



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ  
ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΥΠΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ»**

**Ευάγγελος Δημητρίου**

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

**Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος,  
Επίκουρος Καθηγητής**



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Ολοκληρώνοντας την σχολή και τη διπλωματική μου θέλω να ευχαριστήσω τον Επίκουρο καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής και για τη συνεχή καθοδήγηση μέχρι την ολοκλήρωση της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Έλενα Κουμάκη υποψήφια διδακτορικό που χωρίς τη βοήθεια και την υπομονή της δεν θα μπορούσε να διεκπεραιωθεί η παρούσα διπλωματική.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, τα αδέρφια μου και τους γονείς μου που με στήριζαν σε κάθε προσπάθεια μου και μου έδωσαν δύναμη να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |       |
|--|-------|
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....   | viii  |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....  | xvi   |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....  | xviii |
| ABSTRACT.....  | xx    |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....   | 1     |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....   | 3     |
| ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ<br>ΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΠΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ..... | 3     |
| 2.1 Εισαγωγή .....   | 3     |
| 2.2 Μοντέλα Ενεργού Ιλύος.....   | 3     |
| 2.2.1 Μοντέλο ενεργού Ιλύος No1 (ASM1) .....   | 3     |
| 2.2.1.1 Εισαγωγή.....  | 3     |
| 2.2.1.2 Μεταβλητές – Συστατικά του COD.....  | 4     |
| 2.2.2 Μοντέλο ενεργού Ιλύος No2 (ASM2) .....   | 11    |
| 2.2.2.1 Εισαγωγή.....  | 11    |
| 2.2.2.2 Συστατικά Μοντέλου.....  | 11    |
| 2.2.2.3 Βιολογικές Διεργασίες.....   | 13    |
| 2.2.2.4 Περιορισμοί του μοντέλου .....   | 17    |
| 2.2.3 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 2d (ASM2d) .....  | 22    |
| 2.2.4 Μοντέλο ενεργού ιλύος 3 (ASM3).....  | 22    |
| 2.2.4.1 Εισαγωγή.....  | 22    |
| 2.2.4.2 Διεργασίες .....   | 22    |
| 2.2.4.3 Διαφορές ASM1-ASM3.....  | 23    |
| 2.2.4.5 Συστατικά μοντέλου.....  | 24    |
| 2.2.4.6 Περιορισμοί και διεργασίες μοντέλου.....   | 25    |
| 2.3 Συστήματα ολοκληρωμένης προσομοίωσης ΕΕΛ (Benchmark Simulation Models).....  | 31    |
| 2.3.1 Εισαγωγή .....   | 31    |
| 2.3.2 Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1).....   | 31    |
| 2.3.2.1 Εισαγωγή.....  | 31    |
| 2.3.2.2 Προσομοίωση μοντέλου .....   | 32    |
| 2.3.3 Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2).....   | 35    |
| 2.3.3.1 Εισαγωγή.....  | 35    |
| 2.3.2 Προσομοιούμενο σύστημα.....  | 35    |

|   |    |
|---|----|
| 2.3.3 Μοντέλο χώνευσης ADM1 για το BSM2.....  | 37 |
| 2.4 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου .....   | 37 |
| 2.4.1 Εισαγωγή .....  | 37 |
| 2.4.2 Διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο.....   | 37 |
| 2.4.3 Βιολογική απομάκρυνση αζώτου.....   | 38 |
| 2.4.3.1 Εισαγωγή.....   | 38 |
| 2.4.3.2 Μοντελοποίηση των διεργασιών .....  | 40 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ<br>ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ..... | 49 |
| 3.1 Εισαγωγή .....  | 49 |
| 3.2 Συστατικά μοντέλου .....  | 50 |
| 3.3 Μαθηματική προσομοίωση του βιολογικού αντιδραστήρα .....                            | 55 |
| 3.3.1 Εισαγωγή .....  | 55 |
| 3.3.2 Διεργασίες μοντέλου .....   | 56 |
| 3.3.3 Περιγραφή βασικών εξισώσεων του μοντέλου.....                                     | 62 |
| 3.3.4 Παράμετροι του μαθηματικού ομοιώματος .....                                       | 57 |
| 3.3.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στις βιολογικές διεργασίες .....                        | 66 |
| 3.3.6 Ζήτηση οξυγόνου .....   | 67 |
| 3.4 Δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης.....  | 76 |
| 3.4.1 Προσομοίωση της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....                                       | 76 |
| 3.5 Δεξαμενή τελικής καθίζησης .....  | 78 |
| 3.5.1 Εισαγωγή .....  | 78 |
| 3.5.2 Δείκτες καθιζησιμότητας ιλύος.....  | 78 |
| 3.5.3 Εμπειρικές σχέσεις ταχύτητας καθίζησης.....                                       | 79 |
| 3.5.4 Υπομοντέλο καθίζησης .....  | 80 |
| 3.5.4 Όρια εξόδου – Δείκτης ποιότητας εκροής.....                                       | 82 |
| Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο COD .....  | 82 |
| 3.6 Πάχυνση ιλύος.....  | 84 |
| 3.6.1 Εισαγωγή .....  | 84 |
| 3.6.2 Προσομοίωση πάχυνσης.....   | 84 |
| 3.7 Χώνευση ιλύος .....   | 87 |
| 3.7.1 Εισαγωγή .....  | 87 |
| 3.7.2 Προσομοίωση χώνευσης.....   | 87 |
| 3.7.3 Παραγωγή βιοαερίου .....  | 89 |
| 3.7.4 Απαιτήσεις θέρμανσης και θερμικές απώλειες χωνευτή .....                          | 89 |
| 3.8 Αφυδάτωση.....  | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.8.1 Εισαγωγή .....   | 90  |
| 3.8.2 Προσομοίωση αφυδάτωσης .....   | 91  |
| 3.9 Γραμμή στραγγιδίων.....  | 93  |
| 3.10 Κατανάλωση ενέργειας .....  | 94  |
| 3.10.1 Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια .....   | 94  |
| 3.11 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου .....   | 100 |
| 3.11.1 Εισαγωγή.....   | 100 |
| 3.11.2 Άμεσες εκπομπές .....   | 100 |
| 3.11.3 Έμμεσες εκπομπές .....  | 103 |
| 3.11.4 Δείκτες εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.....  | 105 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....  | 106 |
| 4.1 Προσομοιούμενο σύστημα: .....  | 106 |
| 4.2 Σενάρια Προσομοίωσης.....  | 109 |
| 4.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....   | 111 |
| 4.3.1 Διερεύνηση της επίδρασης των στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων στην απόδοση της εγκατάστασης.....  | 111 |
| 4.3.1.1 Σενάριο 1.1 Επίδραση του συντελεστή απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας $Y_H$ στην απόδοση της εγκατάστασης. ....  | 111 |
| 4.3.1.2 Σενάριο 1.2: Επίδραση του συντελεστή απόδοσης των $AOB$ $Y_{AOB}$ στην απόδοση της εγκατάστασης .....  | 115 |
| 4.3.1.3 Σενάριο 1.3: Επίδραση του συντελεστή απόδοσης των $NOB$ $Y_{NOB}$ στην απόδοση της εγκατάστασης .....  | 118 |
| 4.3.1.4 Σενάριο 1.4 : Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών $\mu_H$ στην απόδοση της εγκατάστασης .....   | 121 |
| 4.3.1.5 Σενάριο 1.5 Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των $AOB$ $\mu_{AOB}$ στην απόδοση της εγκατάστασης. ....   | 123 |
| 4.3.1.6 Σενάριο 1.6 Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των $NOB$ $\mu_{NOB}$ στην απόδοση της εγκατάστασης. ....   | 125 |
| 4.3.1.7 Σενάριο 1.7 Επίδραση του συντελεστή ημι-κορεσμού της αμμωνίας $k_{NH}$ στην απόδοση της εγκατάστασης. ....   | 128 |
| 4.3.1.8 Σενάριο 1.8 Επίδραση του συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας $k_s$ στην απόδοση της εγκατάστασης. ....  | 130 |
| 4.3.1.9 Σενάριο 1.9 Επίδραση του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης $q_{AOBAMO}$ στην απόδοση της εγκατάστασης. ....                    | 132 |
| 4.3.1.10 Σενάριο 1.10 Επίδραση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών $q_{AOBN_2ONN}$ στην απόδοση της εγκατάστασης. ....    | 134 |
| 4.3.1.11 Σενάριο 1.11 Επίδραση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών $q_{AOBN_2OND}$ στην απόδοση της εγκατάστασης. .... | 136 |
| 4.3.1.12 Σενάριο 1.12 Επίδραση του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγής (HAO) $q_{AOBHAO}$ στην απόδοση της εγκατάστασης. ....       | 138 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.3.1.13 Σενάριο 1.13 Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικό οξείδιο ng3 στην απόδοση της εγκατάστασης.....                     | 141 |
| 4.3.1.14 Σενάριο 1.14 Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή του νιτρικό οξείδιο σε αέριο υποξείδιου του αζώτου ng4 στην απόδοση της εγκατάστασης. .... | 142 |
| 4.3.1.15 Σενάριο 1.15 Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή του αέριο υποξείδιου του αζώτου σε αέριο άζωτο ng5 στην απόδοση της εγκατάστασης.....      | 144 |
| 4.3.1.16 Επίδραση της μεταβολής των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων στο ποσοστό εκπομπών SN <sub>2</sub> O .....   | 146 |
| 4.3.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας της απόδοσης της εγκατάστασης  | 148 |
| 4.3.2.1 Σενάριο 2.1 : Επίδραση του χρόνου παραμονής των στερεών, θc στην απόδοση της εγκατάστασης .....  | 148 |
| 4.3.2.2. Σενάριο 2.2 : Επίδραση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης στην απόδοση της εγκατάστασης .....  | 152 |
| 4.3.2.3 Σενάριο 2.3 : Επίδραση της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης.....  | 157 |
| 4.3.2.4 Σενάριο 2.4 : Επίδραση των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα στην απόδοση της εγκατάστασης .....                       | 160 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....   | 164 |
| Βιβλιογραφία .....   | 170 |



