.00	28.80	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	60.00	0.00
3	0.75	39.05	146.79	32.89	406.76	29.41	0.34	0.10	0.00	0.10	0.00	70.41	0.67
4	0.73	39.05	15.05	3.37	41.70	3.02	0.03	0.01	0.00	0.10	0.00	70.41	0.67
5	1.31	39.07	10.18	150.46	30.63	244.59	96.79	0.41	7.21	0.93	0.00	48.22	14.65
6	1.31	39.07	10.18	150.46	30.63	244.59	96.79	0.41	7.21	0.93	0.00	48.22	14.65
7	1.31	39.07	10.18	150.46	30.63	244.59	96.79	0.41	7.21	0.93	0.00	48.22	14.65
8	1.31	39.07	10.18	150.46	30.63	244.59	96.79	0.41	7.21	0.01	0.00	48.22	14.65
9-18	1.31	39.09	3.97	152.87	7.47	249.93	99.56	0.42	7.42	2.00	0.00	19.91	32.49
19	1.31	39.09	3.97	152.87	7.47	249.93	99.56	0.42	7.42	1.99	0.00	19.91	32.49
20	0.72	39.09	3.97	0.67	0.03	1.09	0.43	0.00	0.03	1.99	0.00	19.91	32.49
21	0.59	39.09	3.97	13.84	0.68	22.63	9.02	0.04	0.67	1.99	0.00	19.91	32.49
22	0.59	39.09	3.97	13.84	0.68	22.63	9.02	0.04	0.67	1.99	0.00	19.91	32.49
23	0.59	39.09	3.97	13.84	0.68	22.63	9.02	0.04	0.67	1.99	0.00	19.91	32.49
24	0.59	39.09	3.97	13.84	0.68	22.63	9.02	0.04	0.67	1.99	0.00	19.91	32.49
25	0.59	39.09	3.97	13.84	0.68	22.64	9.02	0.04	0.67	1.99	0.00	19.91	32.49
26	0.59	39.09	3.97	13.84	0.68	22.64	9.02	0.04	0.67	1.99	0.00	19.91	32.49
27	0.59	39.09	3.97	338.14	16.50	552.83	220.24	0.93	16.41	1.99	0.00	19.91	32.49
28	0.02	39.09	3.97	338.14	16.50	552.83	220.24	0.93	0.00	1.99	0.00	19.91	32.49
29	0.57	39.09	3.97	338.14	16.50	552.83	220.24	0.93	16.41	1.99	0.00	19.91	32.49
30	0.57	39.09	3.97	338.14	16.50	552.83	220.24	0.93	16.41	1.99	0.00	19.91	32.49
31	0.57	39.09	3.97	338.14	16.50	552.83	220.24	0.93	16.41	1.99	0.00	19.91	32.49
32	0.02	39.09	3.97	17.28	0.84	28.25	11.26	0.05	0.00	0.00	0.00	19.91	32.49
33	0.00	39.09	3.97	14813.04	722.90	24218.21	9648.40	40.65	0.00	0.00	0.00	19.91	32.49
34	0.72	39.09	3.97	0.67	0.03	1.09	0.43	0.00	0.03	0.00	0.00	19.91	32.49
35	0.72	39.12	3.37	0.69	0.01	1.27	0.43	0.00	4.02	0.00	0.08	0.37	9.73
36	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας 23: Αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου της δεύτερης διάταξης

Position	Q (mg/l)	SI (mg/l)	SS (mg/l)	XI (mg/l)	XS(mg/l)	XBH (mg/l)	XAOB (mg/l)	XNOB (mg/l)	XAN (mg/l)	SO (mg/l)	SNO (mg/l)	SNH (mg/l)	SNO2 (mg/l)
37	0.02	39.05	596.75	1203.55	14882.97	1076.17	12.36	3.70	0.00	0.10	0.00	70.41	0.67
38	0.01	39.05	596.75	4011.84	49609.90	3587.25	41.19	12.33	0.00	0.00	0.00	70.41	0.67
39	0.01	39.05	596.75	84.16	1040.77	75.26	0.86	0.26	0.00	0.00	0.00	70.41	0.67
40	0.01	39.05	561.22	4659.31	46679.43	4823.94	617.09	14.02	0.00	0.00	0.00	67.39	2.57
41	0.01	1327.20	363.19	6434.86	16706.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1704.80	0.00
42	0.01	1327.20	363.19	6434.86	16706.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1704.80	0.00
43	0.01	1327.20	363.19	357.47	928.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1704.80	0.00
44	0.03	233.51	292.65	95.09	552.12	42.58	5.45	0.12	0.00	0.00	0.00	294.21	15.00
45	0.00	1327.20	363.19	61165.23	158800.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1704.80	0.00

Πίνακας 24: Αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου της δεύτερης διάταξης