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|  |    |
|--|----|
| Πίνακας 2. 1: Στοιχειομετρία και διεργασίες ASM1(Henze et al 2010) .....   | 7  |
| Πίνακας 2. 2:Κινητικές διεργασίες ASM1(Henze et al 2010).....  | 8  |
| Πίνακας 2. 3 :Τυπικές τιμές παραμέτρων για ουδέτερο pH (Ανδρεαδάκης& Νουτσόπουλος) 9   |    |
| Πίνακας 2. 4 :Τυπικές τιμές χαρακτηριστικών των λυμάτων σε αστικά απόβλητα<br>(Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.).....         | 10 |
| Πίνακας 2. 5: Στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης (IWA, 2000) .....  | 14 |
| Πίνακας 2. 6 : Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης των ετεροτροφικών μ/ο (IWA,<br>2000) .....                            | 15 |
| Πίνακας 2. 7 : Στοιχειομετρία των διεργασιών των φωσφορικά συσσωρευόμενων<br>οργανισμών (IWA, 2000) .....                    | 16 |
| Πίνακας 2. 8: Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης και αποσύνθεσης των<br>αυτοτροφικών μ/ο (IWA, 2000) .....              | 16 |
| Πίνακας 2. 9 : Στοιχειομετρία που περιγράφουν την ταυτόχρονη κατακρήμνιση και<br>επαναδιάλυση του φωσφόρου (IWA, 2000) ..... | 17 |
| Πίνακας 2. 10 : Κινητικές εξισώσεις μοντέλου ASM2 (IWA, 2000).....   | 19 |
| Πίνακας 2. 11: Στοιχειομετρία και διεργασίες ASM3(Σαραντόπουλος 2015) .....  | 27 |
| Πίνακας 2. 12: Κινητικές εξισώσεις ASM3(Σαραντόπουλος, 2015) .....   | 29 |
| Πίνακας 2. 13: Παραμέτρων καθίζησης(Alex et al, 2008). .....   | 33 |
| Πίνακας 2. 14 : Όρια ποιότητας εκροής. ....  | 34 |
| Πίνακας 2. 15:Στοιχειομετρία του μοντέλου χημικής διάσπασης (Pocquet 2015) .....   | 41 |
| Πίνακας 2. 16 : Κινητικές εξισώσεις μοντέλου χημικής διάσπασης (Pocquet 2015).....   | 41 |
| Πίνακας 2. 17: Στοιχειομετρία του μοντέλου νιτροποίησης των νιτροποιητών ( Pocquet 2015)<br>.....                            | 43 |
| Πίνακας 2. 18: Κινητικές εξισώσεις μοντέλου νιτροποίησης των νιτροποιητών ( Pocquet<br>2015) .....                           | 43 |
| Πίνακας 2. 19: Στοιχειομετρία του μοντέλου απονιτροποίηση των νιτροποιητών ( Pocquet<br>2015) .....                          | 44 |
| Πίνακας 2. 20: Κινητικές εξισώσεις μοντέλου απονιτροποίηση των νιτροποιητών ( Pocquet<br>2015) .....                         | 45 |
| Πίνακας 2. 21: Στοιχειομετρία και οι κινητικές εξισώσεις ASMN(Pan et al, 2015).....  | 47 |
| Πίνακας 2. 22: Στοιχειομετρία και οι κινητικές εξισώσεις ASM-ICE(Pan et al, 2015).....                                       | 48 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 3.1: Συστατικά του μοντέλου προσομοίωσης .....   | 54  |
| Πίνακας 3.2: Στοιχειομετρικές παράμετροι του μοντέλου προσομοίωσης .....   | 62  |
| Πίνακας 3.3: Κινητικές παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης .....  | 64  |
| Πίνακας 3. 4: Τυπικές τιμές συγκέντρωσης κορεσμού οξυγόνου σε νερό συναρτήσει της ....   | 68  |
| Πίνακας 3. 5: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για άζωτουχα συστατικά διεργασίες υδρόλυσης.....                                    | 69  |
| Πίνακας 3.6 : Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για μη άζωτούχα συστατικά διεργασίες υδρόλυσης .....                                | 69  |
| Πίνακας 3. 7: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για άζωτουχα συστατικά διεργασίες ετεροτροφικών μικροοργανισμών .....               | 70  |
| Πίνακας 3. 8: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για μη άζωτουχα συστατικά διεργασίες ετεροτροφικών μικροοργανισμών.....             | 71  |
| Πίνακας 3.9: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για άζωτουχα συστατικά διεργασίες αυτοτροφικών και οξειδωτικών βακτηρίων.....        | 72  |
| Πίνακας 3. 10: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για μη άζωτουχα συστατικά διεργασίες αυτοτροφικών και οξειδωτικών βακτηρίων .....  | 73  |
| Πίνακας 3.11 Κινητικές Εξισώσεις Μοντέλου Προσομοίωσης .....   | 74  |
| Πίνακας 3. 12: Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις εκροής((ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι/ Κ.Υ.Α. αριθ. Οικ. 5673/400/1997).....                                   | 82  |
| Πίνακας 3. 13: Συντελεστές βαρύτητας φορτίων εκροής.....   | 83  |
| Πίνακας 3. 14: Συνεισφορά καυσιμών για ικανοποίηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης στην Ελλάδα και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου για κάθε καύσιμο ..... | 104 |
| <br>   |     |
| Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά λυμάτων που εισέρχονται στην εγκατάσταση.....  | 107 |
| Πίνακας 4.2: Αρχικές συγκεντρώσεις συστατικών.....   | 108 |
| Πίνακας 4.3: Εξεταζόμενα σενάρια .....   | 110 |
| Πίνακας 4.4: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας .....                     | 112 |
| Πίνακας 4.5: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας.....                 | 112 |
| Πίνακας 4. 6 :Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας .....   | 113 |
| Πίνακας 4. 7: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας....   | 114 |

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 4.8: Συγκεντρώσεις οργανικών και ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας .....                | 114 |
| Πίνακας 4. 9: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ανηγμένοι συντελεστές συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας .....                        | 114 |
| Πίνακας 4. 10: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας..... | 115 |
| Πίνακας 4. 11: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει της απόδοσης των AOB .....   | 115 |
| Πίνακας 4. 12: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της απόδοσης των AOB .....                                    | 116 |
| Πίνακας 4. 13: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της απόδοσης των AOB .....                        | 116 |
| Πίνακας 4. 14: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της απόδοσης των AOB.....   | 116 |
| Πίνακας 4. 15: Συγκεντρώσεις οργανικών και ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα συναρτήσει της απόδοσης των AOB .....                                 | 117 |
| Πίνακας 4.16: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της απόδοσης των AOB.....                     | 118 |
| Πίνακας 4. 17: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει της απόδοσης των NOB .....   | 119 |
| Πίνακας 4.18: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της απόδοσης των NOB .....                                     | 119 |
| Πίνακας 4. 19: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της απόδοσης των NOB.....   | 120 |
| Πίνακας 4. 20: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του συντελεστή απόδοσης των NOB.....         | 120 |
| Πίνακας 4. 21: Συγκεντρώσεις οργανικών και ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών.....                    | 121 |
| Πίνακας 4. 22: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών.....                       | 122 |
| Πίνακας 4. 23: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών .....  | 122 |
| Πίνακας 4. 24: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών .....     | 122 |
| Πίνακας 4. 25: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB.....                             | 123 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 4. 26: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB .....   | 124 |
| Πίνακας 4. 27: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB .....   | 124 |
| Πίνακας 4. 28: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB .....  | 125 |
| Πίνακας 4. 29: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της ανάπτυξης των NOB .....  | 126 |
| Πίνακας 4. 30: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της ανάπτυξης των NOB.....   | 127 |
| Πίνακας 4. 31: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των νιτροποιητών ....   | 127 |
| Πίνακας 4. 32: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ανηγμένοι συντελεστές συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των νιτροποιητών.....   | 127 |
| Πίνακας 4. 33: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των NOB.....   | 128 |
| Πίνακας 4. 34: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας.....  | 129 |
| Πίνακας 4. 35 Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας .....   | 129 |
| Πίνακας 4. 36: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας .....   | 129 |
| Πίνακας 4. 37: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας .....                                  | 130 |
| Πίνακας 4. 38: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας ks .....                                  | 131 |
| Πίνακας 4. 39: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της απόδοσης του συναρτήσει συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας ks .....  | 131 |
| Πίνακας 4. 40: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας ks.....                  | 132 |
| Πίνακας 4. 41: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης.....             | 132 |
| Πίνακας 4. 42: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης..... | 133 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 4. 43: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης .....  | 133 |
| Πίνακας 4. 44: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης.....                | 134 |
| Πίνακας 4. 45: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών.....                      | 135 |
| Πίνακας 4. 46: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών.....          | 135 |
| Πίνακας 4. 47: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών.....  | 135 |
| Πίνακας 4. 48: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών .....    | 136 |
| Πίνακας 4. 49: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών.....                   | 137 |
| Πίνακας 4. 50: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών .....      | 137 |
| Πίνακας 4. 51: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών .....  | 137 |
| Πίνακας 4. 52: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών ..... | 138 |
| Πίνακας 4. 53: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγής.....                            | 138 |
| Πίνακας 4. 54: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας.....   | 139 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 4. 55: Συγκέντρωση της βιομάζας των νιτροποιητών, αυτοτροφικών και ετεροτροφικών μικροοργανισμών συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης ..... | 139 |
| Πίνακας 4.56: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης .....  | 140 |
| Πίνακας 4. 57: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης.....               | 140 |
| Πίνακας 4. 58: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικό οξείδιο .....                                  | 141 |
| Πίνακας 4. 59: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικό οξείδιο .....                      | 141 |
| Πίνακας 4. 60: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικό οξείδιο .....  | 142 |
| Πίνακας 4. 61: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικό οξείδιο.....                  | 142 |
| Πίνακας 4. 62: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του νιτρικό οξείδιο σε αέριο υποοξειδίου του αζώτου .....              | 143 |
| Πίνακας 4. 63: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του νιτρικό οξείδιο σε αέριο υποοξειδίου του αζώτου.....   | 143 |
| Πίνακας 4. 64: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του νιτρικό οξείδιο σε αέριο υποοξειδίου του αζώτου.....   | 143 |
| Πίνακας 4. 65: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας.....  | 144 |
| Πίνακας 4. 66: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του αέριου υποοξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο.....                  | 144 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 4. 67: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του αερίου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο .....      | 145 |
| Πίνακας 4. 68: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του αερίου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο .....  | 145 |
| Πίνακας 4. 69: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του αερίου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο ..... | 145 |
| Πίνακας 4. 70: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο και η επίδραση της μεταβολής των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων.....  | 146 |
| Πίνακας 4. 71: Συγκεντρώσεις οργανικών και ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών .....  | 148 |
| Πίνακας 4. 72: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών .....   | 149 |
| Πίνακας 4. 73: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών .....   | 149 |
| Πίνακας 4. 74: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών .....   | 150 |
| Πίνακας 4. 75: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ανηγμένοι συντελεστές συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών.....  | 151 |
| Πίνακας 4. 76: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών.....   | 152 |
| Πίνακας 4. 77: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης .....  | 153 |
| Πίνακας 4. 78: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας .....  | 154 |
| Πίνακας 4. 79: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης.....                                  | 154 |
| Πίνακας 4. 80: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης .....   | 156 |
| Πίνακας 4. 81: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας.....  | 157 |
| Πίνακας 4. 82: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης .....   | 158 |

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 4. 83: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης .....   | 158 |
| Πίνακας 4. 84: Συγκέντρωση ετεροτροφικής βιομάζας στην 1 <sup>η</sup> δεξαμενή αερισμού συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης .....                                    | 158 |
| Πίνακας 4. 85: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης.....                                      | 159 |
| Πίνακας 4. 86: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης.....  | 159 |
| Πίνακας 4. 87: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης.....                                 | 159 |
| Πίνακας 4. 88: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα.....                       | 160 |
| Πίνακας 4. 89: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα.....                  | 161 |
| Πίνακας 4. 90: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα.....      | 161 |
| Πίνακας 4. 91: Ποιότητα εκροής συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα.....  | 162 |
| Πίνακας 4. 92: Ποσοστό εκπομπών $SN_2O$ προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα..... | 163 |



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 2. 1: Συστατικά COD (Jeppsson,1996) .....  | 5   |
| Σχήμα 2. 2: Συστατικά Αζώτου (Jeppsson,1996) .....   | 6   |
| Σχήμα 2. 3: Αναπαράσταση διαφοράς νιτροποιητών ετεροτροφικών μικροοργανισμών στα δύο μοντέλα .....   | 24  |
| Σχήμα 2. 4 : Εγκατάσταση BSM2 (Σαραντόπουλος, 2015) .....  | 36  |
| Σχήμα 2. 5:Παραγωγή $N_2O$ από την απομάκρυνση του αζώτου (Pocquet, 2015).....   | 38  |
| Σχήμα 2. 6: Σχηματική αναπαράσταση των AOB (Pocquet, 2015). .....  | 39  |
| Σχήμα 2. 7: Σχηματική αναπαράσταση των ετεροτροφικών απονιτροποιητών (Massara et al, 2017) .....   | 40  |
| Σχήμα 2. 8: Αναπαράσταση του μοντέλου χημικής διάσπασης (Pocquet ,2015).....   | 40  |
| Σχήμα 2. 9: Αναπαράσταση του μοντέλου νιτροποίηση των νιτροποιητών (Pocquet ,2015) .   | 42  |
| Σχήμα 2. 10: Αναπαράσταση του μοντέλου απονιτροποίηση των νιτροποιητών(Pocquet ,2015) .....  | 44  |
| Σχήμα 2. 11: Μοντέλο ASMN (Pan et al 2015) .....   | 45  |
| Σχήμα 2. 12: Μοντέλο ASM-ICE (Pan et al, 2015 ) .....  | 46  |
| <br>   |     |
| Σχήμα 3.1: Διακριτοποίηση θέσεων δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης.....   | 76  |
| Σχήμα 3. 2: Διακριτοποίηση δεξαμενής τελικής καθίζησης (Σαραντόπουλος, 2015).....  | 80  |
| Σχήμα 3. 3: Διακριτοποίηση θέσεων παχυντή.....   | 85  |
| Σχήμα 3.4: Διακριτοποίηση ενδιαφερόμενων θέσεων για τη μονάδα χώνευσης .....   | 87  |
| Σχήμα 3. 5: Διακριτοποίηση των θέσεων της μονάδας αφυδάτωσης.....  | 91  |
| <br>   |     |
| Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Προσομοιωμένης Εγκατάστασης( Σαραντόπουλος 2015).....   | 106 |
| Σχήμα 4. 2:Μεταβολή της συγκέντρωσης της Εύκολα Βιοδιασπάσιμης Ύλης στις 2 πρώτες αεριζόμενες δεξαμενές συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας ..... | 113 |
| Σχήμα 4. 3: Μεταβολή της συγκέντρωσης $NH_2OH$ στις 3 πρώτες αερόβιες δεξαμενές συναρτήσει της απόδοσης των AOB .....  | 117 |
| Σχήμα 4. 4: Μεταβολή της συγκέντρωσης των AOB συναρτήσει της απόδοσης των AOB  | 118 |
| Σχήμα 4. 5 : Μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου συναρτήσει του συντελεστή απόδοσης των NOB .....  | 120 |
| Σχήμα 4. 6 : Μεταβολή της συγκέντρωσης των NOB συναρτήσει του συντελεστή απόδοσης των NOB .....  | 121 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 4. 7: Μεταβολή τη συγκέντρωσης της βιομάζας των νιτροποιητών συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB .....  | 125 |
| Σχήμα 4. 8: Μεταβολή τη συγκέντρωσης της βιομάζας των νιτροποιητών συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των NOB .....  | 126 |
| Σχήμα 4. 9: Μεταβολή τη συγκέντρωσης της ετεροτροφικής βιομάζας συναρτήσει του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας .....   | 130 |
| Σχήμα 4. 10 Μεταβολή του λόγου $X_{NOB}/X_{BH}$ συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης.....   | 134 |
| Σχήμα 4. 11 : Συγκέντρωση του ολικού αζώτου εξόδου συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών.....   | 150 |
| Σχήμα 4. 12 : Λόγοι $X_{AOB}/X_{BH}$ και $X_{NOB}/X_{BH}$ συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών.....  | 151 |
| Σχήμα 4. 13:Μεταβολή της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής βιομάζας συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης .....   | 153 |
| Σχήμα 4. 14: Μεταβολή της συγκέντρωσης της ετεροτροφικής βιομάζας συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης .....                                       | 155 |
| Σχήμα 4. 15: Λόγοι $X_{AOB}/X_{BH}$ και $X_{NOB}/X_{BH}$ συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης.....     | 156 |
| Σχήμα 4. 16: Συγκέντρωση νιτρικών στην έξοδο συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα .....   | 162 |
| Σχήμα 4. 17 : Λόγοι $X_{AOB}/X_{BH}$ και $X_{NOB}/X_{BH}$ στην πρώτη αεριζόμενη δεξαμενή συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα ..... | 163 |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός βιοχημικού μοντέλου ενεργού ιλύος το οποίο θα είναι σε θέση να υπολογίζει τις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου σε συστήματα ενεργού ιλύος. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε αποτελεί μία ευρύτατη τροποποίηση του μοντέλου ενεργούς ιλύος ASM1 της Διεθνούς Επιτροπής Νερού IWA . Στη συνέχεια, το μοντέλο ενεργού ιλύος ενσωματώθηκε σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων το οποίο είναι σε θέση να περιγράφει λεπτομερώς: α) τις διεργασίες που λαμβάνουν μέρος στις επιμέρους μονάδες μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, β) τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων, γ) την ποσότητα και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της παραγόμενης ιλύος, δ) την ζήτηση οξυγόνου και της απαιτήσεις αερισμού της βιολογικής βαθμίδας, ε) την ενεργειακή κατανάλωση και την παραγόμενη ενέργεια και στ) τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Την ανάπτυξη του υπο-μοντέλου και την ενσωμάτωσή του στο ολοκληρωμένο μοντέλο, ακολούθησε η εφαρμογή του. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μία ευρεία ανάλυση ευαισθησίας με στόχο τον προσδιορισμό των στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα του ολοκληρωμένου μοντέλου (κυρίως ως προς τις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου). Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ακολούθησε μία σειρά εφαρμογών με στόχο τον προσδιορισμό της επίδρασης διαφόρων κρίσιμων λειτουργικών παραμέτρων στην παραγωγή εκπομπών υποξειδίου του αζώτου αλλά και στην γενικότερη λειτουργία μίας εγκατάστασης.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα εξεταζόμενα σενάρια είναι τα εξής:

α) Το βιοχημικό μονοπάτι των ετεροτροφικών απονιτροποιητών συμβάλει στην κατανάλωση του  $N_2O$  ενώ τα μονοπάτια απονιτροποίησης και νιτροποίησης των νιτροποιητών στην παραγωγή του, β) το βιοχημικό μονοπάτι της απονιτροποίησης των νιτροποιητών παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό του  $N_2O$ , γ) η αδυναμία οξείδωσης του αμμωνιακού άζωτο σε υδροξυλαμίνη οδηγεί στην παραγωγή πολύ χαμηλών εκπομπών υποξειδίου του αζώτου, δ) όσο αυξάνεται ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των AOB τόσο αυξάνονται οι εκπομπές του αερίου του υποξειδίου του άνθρακα, ε) όσο αυξάνεται η ετεροτροφική βιομάζα μειώνονται οι εκπομπές του αερίου του υποξειδίου του αζώτου, στ) χρόνοι παραμονής στερεών της τάξης των 5 ημερών οδηγούν στην αύξηση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου, ζ) η επίτευξη πολύ υψηλών αποδόσεων στο στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας συμβάλλει στην αύξηση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου και η) η επιβολή συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου στα

αεριζόμενα διαμερίσματα του βιολογικού αντιδραστήρα της τάξης του 1-1,5 mg/L οδηγεί στην παραγωγή αυξημένων εκπομπών υποξειδίου του αζώτου.

#### Λέξεις κλειδιά

Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, προσομοίωση, ASM1, εκπομπές υποξειδίου του αζώτου, εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ζωνική καθίζηση, παραγωγή βιοαερίου, καταναλώσεις οξυγόνου, καταναλώσεις ενέργειας, στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι, λειτουργικές παράμετροι.

# ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the development and application of a biochemical active sludge model that will be able to calculate the emissions of nitrous oxide in activated sludge systems. The model that has been developed is a wide-ranging modification of International Water Association (IWA) activated sludge model ASM1 model. The activated sludge model was then intergrated into a complete simulation model for the operation of sewage treatment plants which is able to describe in detail: (a) the processes taking place in the sub-units of a sewage treatment plant, (b) the quality characteristics of the treated sewage, (c) the quantity and quality characteristics of the sludge produced, (d) the oxygen demand and the biofuel requirements, (e) the energy consumption and the producer (f) greenhouse gas emissions. The development of the sub-model and its intergration into the integrated model followed its implementation. Initially, a broad sensitivity analysis was conducted to determine the stoichiometric and kinetic parameters most affected by the effects of the integrated model (mainly nitrous oxide emissions). Based on the results of the sensitivity analysis, a series of applications was conducted to determine the effect of various critical operating parameters on the production of nitrous oxide emissions but also on the overall operation of an installation.