Position	SNO3(mg/l)	SN2O(mg/l)	SNH2OH(mg/l)	XNV(mg/l)	X(mg/l)	VSS(mg/l)	TSS(mg/l)	SALK(mg/l)	Ntot (mg/l)
1	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
2	0.00	0.00	0.00	75.00	459.00	323.24	398.24	500.00	60.00
3	0.00	0.01	0.00	79.32	469.51	330.64	409.96	523.19	71.09
4	0.00	0.01	0.00	8.13	48.14	33.90	42.03	523.19	71.09
5	0.03	0.21	0.49	156.82	530.09	373.30	530.12	522.96	63.60
6	0.03	0.21	0.49	156.82	530.09	373.30	530.12	522.96	63.60
7	0.03	0.21	0.49	156.82	530.09	373.30	530.12	522.96	63.60
8	0.03	0.21	0.49	156.82	530.09	0.00	0.00	522.96	63.60
9-18	0.07	0.46	1.12	156.74	517.66	364.55	521.29	522.67	54.05
19	0.07	0.46	1.12	156.74	517.66	364.55	521.29	522.67	54.05
20	0.07	0.46	1.12	0.68	2.26	1.59	2.28	522.67	54.05
21	0.07	0.46	1.12	14.19	46.88	33.01	47.20	522.67	54.05
22	0.07	0.46	1.12	14.19	46.88	33.01	47.21	522.67	54.05
23	0.07	0.46	1.12	14.19	46.88	33.01	47.21	522.67	54.05
24	0.07	0.46	1.12	14.19	46.88	33.02	47.21	522.67	54.05

Position	SNO3(mg/l)	SN2O(mg/l)	SNH2OH(mg/l)	XNV(mg/l)	X(mg/l)	VSS(mg/l)	TSS(mg/l)	SALK(mg/l)	Ntot (mg/l)
25	0.07	0.46	1.12	14.19	46.88	33.02	47.21	522.67	54.05
26	0.07	0.46	1.12	14.19	46.88	33.02	47.21	522.67	54.05
27	0.07	0.46	1.12	346.53	1145.05	806.37	1152.91	522.67	54.05
28	0.07	0.46	1.12	346.53	1128.64	794.82	1141.35	522.67	54.05
29	0.07	0.46	1.12	346.53	1145.05	806.37	1152.91	522.67	54.05
30	0.07	0.46	1.12	346.53	1145.05	806.37	1152.91	522.67	54.05
31	0.07	0.46	1.12	346.53	1145.05	806.37	1152.91	522.67	54.05
32	0.07	0.46	0.00	17.71	57.68	40.62	58.33	522.67	52.93
33	0.07	0.46	1.12	15180.85	49443.19	34819.15	50000.00	522.67	54.05
34	0.07	0.46	1.12	0.68	2.26	1.59	2.28	522.67	54.05
35	4.47	0.49	1.12	0.69	6.41	4.52	5.20	523.20	16.26
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.00	0.01	0.00	2902.29	17178.75	12097.71	15000.00	523.19	71.09
38	0.00	0.01	0.00	9674.29	57262.50	40325.71	50000.00	523.19	71.09
39	0.00	0.01	0.00	202.96	1201.31	845.99	1048.95	523.19	71.09
40	0.01	0.04	0.07	10004.38	56793.79	39995.63	50000.00	523.16	70.07
41	0.00	0.00	0.00	10004.38	23141.39	16296.76	26301.13	3825.77	1704.80
42	0.00	0.00	0.00	10004.38	23141.39	16296.76	26301.13	3825.77	1704.80
43	0.00	0.00	0.00	555.76	1285.55	905.32	1461.08	3825.77	1704.80
44	0.03	0.21	0.00	172.20	695.36	489.69	661.89	1021.47	309.46
45	0.00	0.00	0.00	95094.56	219965.70	154905.50	250000.00	3825.77	1704.80