The main conclusions drawn from the scenarios examined are as follows:

- (a) The biochemical pathway of the heterotrophic denitrification contributes to the consumption of N<sub>2</sub>O while the nitrification and denitrification pathways of the nitrifiers in its production,
- (b) the nitrifiers nitrification biochemical pathway produces the highest proportion of N<sub>2</sub>O,
- (c) the inability to oxidise ammonial nitrogen hydroxylamine leads to very low nitrous oxide emissions,
- (d) as the maximum rate of growth of AOB increases, the emissions of carbon dioxide gas are increased,
- (e) as the
- (f) 5 day solids retention time lead to increased nitrous oxide emissions,
- (g) the achievement of very high yields at the primary treatment stage contributes to the increase in emissions of nitrous oxide , and
- h) Enforcement of dissolved oxygen concentrations in the aerated compartments of the biological reactor of 1-1,5 mg / L leads to the production of increased emissions of nitrous oxide.

Keywords

Wastewater treatment plants, simulation, ASM1, nitrous oxide emissions, greenhouse gas emissions, zone settling, biogas production, oxygen consumption, energy consumption, stoichiometric and kinetic parameters, functional parameters



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί ένα σύνθετο εγχείρημα το οποίο προϋποθέτει την λειτουργία μίας σειράς μονάδων οι οποίες λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο. Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο τόσο για τον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων όσο και για την παρακολούθηση της λειτουργίας τους αλλά και την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων λειτουργίας με στόχο την βελτιστοποίησή τους. Τα τελευταία τριάντα χρόνια έχει αναπτυχθεί μία σειρά από μοντέλα ενεργού ύλους τα οποία προσομοιώνουν την λειτουργία της βιολογικής βαθμίδας των εγκαταστάσεων και τις διεργασίες βιολογικής επεξεργασίας των λυμάτων για την απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα, του αζώτου και σε ορισμένες περιπτώσεις και του φωσφόρου. Τα γνωστότερα από τα μοντέλα αυτά έχουν αναπτυχθεί από την διεθνή επιτροπή για τα νερά (IWA). Από την ίδια επιτροπή έχει αναπτυχθεί και βιοχημικό μοντέλο για την προσομοίωση της λειτουργίας αναερόβιων χωνευτών, ενώ διαθέσιμα είναι επίσης μοντέλα που περιγράφουν τις διαδικασίες καθίζησης. Εκτός των ανωτέρω τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και ολοκληρωμένα μοντέλα προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Ένα ζήτημα το οποίο χρίζει διερεύνησης τα τελευταία χρόνια είναι η παραγωγή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά την επεξεργασία των λυμάτων. Πρόσφατες έρευνες καταδεικνύουν ότι το ζήτημα αυτό είναι σημαντικά δεδομένου ότι υπάρχει η δυνατότητα μείωσης των εκπομπών αυτών μέσω λειτουργικών παρεμβάσεων σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Σύμφωνα με την IPA (2006) το αέριο του υποξειδίου του αζώτου παράγει 296 φορές παραπάνω εκπομπές σε σχέση με το CO<sub>2</sub>. Τα μοντέλα τα οποία έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση των εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, σε ότι αφορά στην παραγωγή υποξειδίου του αζώτου είναι κατά βάση εμπειρικά και επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών μείωσης των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου.

Με βάση τα ανωτέρω στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υπομοντέλου το οποίο θα είναι σε θέση να υπολογίζει αναλυτικά τις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου κατά την βιολογική επεξεργασία των λυμάτων και η ενσωμάτωση και χρήση του σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας.

Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα μοντέλα ενεργού ιλύος και ολοκληρωμένα μοντέλα προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην βιοχημεία της παραγωγής υποξειδίου του αζώτου κατά τον κύκλο του αζώτου (νιτροποίηση – απονιτροποίηση). Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά το ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο στο οποίο ενσωματώθηκε και το νέο υπο-μοντέλο που αναπτύχθηκε. Για όλες τις μονάδες του συστήματος, παρουσιάζονται οι εξισώσεις που μεταβάλουν τα συστατικά καθώς και όλες οι παράμετροι του μοντέλου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του βιοαερίου, της κατανάλωσης οξυγόνου και ενέργειας και παρουσιάζονται αναλυτικά οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στο σύστημα. Στο τέλος αναφέρονται κάποιοι δείκτες που θα βοηθήσουν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών. Ειδικότερα πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου στις τιμές των στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων και ακολουθεί η διερεύνηση της επίδρασης βασικών λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοση της εγκατάστασης.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

### **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΠΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ**

#### **2.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των μοντέλων προσομοίωσης που έχουν αναπτυχθεί για τη λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ). Οι προσομοιώσεις αφορούν όλες τις επιμέρους μονάδες μιας εγκατάστασης όπως οι δεξαμενές καθίζησης, ο βιοαντιδραστήρας, η χώνευση και η αφυδάτωση της ιλύος. Σε αυτά τα μοντέλα έχουν βασιστεί λογισμικά που χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωση των εγκαταστάσεων.

Αρχικά γίνεται αναφορά στα μοντέλα ενεργού ιλύος και στη συνέχεια παρουσιάζονται συστήματα ολοκληρωμένης προσομοίωσης. Τέλος θα παρουσιαστούν μοντέλα που αφορούν τον υπολογισμό των εκπομπών αερίου του υποξειδίου του αζώτου. Τα μοντέλα υπολογισμού του υποξειδίου του αζώτου έχουν δημιουργηθεί την τελευταία πενταετία, με γνώμονα τον καλύτερο υπολογισμό των εκπομπών θερμοκηπίου. Προηγουμένως ο υπολογισμός της εκπομπής γινόταν εμπειρικά.

#### **2.2 Μοντέλα Ενεργού Ιλύος**

##### **2.2.1 Μοντέλο ενεργού Ιλύος Νο1 (ASM1)**

###### **2.2.1.1 Εισαγωγή**

Το 1983, ο Διεθνής Οργανισμός για την Ποιότητα του Νερού (IAWQ) χρησιμοποίησε μια ομάδα επιστημόνων που είχαν σκοπό τη δημιουργία ενός ενιαίου μοντέλου για τη διαστασιολόγηση και το χειρισμό μιας ΕΕΛ. Το νέο μοντέλο θα έπρεπε να χρησιμοποιεί απλές μαθηματικές σχέσεις και να μπορεί να προβλέπει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα αποτελέσματα της νιτροποίησης, απονιτροποίησης καθώς και της οξείδωσης του άνθρακα. Το μοντέλο δημιουργήθηκε το 1987 και ονομάστηκε Activated Sludge Model No1 (Μοντέλο Ενεργούς Ιλύος).

Το μοντέλο ASM1 μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες κατηγορίες :

- Συστατικά που έχουν ως βάση τον άνθρακα (COD)
- Συστατικά που έχουν ως βάση το άζωτο (N)
- Η συγκέντρωση οξυγόνου ( $S_O$ ) και η αλκαλικότητα ( $S_{ALK}$ ) που δεν εντάσσονται σε κάποια από τις πιο πάνω κατηγορίες.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι τρεις πιο πάνω κατηγορίες.

#### 2.2.1.2 Μεταβλητές – Συστατικά του COD

Στο μοντέλο ASM1, το COD σύμφωνα με τον Henze et al (2000), χωρίζεται σε τρεις κύριες κατηγορίες όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Το βιοδιασπάσιμο COD, το μη βιοδιασπάσιμο και η βιομάζα.

Το βιοδιασπάσιμο COD χωρίζεται σε:

Εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή ( $S_S$ ): Καταναλώνεται κατά την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών είτε σε αερόβιες είτε σε ανοξικές συνθήκες. Παράγεται κατά την υδρόλυση των οργανικών που βρίσκονται στη βιοκροκίδα.

Αργά βιοδιασπάσιμη τροφή ( $X_S$ ) : Καταναλώνεται κατά την υδρόλυση των παγιδευμένων οργανικών και παράγεται όταν φθείρονται οι μικροοργανισμοί.

Το μη βιοδιασπάσιμο COD χωρίζεται σε:

Διαλυμένη οργανική ύλη  $S_I$  : Ούτε καταναλώνεται ούτε παράγεται στο παρόν σύστημα. Με όποια συγκέντρωση μπαίνει στο σύστημα με την ίδια βγαίνει.

Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη  $X_I$ : Δεν παράγεται ούτε καταναλώνεται στο σύστημα. Είναι μέρος των αιωρούμενων πτητικών στερεών.

Σωματιδιακό προϊόν λόγω της φθοράς των μικροοργανισμών  $X_P$

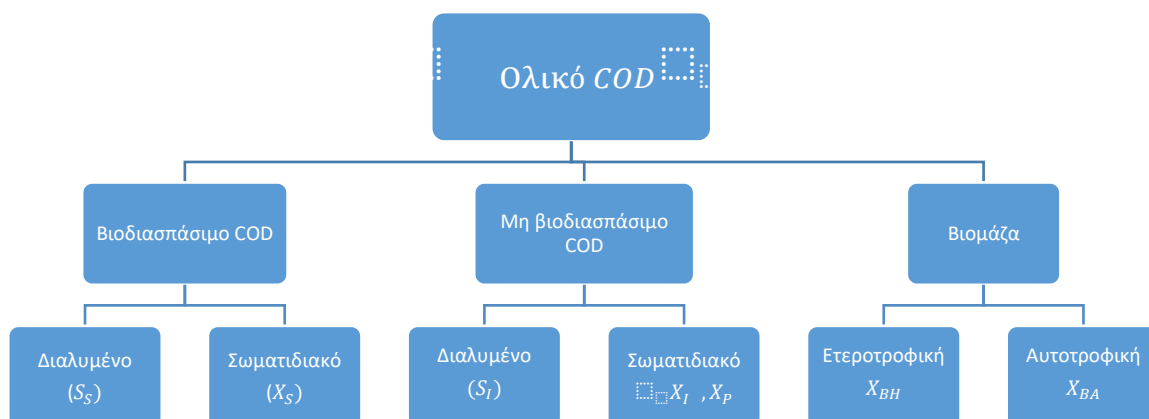
Τελευταία κατηγορία για το COD είναι η βιομάζα:

Ετεροτροφική βιομάζα  $X_{BH}$  : Παράγεται κατά τις ανοξικές και αερόβιες συνθήκες και φθείρεται κατά την αποσύνθεση.

Αυτοτροφική βιομάζα  $X_{BA}$  : Παράγεται σε αερόβιες συνθήκες και καταστρέφεται στην αποσύνθεση.

Το ολικό COD στο σύστημα ορίζεται ως:

$$COD_{total} = S_S + X_S + S_I + X_I + X_{BH} + X_{BA} + X_P$$



Σχήμα :2. 1: Συστατικά COD (Jeppsson,1996)

### Συστατικά του Αζώτου στο Μοντέλο ASM1

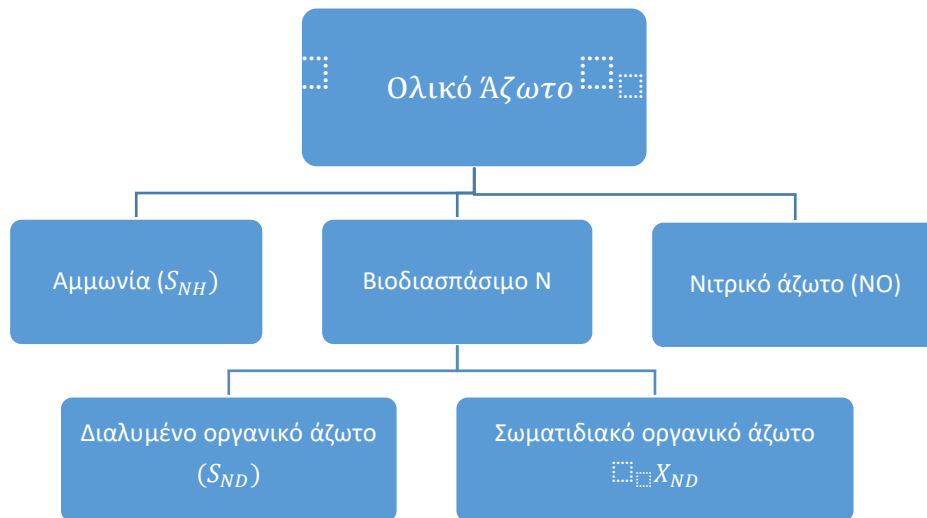
Όπως παραθέτει ο Jeppsson (1996) (σχήμα 2.2), το ολικό άζωτο χωρίζεται σε αμμωνιακό άζωτο  $S_{NH}$ , σε βιομάζα του αζώτου η οποία ένα μέρος της θεωρείται άζωτο, το μη βιοδιασπάσιμο άζωτο και το βιοδιασπάσιμο άζωτο. Το βιοδιασπάσιμο άζωτο χωρίζεται σε διαλυμένο οργανικό άζωτο  $S_{ND}$  και σωματιδιακό οργανικό άζωτο  $X_{ND}$ . Το διοξείδιο του αζώτου καθώς και τα νιτρικά θεωρούνται ως μια μεταβλητή, το νιτρικό άζωτο  $S_{NO}$ . Παρακάτω αναλύονται οι μορφές του αζώτου που υπάρχουν στο παρόν μοντέλο. Οι μορφές του αζώτου είναι οι εξής:

Διαλυμένο οργανικό άζωτο  $S_{ND}$  : Καταναλώνεται για τη δημιουργία αμμωνιακού αζώτου και παράγεται από την υδρόλυση οργανικού αζώτου.

Σωματιδιακό οργανικό άζωτο  $X_{ND}$ : Καταναλώνεται από την υδρόλυση οργανικού αζώτου και δημιουργείται από την αποσύνθεση των ετεροτροφικών και αυτοτροφικών μικροοργανισμών  $i_{xb}$ , αφαιρώντας τα αδρανή σωματιδιακά προϊόντα  $f_{p*}i_{xp}$ .

Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο  $S_{NH}$  : Παράγεται κατά την αμμωνιοποίηση του διαλυμένου οργανικού αζώτου. Χρησιμοποιείται και για την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών όπως και των αυτοτροφικών.

Νιτρικό άζωτο  $S_{NO}$  : Καταναλώνεται κατά την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών και παράγεται κατά την οξείδωση της αμμωνίας για να γίνει ανάπτυξη αυτοτροφικών μικροοργανισμών.



Σχήμα 2. 2: Συστατικά Αζώτου (Jeppsson,1996)

Τα υπόλοιπα συστατικά που υπάρχουν στο παρόν μοντέλο είναι το οξυγόνο  $S_O$  που καταναλώνεται κατά την ανάπτυξη των αυτοτροφικών και ετεροτροφικών μικροοργανισμών σε αερόβιες συνθήκες. Καθώς και η αλκαλικότητα η οποία εντοπίζει κυρίως τις μεταβολές στο pH των λυμάτων που εμφανίζονται κατά την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών καθώς και κατά την αμμωνιοποίηση του διαλυμένου οργανικού αζώτου. Μεγαλύτερο όμως πρόβλημα στην αλκαλικότητα προκαλεί η νιτροποίηση που μειώνει αρκετά την αλκαλικότητα. Για τη αποφευχθεί η περεταίρω μείωση μπορεί να προστεθεί οξείδιο του ασβεστίου.

Πίνακας 2. 1: Στοιχειομετρία και διεργασίες ASM1(Henze et al 2010)

|   | Διεργασίες                                     | $S_I$ | $S_S$            | $X_I$ | $X_S$     | $X_{B,H}$ | $X_{B,A}$ | $X_P$ | $S_O$                     | $S_{NO}$                   | $S_{NH}$                  | $S_{ND}$ | $X_{ND}$                | $S_{ALK}$                                     |
|---|--|-------|------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------|-------------------------|---|
| 1 | Αερόβια ανάπτυξη των ετεροτροφικών             |       | $-\frac{1}{Y_H}$ |       |           | 1         |           |       | $\frac{1 - Y_H}{Y_H}$     |                            | $-i_{XB}$                 |          |                         | $-\frac{i_{XB}}{14}$                          |
| 2 | Ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών             |       | $-\frac{1}{Y_H}$ |       |           | 1         |           |       |                           | $-\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$ | $-i_{XB}$                 |          |                         | $\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$ |
| 3 | Αερόβια ανάπτυξη των αυτοτροφικών              |       |                  |       |           |           | 1         |       | $-\frac{4.57 - Y_H}{Y_H}$ | $\frac{1}{Y_A}$            | $-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$ |          |                         | $-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$         |
| 4 | Αποσύνθεση των ετεροτροφικών                   |       |                  |       | $1 - f_p$ | -1        |           | $f_p$ |                           |                            |                           |          | $i_{XB} - f_p * i_{XP}$ |   |
| 5 | Αποσύνθεση των αυτοτροφικών                    |       |                  |       | $1 - f_p$ |           | -1        | $f_p$ |                           |                            |                           |          | $i_{XB} - f_p * i_{XP}$ |   |
| 6 | Αμμωνιοποίηση του διαλυόμενου οργανικού αζώτου |       |                  |       |           |           |           |       |                           |                            | 1                         | -1       |                         | $\frac{1}{14}$                                |
| 7 | Υδρόλυση των παγιδευμένων οργανικών            |       | 1                |       | -1        |           |           |       |                           |                            |                           |          |                         |   |
| 8 | Υδρόλυση των παγιδευμένων οργανικών του αζώτου |       |                  |       |           |           |           |       |                           |                            |                           | 1        | -1                      |   |

Πίνακας 2. 2:Κινητικές διεργασίες ASM1(Henze et al 2010)

|   | Διεργασίες                                     | Κινητικές εξισώσεις  |
|---|--|--|
| 1 | Αερόβια ανάπτυξη των ετεροτροφικών             | $\mu_H * \frac{S_o}{K_{O,H} + S_o} * \frac{S_s}{S_s + K_s} * X_{B,H}$  |
| 2 | Ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών             | $\mu_H * n_b \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_o} * \frac{S_s}{S_s + K_s} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO}} * X_{B,H}$   |
| 3 | Αερόβια ανάπτυξη των αυτοτροφικών              | $\mu_A * \frac{S_o}{K_{O,A} + S_o} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + K_{NH}} * X_{B,A}$   |
| 4 | Αποσύνθεση των ετεροτροφικών                   | $X_{B,H} * b_H$  |
| 5 | Αποσύνθεση των αυτοτροφικών                    | $X_{B,A} * b_A$  |
| 6 | Αμμωνιοποίηση του διαλυόμενου οργανικού αζώτου | $X_{B,H} * k_S * S_{ND}$   |
| 7 | Υδρόλυση των παγιδευμένων οργανικών            | $k_h * \left( \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + X_S / X_{B,H}} \right) * \left[ \frac{S_o}{K_{O,H} + S_o} + n_h * \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_o} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO}} \right] * X_{B,H}$ |
| 8 | Υδρόλυση των παγιδευμένων οργανικών του αζώτου | $\rho_7 * \frac{X_{ND}}{X_S}$  |

Συγκεντρώσεις συστατικών

Πίνακας 2. 3 :Τυπικές τιμές παραμέτρων για ουδέτερο pH (Ανδρεαδάκης& Νουτσόπουλος)

| Σύμβολο                                | Μονάδες   | Τιμή<br>(20°C) | Τιμή<br>(10°C) |
|--|---|----------------|----------------|
| <u>Στοιχειομετρικές<br/>παράμετροι</u> |   |                |                |
| $Y_A$                                  | gr δημιουργούμενου κυττάρου COD<br>(gr οξειδωμένου N) <sup>-1</sup>   | 0,240          | 0,240          |
| $Y_H$                                  | gr δημιουργούμενου κυττάρου COD<br>(gr οξειδωμένου COD) <sup>-1</sup> | 0,670          | 0,670          |
| $f_p$                                  | αδιάστατο   | 0,080          | 0,080          |
| $i_{XB}$                               | gr N (gr COD) <sup>-1</sup> , στη βιομάζα                             | 0,086          | 0,086          |
| $i_{XP}$                               | gr N (gr COD) <sup>-1</sup> , στην ενδογενή μάζα                      | 0,060          | 0,060          |

|                                 |   |       |       |
|---------------------------------|---|-------|-------|
| <u>Κινητικές<br/>παράμετροι</u> |   |       |       |
| $\mu_H$                         | ημέρα <sup>-1</sup>   | 6,00  | 3,00  |
| $K_S$                           | gr COD m <sup>-3</sup>  | 20,00 | 20,00 |
| $K_{O,H}$                       | gr O <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>                                     | 0,20  | 0,20  |
| $K_{NO}$                        | gr NO <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>                                 | 0,50  | 0,50  |
| $b_H$                           | ημέρα <sup>-1</sup>   | 0,62  | 0,20  |
| $n_g$                           | αδιάστατο   | 0,80  | 0,80  |
| $n_h$                           | αδιάστατο   | 0,40  | 0,40  |
| $K_h$                           | gr εύκολα βιοδιασπάσιμου COD<br>(gr κυττάρου COD ημέρα) <sup>-1</sup> | 3,00  | 1,00  |
| $K_X$                           | gr εύκολα βιοδιασπάσιμου COD<br>(gr κυττάρου COD) <sup>-1</sup>       | 0,03  | 0,01  |
| $\mu_A$                         | ημέρα <sup>-1</sup>   | 0,80  | 0,30  |
| $K_{NH}$                        | grNH <sub>3</sub> -Nm <sup>-3</sup>                                   | 1,00  | 1,00  |
| $K_{O,A}$                       | grO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>                                      | 0,40  | 0,40  |
| $K_a$                           | m <sub>3</sub> COD (gr ημέρα) <sup>-1</sup>                           | 0,08  | 0,04  |