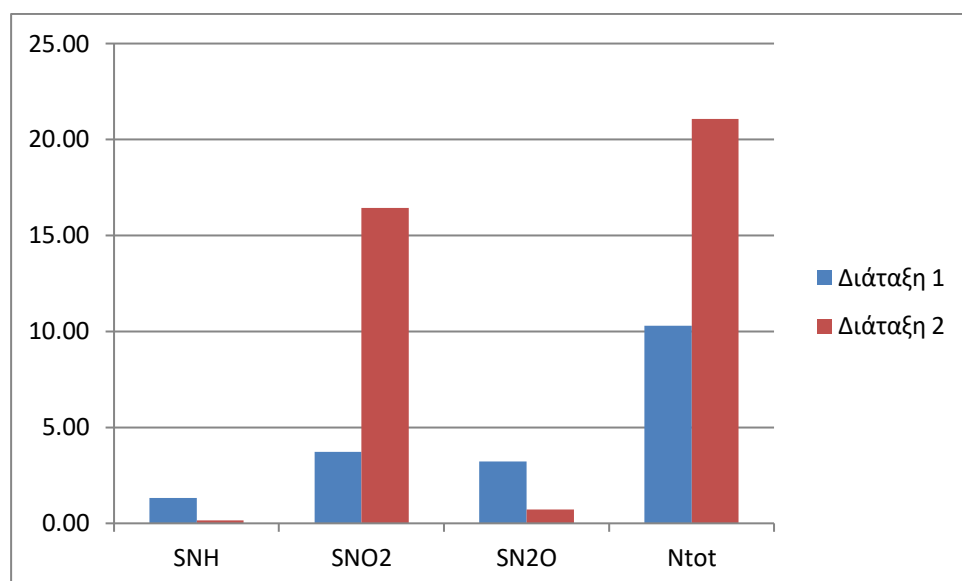
Όσον αφορά την νιτρωδοποίηση στην αερόβια δεξαμενή η προσομοίωση έχει τα ίδια αποτελέσματα, το οποίο είναι αναμενόμενο αφού ο υδραυλικός χρόνος παραμονής της αερόβιας δεξαμενής και ο χρόνος παραμονής στερεών παρέμειναν ίδιοι. Επομένως, ο λόγος $SNH:SNO_2$ είναι 0.6. Οι διαφορές στα αποτελέσματα παρατηρούνται στην ανοξική δεξαμενή. Το αμμωνιακό άζωτο έχει συγκέντρωση 0.4 mg/l και η μεταβολή της είναι 19.5 mg/l. Τα νιτρώδη έχουν συγκέντρωση 9.7 mg/l και η μεταβολή της συγκέντρωσής της είναι 22.8 mg/l. Η οξείδωση των 19.5 mg/l αμμωνίας απαιτεί την αναγωγή 15 mg/l νιτρωδών. Επομένως, 7.8 mg/l νιτρωδών καταναλώνονται από άλλες διεργασίες. Η αναγωγή του νιτρώδους οξέος σε υποξείδιο του αζώτου καταναλώνει μεγάλο μέρος της περίσσειας νιτρωδών και ένα μέρος ακόμα καταναλώνεται από την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Επίσης, παρατηρείται ότι στην ανοξική δεξαμενή παράγονται 4.4 mg/l νιτρικών. Αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη των αναπνοοχ βακτηρίων που έχουν ως προϊόν της αντίδρασής τους την παραγωγή νιτρικών.

4.8. Συγκριτική Αξιολόγηση των δύο διατάξεων

Οι προϋποθέσεις που απαιτούνται για την πραγματοποίηση της ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου στις δύο διαφορετικές διατάξεις είναι οι παρακάτω. Στην ΔΠΚ είναι απαραίτητη η απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους των οργανικών στερεών (>80 °C), η οποία επιτυγχάνεται με την χρήση χημικών ή σε συστήματα υψηλής φόρτισης. Στην πρώτη διάταξη γίνεται κατακράτηση των αναπνοοχ στην ΔΤΚ και μέσω της επανακυκλοφορίας διοχετεύονται στην ανοξική δεξαμενή. Στην δεύτερη διάταξη δεν συμβαίνει αυτή η επανακυκλοφορία με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται πιο αργά η διεργασία. Τέλος πολύ σημαντική προϋπόθεση και για τις δύο διατάξεις είναι η αναχαίτηση των NOB βακτηρίων, τα οποία καταναλώνουν τα νιτρώδη που είναι απαραίτητα για την πραγματοποίηση της ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των δύο διατάξεων δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα που παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις στην έξοδο των σημαντικότερων μεταβλητών, οι οποίες είναι το αμμωνιακό άζωτο, τα νιτρώδη, το υποξείδιο του αζώτου και το ολικό άζωτο.