Πίνακας 2. 4 :Τυπικές τιμές χαρακτηριστικών των λυμάτων σε αστικά απόβλητα (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)

| Σύμβολο  | Μονάδα                                | Δανία | Ελβετία | Ουγγαρία | Ελλάδα  |
|----------|---------------------------------------|-------|---------|----------|---------|
| $S_S$    | gr COD m <sup>-3</sup>                | 125   | 70      | 100      | 145-155 |
| $S_I$    | gr COD m <sup>-3</sup>                | 40    | 25      | 30       | 45-60   |
| $X_S$    | gr COD m <sup>-3</sup>                | 250   | 100     | 150      | 155-220 |
| $X_I$    | gr COD m <sup>-3</sup>                | 100   | 25      | 70       | 35-45   |
| $S_{ND}$ | gr N m <sup>-3</sup>                  | 8     | 5       | 10       | 5-15    |
| $X_{ND}$ | gr N m <sup>-3</sup>                  | 10    | 10      | 15       | 4-10    |
| $S_{NH}$ | gr NH <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup> | 30    | 10      | 30       | 45-55   |
| $S_{NI}$ | gr N m <sup>-3</sup>                  | 2     | 2       | 3        | 2       |
| $S_{NO}$ | gr NH <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup> | 0,5   | 1       | 1        | 1       |



## 2.2.2 Μοντέλο ενεργού Ιλύος No2 (ASM2)

### 2.2.2.1 Εισαγωγή

Το ASM2 σύμφωνα με το Henze et al, (2000) ουσιαστικά είναι μια αναβάθμιση του μοντέλου ASM1 που αναφέρθηκε προηγουμένως. Στο μοντέλο ASM2 περιλαμβάνονται περισσότερα συστατικά για να μπορεί να γίνει καλύτερος χαρακτηρισμός των λυμάτων και της ιλύος, ενώ έχουν προστεθεί επιπλέον βιολογικές διεργασίες που στοχεύουν στην καλύτερη προσομοίωση της βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου.

Αξιοσημείωτο είναι ότι το ASM2 δεν διαχωρίζει τη σύσταση κάθε ξεχωριστού κυττάρου, αλλά θεωρεί μια μέση σύσταση όλης της βιομάζας. Το κάθε κύτταρο μπορεί να έχει διαφορετική συμπεριφορά από το μέσο πληθυσμό, αλλά το μοντέλο αντιμετωπίζει το κάθε κύτταρο με την ίδια σύσταση στο μέσο πληθυσμό.

### 2.2.2.2 Συστατικά Μοντέλου

Πιο κάτω θα αναλυθούν τα συστατικά που περιλαμβάνει το μοντέλο όπου ισχύουν οι κανόνες ονοματολογίας της IAWQ.

**Προϊόντα αναερόβιας ζύμωσης  $S_a$ :** Τα προϊόντα των ζυμώσεων στο μοντέλο μας θεωρούνται ως οξικό άλας, δεν σημαίνει όμως ότι δεν παράγονται και άλλα προϊόντα εκτός του οξικού άλατος.

**Αλκαλικότητα των λυμάτων  $S_{ALK}$ :** Η αλκαλικότητα χρησιμοποιείται για να προσφέρει πληροφορίες σχετικά με τις μεγάλες διακυμάνσεις του pH που μπορεί να μειώσουν τους ρυθμούς ή να σταματήσουν ορισμένες διαδικασίες. Το  $S_{ALK}$  θεωρείται ότι είναι μόνο διανθρακικό ιόν.

**Ζυμώσιμο, εύκολα βιοδιασπάσιμο διαλυτό υλικό  $S_f$ :** Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί το χρησιμοποιούν γιατί μπορεί να διασπαστεί και να γίνει άμεση διαθέσιμη τροφή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υπόστρωμα κατά τις ζυμώσεις.

**Αδρανές διαλυτό οργανικό υλικό  $S_I$ :** Αυτό το οργανικό υλικό παραμένει αμετάβλητο στην ΕΕΛ. Είναι μέρος της εισόδου, ενώ μπορεί να παραχθεί και από την υδρόλυση του σωματιδιακού οργανικού φορτίου  $X_S$ .

**Αέριο άζωτο  $S_{N2}$ :** Θεωρείται ότι είναι το μοναδικό προϊόν της απονιτροποίησης και μπορεί να υπόκειται σε διεργασίες ανταλλαγής αερίων.

**Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο  $S_{NH4}$ :** Το μοντέλο ορίζει ότι βρίσκεται μόνο στη μορφή των αμμωνιακών ιόντων  $NH_4^+$  για να υπάρχει ισορροπία στα ηλεκτρικά φορτία.

**Διαλυμένο νιτρικό και νιτρώδες άζωτο  $S_{NO3}$**  :Για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς θεωρείται ότι βρίσκεται όλο στη μορφή των νιτρικών ιόντων.

**Διαλυμένο οξυγόνο  $S_{O2}$** : Το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να συμμετέχει σε διεργασίες ανταλλαγής αερίων όπως και το αέριο άζωτο.

**Ανόργανος διαλυτός φώσφορος  $S_{PO4}$** : Εμφανίζεται κυρίως στη μορφή ορθοφωσφορικών. Ανεξαρτήτως του pH για να υπάρχει μια ισορροπία στα ηλεκτρικά φορτία θεωρείται ότι το 50% του  $S_{PO4}$  είναι  $H_2PO_4^-$  και το υπόλοιπο 50%  $HPO_4^{2-}$ .

**Εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή ( $S_S$ )** : Αυτή η μεταβλητή αντικαθίσταται στο ASM2 από το άθροισμα  $S_F + S_a$ .

**Νιτροποιητές  $X_{AUT}$** : Για την νιτροποίηση σε αερόβιες συνθήκες έχουν ευθύνη οι νιτροποιητές και διαμέσου αυτοτροφικού χημικοσυνθετικού αερόβιου μεταβολισμού και οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο σε νιτρικό άζωτο, χωρίς ενδιάμεσες διαδικασίες.

**Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί  $X_H$**  : Το σύνολο της ετεροτροφικής βιομάζας η οποία αναπτύσσεται κάτω από αερόβιες και ανοξικές συνθήκες και να είναι ενεργή κάτω από αναερόβιες (ζύμωση) αποτελούν αυτούς τους μικροοργανισμούς. Είναι υπεύθυνοι για την υδρόλυση του σωματιδιακού υποστρώματος και μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλα τα βιοδιασπάσιμα οργανικά υλικά κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

**Αδρανές σωματιδιακό οργανικό υλικό  $X_I$**  :Τα υλικά αυτά εν αντιθέσει με το μοντέλο ASM1 περιλαμβάνουν και τα σωματιδιακά προϊόντα λόγω της φθοράς των μικροοργανισμών.

**Υδροξείδια μετάλλων  $X_{MeOH}$** : Το συστατικό αυτό είτε προστίθεται στα λύματα προκαλώντας τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου ή μπορεί να περιλαμβάνεται ήδη σε αυτά. Η σύστασή του είναι της μορφής του υδροξειδίου του σιδήρου  $Fe(OH)_3$ , για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς. Μπορεί όμως να αντικατασταθεί με άλλο μέταλλο αλλά θα πρέπει να αλλαχθούν τα στοιχειομετρικά και κινητικά δεδομένα.

**Φωσφορικά μέταλλα  $X_{MeP}$** : Δημιουργείται από την χημική αντίδραση κατά τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου με την προσθήκη μετάλλου Fe(III)., Η σύστασή του είναι της μορφής του  $FePO_4$ , Για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς .Μπορεί όμως να αντικατασταθεί με άλλο μέταλλο αλλά θα πρέπει να αλλαχθούν τα στοιχειομετρικά και κινητικά δεδομένα.

**Πολυφωσφορικά βακτηρίδια  $X_{PAO}$ :** Οι οργανισμοί αυτοί αντιπροσωπεύουν όλες τις κατηγορίες των μικροοργανισμών που μπορούν να ενσωματώνουν περισσότερα πολυφωσφορικά στη μάζα τους. Η συγκέντρωση των  $X_{PAO}$  δεν συμπεριλαμβάνει τα αποθηκευμένα προϊόντα  $X_{PP}$  και  $X_{PHA}$ .

**Εσωκυτταρικά αποθηκευμένα προϊόντα των πολυφωσφορικών βακτηριδίων  $X_{PHA}$ :** Περιλαμβάνονται τα πολυ-υδροξυ-αλκανοειδή (PHA), το γλυκογόνο δε μπορεί όμως να προσδιοριστεί από τη μέτρηση των δύο αυτών συστατικών. Είναι ένα απαραίτητο συστατικό για τη δημιουργία του μοντέλου. Για να προσδιοριστεί έστω και έμμεσα από το COD πρέπει να ικανοποιείται μια συνθήκη μάζας. Θεωρείται ότι το PHA έχει τη χημική δομή  $(C_4H_6O_2)_n$ .

**Πολυφωσφορικά  $X_{PP}$  :** Τα πολυφωσφορικά είναι ανόργανα υλικά μέρος των πολυφωσφορικών βακτηριδίων και αποτελούν μέρος το σωματιδιακού φωσφόρου. Τα πολυφωσφορικά θεωρείται ότι έχουν τη χημική σύσταση  $(K_{0.33}Mg_{0.33}PO_3)_n$ .

**Αργά βιοδιασπάσιμο οργανικό υλικό  $X_S$ :** Για να χρησιμοποιηθεί πρέπει να υποστεί υδρόλυση λόγω του μεγάλου μοριακού της βάρους. Τα προϊόντα της υδρόλυσης μπορούν να υποστούν και ζύμωση.

**Ολικά αιωρούμενα στερεά  $X_{TSS}$ :** Η παράμετρος αυτή εισάγεται στο μοντέλο με σκοπό να υπολογιστεί η συγκέντρωσή τους μέσω της στοιχειομετρίας. Η πρόβλεψη των TSS είναι σημαντική διότι η απομάκρυνση και κατακρήμνιση του φωσφόρου δημιουργεί ανόργανα στερεά.