Πίνακας 25 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο διατάξεων



Από ότι φαίνεται και στις δύο διατάξεις γίνεται ικανοποιητική απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου και ειδικά στην δεύτερη διάταξη η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου προσεγγίζει το μηδέν. Στην πρώτη η συγκέντρωση στην έξοδο είναι 1.3 mg/l. Στην πρώτη διάταξη η συγκέντρωση των νιτρωδών είναι 3.7 mg/l, ενώ στην δεύτερη παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη συγκέντρωση στα 16.4 mg/l. Η μη αποδοτική απομάκρυνση των νιτρωδών στην δεύτερη διάταξη καθιστά την απόρριψη των λυμάτων στους υδάτινους αποδέκτες αδύνατη. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τοποθέτηση στο τέλος της κεντρικής γραμμής των λυμάτων μιας ανοξικής δεξαμενής, στην οποία θα γίνεται προσθήκη οργανικού άνθρακα. Το υποξείδιο του αζώτου έχει συγκέντρωση 3.2 mg/l στην πρώτη διάταξη, ενώ στην δεύτερη διάταξη έχει σαφώς μικρότερη συγκέντρωση, η οποία είναι 0.7 mg/l. Αυτό δίνει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην επιλογή της δεύτερης διάταξης, καθώς είναι βασικός στόχος της λειτουργίας μιας ΕΕΛ η μείωση της παραγωγής του υποξειδίου του αζώτου. Η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην πρώτη διάταξη είναι 10.3 mg/l και στην δεύτερη διάταξη είναι 21 mg/l. Δηλαδή όσον αφορά την απομάκρυνση του ολικού αζώτου από το σύστημα η πρώτη διάταξη παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την τοποθέτηση της ανοξικής δεξαμενής πριν την απόρριψη των λυμάτων θα αυξηθεί και η αποτελεσματικότητα της δεύτερης διάταξης, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του επιπλέον αζώτου είναι τα νιτρώδη που δεν επιτυγχάνει να απομακρύνει.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση των συνθηκών υπό τις οποίες καθίσταται εφικτή η επεξεργασία των αστικών λυμάτων στο Β στάδιο μέσω συνδυασμού νιτρωδοποίησης – ανοξικής οξείδωσης της αμμωνίας. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω μαθηματικής προσομοίωσης. Για την επίτευξη της πραγματοποίησης της αναμμοξ διεργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις δεξαμενών και αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητά τους. Στην πρώτη περίπτωση προσομοιώθηκε ένα σύστημα ενεργού ιλύος, του οποίου η λειτουργία είναι παρόμοια με ένα σύστημα SHARON-ANAMMOX. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μια ανοξική δεξαμενή μετά το σύστημα ενεργού ιλύος, με λειτουργία ως χημειοστάτη. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών διατάξεων προκύπτει ότι η δεύτερη διάταξη είναι υπό προϋποθέσεις πιο αποτελεσματική. Επίσης ο διαχωρισμός των βιοχημικών διεργασιών που συμβαίνουν στην ανοξική δεξαμενή και την δεξαμενή αερισμού δίνει την δυνατότητα για την πιο αποτελεσματική μελέτη τους, καθώς γίνονται πιο ευδιάκριτοι οι παράγοντες που τις επηρεάζουν. Με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το μοντέλο προσομοίωσης βασίστηκε σε προυπάρχον μοντέλο του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ το οποίο περιγράφει τη λειτουργία μίας συμβατικής ΕΕΛ. Η τροποποίηση αφορά στην δίαιτα του αζώτου για να είναι δυνατή η περιγραφή της ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου, μέσω των αναμμοξ βακτηρίων. Στο πλαίσιο αυτό τροποποιήθηκε αρχικά ο στοιχειομετρικός πίνακας του μοντέλου μέσω εισαγωγής πρόσθετων μεταβλητών και διεργασιών και στη συνέχεια ο κώδικας.
2. Από τα αποτελέσματα των πολλαπλών προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι είναι η δυνατή η επιτυχής μαθηματική περιγραφή της διεργασίας αναμμοξ από το μοντέλο. Μία σημαντική αλλαγή που πραγματοποιήθηκε στο μοντέλο αφορά στο στάδιο Α της επεξεργασίας των λυμάτων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή των συνθηκών επίτευξης υψηλής απομάκρυνσης του οργανικού άνθρακα (διαλυτού και σωματιδιακού).
3. Για την επίτευξη αποτελεσματικής απομάκρυνσης του αζώτου, μέσω συνδυασμένης νιτρωδοποίησης αναμμοξ θα πρέπει να ικανοποιούνται κατ'ελάχιστο οι ακόλουθες προϋποθέσεις:
 - Αρχικά είναι ιδιαίτερα σημαντική η δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών, ώστε να αναχαιτίζονται τα NOB βακτήρια τα οποία οξειδώνουν τα νιτρώδη και συνεπώς δρουν ανταγωνιστικά με τα βακτήρια αναμμοξ. Στα αστικά λύματα η αναχαίτιση των NOB είναι ένα ιδιαιτέρως δύσκολο εγχείρημα λόγω των χαμηλών συγκεντρώσεων της ελεύθερης αμμωνίας. Παρόλα αυτά η αναχαίτιση των NOB είναι εφικτή και στα αστικά λύματα μέσω της

ρύθμισης του υδραυλικού χρόνου παραμονής στην αερόβια δεξαμενή καθώς και του αερόβιου χρόνου παραμονής στερεών. Τα βακτήρια NOB χρειάζονται μεγαλύτερο χρόνο παραμονής σε σχέση με τα βακτήρια AOB, το οποίο καταδεικνύεται από τις παραμέτρους ημικορεσμού των δύο μικροβιακών ομάδων. Συνεπώς με κατάλληλη επιλογή ενός μικρού αερόβιου υδραυλικού χρόνου παραμονής και επομένως χρόνου παραμονής στερεών είναι δυνατή η αναχαίτιση των βακτηρίων NOB και ταυτόχρονα η επίτευξη νιτρωδοποίησης, διεργασία η οποία είναι απαραίτητη για την επίτευξη της ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου.