### 2.2.2.3 Βιολογικές Διεργασίες

Οι βιολογικές διεργασίες στο πιο κάτω μοντέλο είναι συνολικά 19. Οι πρώτες 3 αφορούν την υδρόλυση των μικροοργανισμών, οι διεργασίες 4-9 αφορούν τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς, οι διεργασίες 10-15 τους φωσφορικά συσσωρευόμενους μικροοργανισμούς, οι διεργασίες 16 και 17 που αφορούν τους νιτροποιητές και οι 18-19 που αφορούν το φώσφορο.

Η διεργασία της υδρόλυσης γίνεται πολύ κοντά στους μικροοργανισμούς οι οποίοι διαθέτουν για αυτή τη διεργασία τα ένζυμα καθώς και το αργά βιοδιασπάσιμο COD. Οι διεργασίες χωρίζονται αναλόγως του δέκτη ηλεκτρονίων. Γίνεται υπό αερόβιες συνθήκες (1 βιολογική διεργασία) και ο δέκτης ηλεκτρονίων είναι το οξυγόνο. Πραγματοποιείται σε

συνθήκες όπου η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι σχεδόν μηδενική και υπάρχει συγκέντρωση νιτρικών(2 βιολογική διεργασία). Αυτή η διεργασία είναι πιο αργή από την προηγούμενη. Τέλος, έχουμε τη διεργασία της υδρόλυσης (3 διεργασία) σε αναερόβιες συνθήκες (Πίνακας 2.5) .

Πίνακας 2. 5: Στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης (IWA, 2000)

|   | Διεργασίες                | $S_F$         | $S_{NH_4}$   | $S_{PO_4}$   | $S_I$     | $S_{ALK}$   | $X_S$ | $X_{TSS}$   |
|---|---------------------------|---------------|--------------|--------------|-----------|-------------|-------|-------------|
| 1 | <b>Αερόβια υδρόλυση</b>   | $1 - f_{S_1}$ | $v_{1,NH_4}$ | $v_{1,PO_4}$ | $f_{S_1}$ | $v_{1,ALK}$ | -1    | $v_{1,TSS}$ |
| 2 | <b>Ανοξική υδρόλυση</b>   | $1 - f_{S_1}$ | $v_{2,NH_4}$ | $v_{2,PO_4}$ | $f_{S_1}$ | $v_{2,ALK}$ | -1    | $v_{2,TSS}$ |
| 3 | <b>Αναερόβια υδρόλυση</b> | $1 - f_{S_1}$ | $v_{3,NH_4}$ | $v_{3,PO_4}$ | $f_{S_1}$ | $v_{3,ALK}$ | -1    | $v_{3,TSS}$ |

Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί σε αερόβιες συνθήκες (διεργασίες 4,5) και ανοξικές συνθήκες (διεργασίες 6,7) καταναλώνουν το  $S_f$  και το  $S_a$  για να αναπτυχθούν(Πίνακας 2.6). Στο μοντέλο τίθενται συγκεκριμένοι ρυθμοί ανάπτυξης της βιομάζας, οι οποίοι δεν μπορούν να αυξηθούν περαιτέρω ακόμη και αν υπάρχει μεγάλη ποσότητα  $S_f$  και το  $S_a$  . Οι αερόβιες διαδικασίες απαιτούν παρουσία  $S_{O_2}$ ,  $S_{NH_4}$  και  $S_{PO_4}$  και παράγουν ολικά αιωρούμενα στερεά  $X_{TSS}$  . Οι αναερόβιες διαδικασίες έχουν ως δέκτη ηλεκτρονίων το νιτρικό άζωτο. Γίνεται απονιτροποίηση που μειώνει την αλκαλικότητα. Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί σε αναερόβιες συνθήκες έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν το SF σε SA μέσω ζύμωσης (διεργασία 8). Αυτή η διεργασία μπορεί να αυξήσει τη βιομάζα αν και πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Τελευταία (διεργασία 9) για τους ετεροτροφικούς οργανισμούς είναι η αποσύνθεση όπως συμβαίνει και στο μοντέλο ASM1.

Πίνακας 2. 6 : Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης των ετεροτροφικών μ/ο (IWA, 2000)

|   | Διεργασίες                                   | $S_{O_2}$           | $S_F$            | $S_A$            | $S_{NO_3}$                    | $S_{N_2}$                     | $X_I$    | $X_S$        | $X_H$ |
|---|--|---------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|--------------|-------|
| 4 | Αερόβια ανάπτυξη στο $S_F$                   | $1 - \frac{1}{Y_H}$ | $-\frac{1}{Y_H}$ |                  |                               |                               |          |              | 1     |
| 5 | Αερόβια ανάπτυξη στο $S_A$                   | $1 - \frac{1}{Y_H}$ |                  | $-\frac{1}{Y_H}$ |                               |                               |          |              | 1     |
| 6 | Ανοξική ανάπτυξη στο $S_F$                   | $1 - f_{s1}$        | $-\frac{1}{Y_H}$ |                  | $-\frac{1 - Y_H}{2.86 * Y_H}$ | $\frac{1 - Y_H}{2.86 * Y_H}$  |          |              | 1     |
| 7 | Ανοξική ανάπτυξη στο $S_A$<br>απονιτροποίηση |                     |                  | $-\frac{1}{Y_H}$ | $-\frac{1 - Y_H}{2.86 * Y_H}$ | $-\frac{1 - Y_H}{2.86 * Y_H}$ |          |              | 1     |
| 8 | Ζύμωση                                       |                     | -1               | 1                |                               |                               |          |              |       |
| 9 | Αποσύνθεση                                   |                     |                  |                  |                               |                               | $f_{x1}$ | $1 - f_{x1}$ | -1    |

Σε ότι αφορά τους φωσφορικά συσσωρευόμενους μικροοργανισμούς, η αποθήκευση του  $X_{PHA}$  (διεργασία 10) γίνεται σε αναερόβιες συνθήκες χρησιμοποιώντας την ενέργεια που εκλύεται κατά την υδρόλυση των πολυφωσφορικών όπου αποθηκεύουν τα εξωκυτταρικά προϊόντα της ζύμωσης  $S_A$  στη μορφή  $X_{PHA}$ . Η διεργασία 11 αφορά την αποθήκευση των πολυφωσφορίτων  $X_{PP}$ , η οποία επιτυγχάνεται από την αναπνοή των  $X_{PHA}$ . Η επαναδημιουργία των πολυφωσφορίτων είναι απαιτούμενο για την ανάπτυξη των φωσφορικά συσσωρευόμενων μικροοργανισμών(διεργασία 12) όσο ο φώσφορος εκλύεται από την αποσύνθεση του  $X_{PP}$ . Τέλος, οι διεργασίες 13,14,15 αφορούν την αποσύνθεση των  $X_{PP}$ ,  $X_{PAO}$  και  $X_{PHA}$  (Πίνακας 2.7). Έρευνες έδειξαν ότι η αποσύνθεση του  $X_{PP}$  συμβαίνει γρηγορότερα από τις υπόλοιπες.

Πίνακας 2. 7 : Στοιχειομετρία των διεργασιών των φωσφορικά συσσωρευόμενων οργανισμών (IWA, 2000)

|    | Διεργασίες                     | $S_{O_2}$           | $S_A$ | $S_{PO_4}$     | $X_I$     | $X_S$         | $X_{PAO}$ | $X_{PP}$    | $X_{PHA}$        |
|----|--------------------------------|---------------------|-------|----------------|-----------|---------------|-----------|-------------|------------------|
| 10 | Αποθήκευση του $X_{PHA}$       |                     | -1    | $Y_{PO_4}$     |           |               |           | $-Y_{PO_4}$ | 1                |
| 11 | Αποθήκευση του $X_{PP}$        | $-Y_{PHA}$          |       | -1             |           |               |           | 1           | $-Y_{PHA}$       |
| 12 | Αερόβια ανάπτυξη του $X_{PAO}$ | $1 - \frac{1}{Y_H}$ |       | $-i_{PBM}$     |           |               | 1         |             | $-\frac{1}{Y_H}$ |
| 13 | Αποσύνθεση $X_{PAO}$           |                     |       | $-v_{13,PO_4}$ | $f_{x_1}$ | $1 - f_{x_1}$ | -1        |             |                  |
| 14 | Αποσύνθεση $X_{PP}$            |                     |       | 1              |           |               |           | -1          |                  |
| 15 | Αποσύνθεση $X_{PHA}$           |                     | 1     |                |           |               |           |             | -1               |

Οι διαδικασίες 16, 17 αφορούν τους νιτροποιητές (Πίνακας 2.8). Η διεργασία 16 αφορά την ανάπτυξη των νιτροποιητών, η οποία γίνεται σε αερόβιες συνθήκες όπου καταναλώνεται αμμωνία και παράγονται νιτρικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αλκαλικότητας. Η διαφορά με το μοντέλο ASM1 είναι η προσθήκη του φωσφόρου ως περιοριστικός παράγοντας. Η αποσύνθεση των νιτροποιητών (διεργασία 17) είναι παρόμοια διεργασία που γίνεται στο μοντέλο ASM1.

Πίνακας 2. 8: Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης και αποσύνθεσης των αυτοτροφικών μ/ο (IWA, 2000)

|    | Διεργασίες                     | $S_{O_2}$                | $S_{NH_4}$                     | $S_{NO_3}$      | $S_{PO_4}$    | $X_I$     | $X_S$         | $X_{AUT}$ |
|----|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| 16 | Αερόβια ανάπτυξη των $X_{AUT}$ | $\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$ | $-i_{NBM}$<br>$-\frac{1}{Y_A}$ | $\frac{1}{Y_A}$ | $-i_{PBM}$    |           |               | 1         |
| 17 | Αποσύνθεση                     |                          | $v_{17,NH_4}$                  |                 | $v_{17,PO_4}$ | $f_{x_1}$ | $1 - f_{x_1}$ | -1        |

Οι τελευταίες διεργασίες είναι οι 18,19 οι οποίες αφορούν την κατακρήμνιση και την επαναδιάλυση του φωσφόρου(Πίνακας 2.9). Οι δύο αυτές διεργασίες είναι αντίστροφες μεταξύ τους. Η σχέση που ορίζει αυτές τις διεργασίες είναι:



Όπου  $X_{MeOH} = Fe(OH)_3$  και  $X_{MeP} = FePO_4$

Πίνακας 2. 9 : Στοιχειομετρία που περιγράφουν την ταυτόχρονη κατακρήμνιση και επαναδιάλυση του φωσφόρου (IWA, 2000)

|    | Διεργασίες          | $S_{PO_4}$ | $S_{ALK}$      | $X_{MeOH}$ | $X_{MeP}$ | $X_{TSS}$ |
|----|---------------------|------------|----------------|------------|-----------|-----------|
| 18 | <b>Κατακρήμνιση</b> | -1         | $\nu_{19,ALK}$ | -3.45      | 4.87      | 1.42      |
| 19 | <b>Επαναδιάλυση</b> | 1          | $\nu_{20,ALK}$ | 3.45       | -4.87     | -1.42     |

Έπειτα, κρίνεται αναγκαίο να γίνει μια αναφορά στους περιορισμούς του μοντέλου. Οι περιορισμοί αυτοί αναφέρονται στην επόμενη υποενότητα.