- Στο στάδιο A της επεξεργασίας των λυμάτων είναι αναγκαία η επίτευξη πολύ υψηλών ποσοστών απομάκρυνσης του οργανικού άνθρακα της τάξεως του 90%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αναπνοο βακτήρια σε ανοξικές συνθήκες έχουν ανταγωνισμό από τους ετερότροφους μικροοργανισμούς που ακόμα και σε ανοξικές συνθήκες έχουν την δυνατότητα να αναπτύσσονται με μεγαλύτερο ρυθμό καταναλώνοντας οργανικό άνθρακα και νιτρώδη. Έτσι οι μικρές συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα στο σύστημα μειώνουν την ταχύτητα ανάπτυξής τους. Επισημαίνεται ότι τέτοια ποσοστά απομάκρυνσης μπορούν να επιτευχθούν υπό προϋποθέσεις είτε μέσω χημικά υποβοηθούμενης πρωτοβάθμιας καθίζησης, είτε μέσω εφαρμογής συστήματος ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης.
 - Η ανάπτυξη των αναπνοο βακτηρίων γίνεται με πολύ αργό ρυθμό με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι παραμονής στους βιολογικούς αντιδραστήρες. Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση τεχνολογιών οι οποίες εξασφαλίζουν την βιοσυσσώρευση των αναπνοο εξασφαλίζοντας πρακτικά στα βακτήρια αυτά έναν πολύ μεγάλο χρόνο παραμονής στερεών. Για την επίτευξη της βιοσυσσώρευσης έχουν δημιουργηθεί στο εμπόριο συστήματα υδροκυκλώνων που επιτρέπουν την διαφορική συγκράτηση των αναπνοο συσσωματωμάτων έναντι των υπολοίπων μικροοργανισμών.
4. Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για τις δύο διατάξεις προέκυψαν οι κρίσιμες κινητικές και στοιχειομετρικές παράμετροι που επηρεάζουν κάθε μεταβλητή του μοντέλου. Οι μεταβλητές που των οποίων εξετάστηκε η συγκέντρωσή τους στην ανάλυση ευαισθησίας είναι το αμμωνιακό άζωτο (SNH), τα νιτρώδη (SNO₂), τα νιτρικά (SNO₃), το υποξείδιο του αζώτου (SN₂O), τα αναπνοο βακτήρια (XAN), τα AOB (XAOB), τα NOB (XNOB), η υδροξυλαμίνη (SNH₂OH), οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί (XBH), η εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (SS) και τα ολικά οργανικά στερεά (TSS).
- Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για την πρώτη διάταξη. Το αμμωνιακό άζωτο (SNH) επηρεάζεται πιο καθοριστικά από τις εξής οχτώ παραμέτρους: qAOBAMO, baob, kohaob1, kohaob2, Kiohaob, mAOBHAO, Yaob και qAOBN2OND.

- Η συγκέντρωση των νιτρικών (SNO₂) βρέθηκε ότι επηρεάζεται περισσότερο από τις παρακάτω παραμέτρους: qAOBAMO, baob, Yaob, kohaob1, ks4
 - Η συγκέντρωση των νιτρικών (SNO₃) επηρεάζεται περισσότερο από το ng.
 - Η συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου (SN₂O) μεταβάλεται πιο σημαντικά από τις παρακάτω παραμέτρους: qAOBAMO, baob, mAOBHAO, Kohaob1, qAOBN2OND, kohaob2, kiohaob, Yaob, ng3, ks4, koh4 και ks3.
 - Η συγκέντρωση των αναπνοχ βακτηρίων (XAN) είναι ευαίσθητη στις εξής παραμέτρους: qAOBAMO, baob, mAOBHAO, kohaob1, qAOBN2OND, kohaob2, kiohaob και baob.
 - Η συγκέντρωση των AOB (XAOB) επηρεάζεται περισσότερο από τις παρακάτω παραμέτρους: baob, Yaob, mAOBHAO, qAOBAMO, kohaob1, kohaob2 και qAOBN2OND.
 - Η συγκέντρωση των NOB (XNOB) επηρεάζεται περισσότερο από το mnob.
 - Η συγκέντρωση των ετερότροφων μικροοργανισμών (XBH) επηρεάζεται περισσότερο από τις παρακάτω παραμέτρους: khno2aob και Yh.
 - Η συγκέντρωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης βιομάζας (SS) επηρεάζεται περισσότερο από τις εξής παραμέτρους: baob, mAOBHAO, kohaob1, Yaob, qAOBAMO.
 - Η υδροξυλαμίνη επηρεάζεται περισσότερο από τις παρακάτω παραμέτρους: qAOBAMO, kohaob1, mAOBHAO, baob και Yaob.
 - Η συγκέντρωση των ολικών στερεών επηρεάζεται περισσότερο από το ki3no.
5. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για την δεύτερη διάταξη έδειξε ότι υπάρχουν διαφορές ως προς την ευαισθησία κάποιων μεταβλητών. Ειδικότερα:
- Οι παράμετροι που επηρεάζουν τα νιτρώδη (SNO₂) στην δεύτερη διάταξη παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές και είναι οι εξής: qaobamo, Yaob, baob, qaobn2ond και kiohaob.
 - Τα νιτρικά (SNO₃) στην δεύτερη διάταξη επηρεάζονται από τις εξής παραμέτρους: qaobamo, maobhao, baob, kohaob1 και Yaob
 - Η συγκέντρωση των αναπνοχ (XAN) επηρεάζεται περισσότερο από τις παρακάτω παραμέτρους: qaobamo, Yaob, baob, kohaob1, qaobn2ond και kiohaob
 - Τα AOB (XAOB) επηρεάζονται από τις ίδιες παραμέτρους με την πρώτη διάταξη και επιπλέον από το ng3.

- Τα NOB (XNOB) στην δεύτερη διάταξη επηρεάζονται περισσότερο από τις παρακάτω παραμέτρους: $q_{aob}a_{mo}$, $ma_{ob}b_{hao}$, ba_{ob} , Ya_{ob} και $ko_{haob}1$
 - Οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί (XBH) στην δεύτερη διάταξη επηρεάζονται περισσότερο από τις παρακάτω παραμέτρους: $q_{aob}a_{mo}$, Ya_{ob} , ba_{ob} , $q_{aob}b_{2on}d$ και $ki_{o}ha_{ob}$.
 - Η συγκέντρωση της εύκολα βιοδιασπλάσιμης οργανικής βιομάζας (SS) επηρεάζεται περισσότερο από το m_h .
 - Η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την συγκέντρωση των ολικών στερεών του συστήματος στην δεύτερη διάταξη είναι το $ki_{o}ha_{ob}$.
6. Στην πρώτη διάταξη πραγματοποιήθηκε ανάλυση της επιρροής των λειτουργικών παραμέτρων, οι οποίες είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής της αερόβιας και της ανοξικής δεξαμενής, ο χρόνος παραμονής στερεών, η παροχή του διαλυμένου οξυγόνου και το ποσοστό των οργανικών στερεών που απομακρύνονται κατά το στάδιο A. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι οι βέλτιστες λειτουργικές παράμετροι είναι:
- Αερόβιος υδραυλικός χρόνος παραμονής = 6 h
 - Ανοξικός υδραυλικός χρόνος παραμονής = 4 h
 - Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην δεξαμενή αερισμού = 2.5 mg/L
 - Απομάκρυνση στερεών στην πρωτοβάθμια καθίζηση = 90 %
 - Χρόνος παραμονής στερεών = 6 d
7. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των δύο διατάξεων ως προς την απομάκρυνση του αζώτου μέσω της αναπνοής διεργασίας προσφέρουν αρκετές πληροφορίες. Στην πρώτη διάταξη πραγματοποιείται η επίτευξη των στόχων για την πραγματοποίηση της ανοξικής απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου. Στην τελική εκροή του συστήματος επιτυγχάνονται συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου 1.3 mg/L, νιτρικών 3.7 mg/L, υποξειδίου του αζώτου 3.2 mg/L και ολικού αζώτου 10.3 mg/L. Οι συγκεντρώσεις των αζωτούχων ενώσεων στα λύματα είναι ικανοποιητικές, αλλά σε μια πραγματική εφαρμογή θα ήταν μεγαλύτερες καθώς η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για ιδανικές συνθήκες. Στην δεύτερη διάταξη προκειμένου να επιτευχθούν ανάλογα αποτελέσματα απαιτείται υδραυλικός χρόνος παραμονής στην ανοξική δεξαμενή πολλαπλάσιος από τον αντίστοιχο της πρώτης διάταξης. Κύριος λόγος είναι η λειτουργία της ανοξικής δεξαμενής ως χημειοστάτη και η συνεπαγόμενη αποκατάσταση εντός αυτής χαμηλών συγκεντρώσεων βιομάζας. Ωστόσο εάν εξασφαλισθεί η μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε πολύ χαμηλές τιμές ανάντη της ανοξικής

δεξαμενής μειώνεται σημαντικά ο υδραυλικός χρόνος παραμονής της ανοξικής δεξαμενής από τις 44 h στις 5h. Σε αυτή την περίπτωση μπορούν να επιτευχθούν συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου, νιτρωδών, υποξειδίου του αζώτου και ολικού αζώτου ίσες με 0.4 mg/L, 9.7 mg/L, 0.5 mg/L και 16.3 mg/L αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι η σχετικά υψηλή συγκέντρωση ολικού αζώτου στην τελική εκροή οφείλεται κυρίως στην υψηλή συγκέντρωση νιτρωδών, η οποία ουσιαστικά είναι απαγορευτική για διάθεση των λυμάτων σε κάποιον υδάτινο αποδέκτη. Ωστόσο το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπισθεί μέσω της προσθήκης μία επιπλέον δεξαμενής κατάντη της ανοξικής δεξαμενής με υδραυλικό χρόνο παραμονής της τάξης των λίγων ωρών στην οποία θα γίνεται προσθήκη πηγής οργανικού άνθρακα (η οποία μπορεί να παράγεται σε μία μονάδα υδρόλυσης της πρωτοβάθμιας ίλύος) για την απονιτρωδοποίηση των παραγόμενων νιτρωδών. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η επίτευξη συγκεντρώσεων ολικού αζώτου στην τελική εκροή της τάξης των 5-6 mg/L. Επισημαίνεται ότι με την δεύτερη διάταξη παράγονται εκπομπές υποξειδίου του αζώτου οι οποίες είναι υποπολλαπλάσιες των αντιστοίχων της πρώτης διάταξης, γεγονός που υπό προϋποθέσεις καθιστά την δεύτερη διάταξη προτιμότερη, αν και πολυπλοκότερη, της πρώτης.

Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

Ανδρεαδάκης, Α. (2015). ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΙΛΥΟΣ. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Arrigo, R.A. (2005). Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature* 437, 349-355

Gilbert, E.M.; Agrawal, S.; Karst, S.M.; Horn, H.; Nielsen, P.H.; Lackner, S. Low temperature partial nitrification/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater. *Environ Sci. Technol.* **2014**, 48, 8784–8792.

Z. Gong, F. Yang, S. Liu, H. Bao, S. Hu, K. Furukawa (2007), Feasibility of a membrane-aerated biofilm reactor to achieve single-stage autotrophic nitrogen removal based on Anammox, 776–784, *Chemosphere* 69

Guo, J.; Peng, Y.; Huang, H.; Wang, S.; Ge, S.; Zhang, J.; Wang, Z. Short- and long-term effects of temperature on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater. *J. Hazard. Mater.* **2010**, 179, 471–479.

Hellinga, C., Schellen, A.A.J.C., Mulder, J.W., Van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1998) The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water. *Wat. Sci. Technol.* **37**, 135–142.

Jetten MSM, Wagner M, Fuerst J, van Loosdrecht MCM, Kuenen G, Strous M (2001) Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation ('anammox') process, 283–288, *Curr Opin in Biotechnol* 12

S. Kalyuzhnyi, M. Gladchenko, A. Mulder and B. Versprille (2006), New anaerobic process of nitrogen removal, 163–170, *Water Science & Technology* Vol 54 No 8

Kalyuzhnyi, Sergey & Gladchenko, M & Mulder, Arnold & Versprille, Bryant. (2006). New anaerobic process of nitrogen removal. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research.* 54. 163-70. 10.2166/wst.2006.729.

Lackner, S.; Welker, S.; Gilbert, E.M.; Horn, H. Influence of seasonal temperature fluctuations on two different partial nitrification-anammox reactors treating mainstream municipal wastewater. *Water Sci. Technol.* **2015**, 72, 1358–1363.

Li, X.; Sun, S.; Badgley, B.D.; Sung, S.; Zhang, H.; He, Z. Nitrogen removal by granular nitrification–anammox in an upflow membrane-aerated biofilm reactor. *Water Res.* **2016**, *94*, 23–31.

Liu, G.; Wang, J. Long-Term Low DO Enriches and Shifts Nitrifier Community in Activated Sludge. *Environ. Sci. Technol.* **2013**, *47*, 5109–5117

Mike S.M. Jetten, Svein J. Horn, Mark C.M. van Loosdrecht, Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system, *Water Science and Technology*, Volume 35, Issue 9, 1997, Pages 171-180, ISSN 0273-1223, [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00195-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00195-9).

Beatriz Molinuevo, María Cruz García, Dimitar Karakashev, Irimi Angelidaki (2009), Anammox for ammonia removal from pig manure effluents: Effect of organic matter content on process performance, 2171–2175, *Bioresource Technology*

Mulder, Arnold & van de Graaf, A.A. & Robertson, Lesley & Kuenen, J.G.. (1995). Anaerobic Ammonium Oxidation Discovered in a Denitrifying Fluidized-Bed Reactor. *FEMS Microbiology Ecology* 16(3), 177-183. (1995). 16. 10.1111/j.1574-6941.1995.tb00281.x.

Salem, Sawsan & Berends, D & Roest, H & Kuij, R & van Loosdrecht, Mark. (2004). Full-scale application of the BABE® technology. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 50. 87-96. 10.2166/wst.2004.0423.

Marc Strous, Eric Pelletier, Sophie Mangenot, Thomas Rattei, Angelika Lehner, Michael W. Taylor, Matthias Horn, Holger Daims, Delphine Bartol-Mavel, Patrick Wincker, Valerie Barbe, Nuria Fonknechten, David Vallenet, Beatrice Segurens, Chantal Schenowitz-Truong, Claudine Medigue, Astrid Collingro, Berend Snel, Bas E. Dutilh, Huub J. M. Op den Camp, Chris van der Drift, Irina Cirpus, Katinka T. van de Pas-Schoonen, Harry R. Harhangi, Laura van Niftrik, Markus Schmidt, Jan Keltjens, Jack van de Vossenberg, Boran Kartal, Harald Meier, Dmitrij Frishman, Martijn A. Huynen, Hans-Werner Mewes, Jean Weissenbach, Mike S. M. Jetten, Michael Wagner & Denis Le Paslier (2006), Deciphering the evolution and metabolism of anammox bacterium from a community genome, 790-794, *NATURE*

Kris Pynaert, Barth F. Smets, Daan Beheydt, and Willy Verstraete (2004), Start-up of Autotrophic Nitrogen Removal Reactors via Sequential Biocatalyst Addition, *Environ. Sci. Technol.*

Rodriguez-Sanchez, A.; Purswani, J.; Lotti, T.; Maza-Marquez, P.; Van Loosdrecht, M.C.M.; Vahala, R.; Gonzalez-Martinez, A. Distribution and microbial community structure analysis of a single-stage partial nitrification/anammox granular sludge bioreactor operating at low temperature. *Environ. Technol.* **2016**, *37*, 2281–2291.

M. O'Shaughnessy, J. Sizemore, M. Musabyimana, P. Sanjines, S. Murthy, B. Wett, I. Takács, D. Houweling, N.G. Love, K. Pallansch (2008), OPERATIONS AND PROCESS CONTROL OF THE DEAMMONIFICATION (DEMON) PROCESS AS A SIDESTREAM OPTION FOR NUTRIENT REMOVAL, Water Environment Federation

Sobotka, D.; Czerwionka, K.; Makinia, J. Influence of temperature on the activity of anammox granular biomass. *Water Sci. Technol.* **2016**, *73*, 2518–2525.

Strous M, Kuenen JG, Jetten MS. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation. *Appl Environ Microbiol.* 1999 Jul;65(7):3248-50. doi: 10.1128/AEM.65.7.3248-3250.1999. PMID: 10388731; PMCID: PMC91484.

Sharif Shourjeh, M.; Kowal, P.; Lu, X.; Xie, L.; Drewnowski, J. Development of Strategies for AOB and NOB Competition Supported by Mathematical Modeling in Terms of Successful Deammonification Implementation for Energy-Efficient WWTPs. *Processes* **2021**, *9*, 562. <https://doi.org/10.3390/pr9030562>

van Dongen U, Jetten MS, van Loosdrecht MC. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater. *Water Sci Technol.* 2001;44(1):153-60. PMID: 11496667.

van Niftrik L, Jetten MS. Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: unique microorganisms with exceptional properties. *Microbiol Mol Biol Rev.* 2012 Sep;76(3):585-96. doi: 10.1128/MMBR.05025-11. PMID: 22933561; PMCID: PMC3429623.

Wett, Bernhard & Murthy, Sudhir & Takács, Imre & Hell, M. & Bowden, Gregory & Deur, A. & O'Shaughnessy, M.. (2007). Key Parameters for Control of DEMON Deammonification Process. *Water Practice*. 1. 1-11. 10.2175/193317707X257017.

Zhang, J.; Zhou, J.; Han, Y.; Zhang, X. Start-up and bacterial communities of single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification (SNAP) for treatment of high strength ammonia wastewater. *Bioresour. Technol.* **2014**, *169*, 652–657.

Zekker, I.; Rikmann, E.; Mandel, A.; Kroon, K.; Seiman, A.; Mihkelson, J.; Tenno, T.; Tenno, T. Step-wise temperature decreasing cultivates a biofilm with high nitrogen removal rates at 9 °C in short-term anammox biofilm tests. *Environ. Technol.* **2016**, *37*, 1933–1946.