#### 2.2.2.4 Περιορισμοί του μοντέλου

Το ASM2 παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς που αφορούν κυρίως την προσθήκη της φωσφορικής βιομάζας, καθώς και την ίδια τη δομή του μαθηματικού μοντέλου. Ο Διεθνής Οργανισμός για την Ποιότητα του Νερού (IQWA) όρισε κάποιους περιορισμούς για το μοντέλο όπου αναφέρονται μερικοί πιο κάτω.

- Το μοντέλο αφορά μόνο αστικά λύματα και όχι βιομηχανικά.
- Το ASM2 δεν προσομοιώνει διαδικασίες διαχωρισμού στις δεξαμενές καθίζησης.
- Το pH πρέπει να είναι μεταξύ 6.3 και 7.8.
- Η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10 με 25 βαθμούς Κελσίου. Ο λόγος είναι ότι δεν γνωρίζουμε τη συμπεριφορά των ΡΑΟ σε άλλες συνθήκες.
- Τα προϊόντα της ζύμωσης είναι η μόνη οργανική τροφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους πολυφωσφορικούς οργανισμούς (ΡΑΟ).
- Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν για την ανάπτυξή τους τα ζυμώσιμα οργανικά υποστρώματα SF και SA.
- Οι χαμηλές συγκεντρώσεις φωσφόρου και αμμωνίας μπορεί να αποτελέσουν περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης στις διεργασίες που συμμετέχουν.

Ακολούθως, παρουσιάζονται αναλυτικά οι εξισώσεις των διεργασιών του μοντέλου (Πίνακας 2.10).



Πίνακας 2. 10 : Κινητικές εξισώσεις μοντέλου ASM2 (IWA, 2000)

|                                      | Διεργασία                  | Ρυθμός διεργασίας $\rho_i$   |
|--------------------------------------|----------------------------|--|
|                                      | <b>Υδρόλυση</b>            |  |
| 1                                    | Αερόβια<br>Υδρόλυση        | $K_h * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} * X_H$  |
| 2                                    | Ανοξική<br>Υδρόλυση        | $K_h * n_{NO_3} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} * X_H$  |
| 3                                    | Αναερόβια υδρόλυση         | $K_h * n_{fe} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} * X_H$  |
| <b>Ετεροτροφικοί Μικροοργανισμοί</b> |                            |  |
| 4                                    | Αερόβια ανάπτυξη στο $S_F$ | $\mu_H * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_F}{S_F + K_F} * \frac{S_F}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_H$   |
| 5                                    | Αερόβια ανάπτυξη στο $S_A$ | $\mu_H * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_A}{S_A + K_A} * \frac{S_A}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_H$   |
| 6                                    | Ανοξική ανάπτυξη στο $S_F$ | $\mu_H * n_{NO_3} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_F}{S_F + K_F} * \frac{S_F}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_H$ |

|  |   |  |
|--|---|--|
| 7  | Ανοξική ανάπτυξη στο απονιτροποίηση στο $S_A$ | $\mu_H * n_{NO_3} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_A}{S_A + K_A} * \frac{S_A}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}}$ $* \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_H$ |
| 8  | Ζύμωση  | $q_{fe} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{S_F}{S_F + K_{fe}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_H$   |
| 9  | Αποσύνθεση                                    | $b_H * X_H$  |
| <b>Φωσφορικά συσσωρευόμενοι οργανισμοί</b> |   |  |
| 10   | Αποθήκευση του $X_{PHA}$                      | $q_{PHA} * \frac{S_A}{K_A + S_A} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP} + X_{PP}/X_{PAO}} * X_{PAO}$   |
| 11   | Αποθήκευση του $X_{PP}$                       | $q_{PP} * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_{PO_4}}{K_{PS} + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} * \frac{K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}}{K_{IPP} + K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}} * X_{PAO}$        |
| 12   | Αερόβια ανάπτυξη του $X_{PAO}$                | $\mu_{PP} * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_{PO_4}}{K_{PS} + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * X_{PAO}$                                     |
| 13   | Αποσύνθεση $X_{PAO}$                          | $b_{PAO} * X_{PAO} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$  |
| 14   | Αποσύνθεση $X_{PP}$                           | $b_{PP} * X_{PP} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$  |
| 15   | Αποσύνθεση $X_{PHA}$                          | $b_{PHA} * X_{PHA} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$  |

| Νιτροποιητές                          |                                |   |
|---------------------------------------|--------------------------------|---|
| 16                                    | Αερόβια ανάπτυξη των $X_{AUT}$ | $\mu_{AUT} * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_{PO_4}}{K_{PS} + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * X_{AUT}$ |
| 17                                    | Αποσύνθεση                     | $b_{AUT} * X_{AUT}$   |
| Κατακρήμιση και επαναδιάλυση φωσφόρου |                                |   |
| 18                                    | Κατακρήμιση                    | $k_{PRE} * S_{PO_4} * X_{MeOH}$   |
| 19                                    | Επαναδιάλυση                   | $k_{RED} * X_{MeP} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$   |

### 2.2.3 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 2d (ASM2d)

Στο μοντέλο ASM2 υπήρχε ένα ερωτηματικό σχετικά με την απονιτροποίηση των πολυφωσφορικών οργανισμών. Από τη δημοσίευση του ASM2 (Henze et al, 2000) έχει αποδειχθεί ότι σε μια προσομοίωση μπορεί να θεωρηθεί πως τα PAOs αποτελούνται από δυο κλάσματα, το ένα από τα οποία μπορεί να απονιτροποιηθεί. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε μια επέκταση του ASM2, σε ένα νέο μοντέλο, το οποίο ονομάστηκε Μοντέλο Ενεργού Ιλύος Νο. 2d (ASM2d). Το ASM2d χρησιμοποιεί τις έννοιες που ενσωματώθηκαν στα μοντέλα ASM2 και ASM1 (Henze et al, 2000).

Το ASM2d είναι μια μικρή επέκταση του ASM2, καθώς περιλαμβάνει μόλις δύο πρόσθετες διεργασίες για να προσομοιωθεί το γεγονός ότι τα PAOs μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα εσωκυτταρικά προϊόντα αποθήκευσης για απονιτροποίηση. Επομένως, στο ASM2d θεωρεί ότι τα PAOs μπορούν να αναπτυχθούν τόσο σε αερόβιες όσο σε ανοξικές συνθήκες, εν αντιθέσει με το ASM2 που υπάρχει ανάπτυξη μόνο κάτω από αερόβιες συνθήκες. Το ASM2d παρουσιάζει τους ίδιους περιορισμούς με το ASM2.

### 2.2.4 Μοντέλο ενεργού ιλύος 3 (ASM3)

#### 2.2.4.1 Εισαγωγή

Το Μοντέλο Ενεργού Ιλύος Νο.3 (ASM3) προτάθηκε το 1999 (Gujer et al, 1999) και είναι ουσιαστικά μια αναβάθμιση του ASM1. Οι διαφορές των δύο θα παρουσιαστούν μετέπειτα. Βασίζεται σε τέσσερις κύριες αρχές του ASM1, την κατανάλωση οξυγόνου, τη νιτροποίηση, την απονιτροποίηση και την παραγωγή λάσπης. Στο ASM3 δεν υπάρχουν οι διεργασίες όπως η βιολογική και η χημική απομάκρυνση φωσφόρου, η ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών και ο υπολογισμός του pH των λυμάτων αλλά μπορούν εύκολα να προστεθούν.

#### 2.2.4.2 Διεργασίες

Οι βασικές διεργασίες που περιγράφονται στο ASM3 είναι:

- 1) Υδρόλυση. Η υδρόλυση γίνεται ανεξαρτήτως αποδέκτη ηλεκτρονίων. Παρουσιάζεται διαφορετικά από το ASM1.
- 2) Αερόβια αποθήκευση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης. Η εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη αρχικά αποθηκεύεται με τη μορφή εσωκυτταρικών προϊόντων

XSTO και στην συνέχεια αφομοιώνεται από τη βιομάζα. Η ενέργεια που απαιτείται λαμβάνεται από την αερόβια αναπνοή.

3) Ανοξική αποθήκευση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης. Αποτελεί παρόμοια διεργασία με την αερόβια αποθήκευση την οποία όμως δεν εκτελούν όλοι οι μικροοργανισμοί. Ακόμη, η απαιτούμενη ενέργεια λαμβάνεται από την απονιτροποίηση.

4) Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών. Για να απλοποιηθεί το μοντέλο θεωρεί ότι για να αναπτυχθούν οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν μόνο τα εσωκυτταρικά αποθηκευμένα προϊόντα XSTO.

5) Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών. Παρόμοια της αερόβιας ανάπτυξης, αλλά η αναπνοή είναι βασισμένη στην απονιτροποίηση.

6) Αερόβια ενδογενής αναπνοή. Η διεργασία αυτή περιγράφει τη μείωση της βιομάζας, καθώς και τις απαιτήσεις ενέργειας οι οποίες συνδέονται με οτιδήποτε εκτός της ανάπτυξης.

7) Ανοξική ενδογενής αναπνοή. Είναι η ίδια σχεδόν διεργασία με την αερόβια ενδογενή αναπνοή, αλλά γίνεται πιο αργά.

8) Αερόβια αναπνοή των προϊόντων αποθήκευσης. Η διεργασία αυτή είναι ανάλογη της ενδογενούς αναπνοής και διασφαλίζει ότι τα προϊόντα αποθήκευσης μειώνονται ταυτόχρονα με τη βιομάζα.

9) Ανοξική αναπνοή των προϊόντων αποθήκευσης. Είναι παρόμοια με την αερόβια διεργασία.

Μετά από την παρουσίαση των χαρακτηριστικών του ASM3 κρίνεται αναγκαία η αναφορά των διαφορών του με το ASM1. Πιο κάτω αναλύονται περιληπτικά οι διαφορές των δύο αυτών μοντέλων.

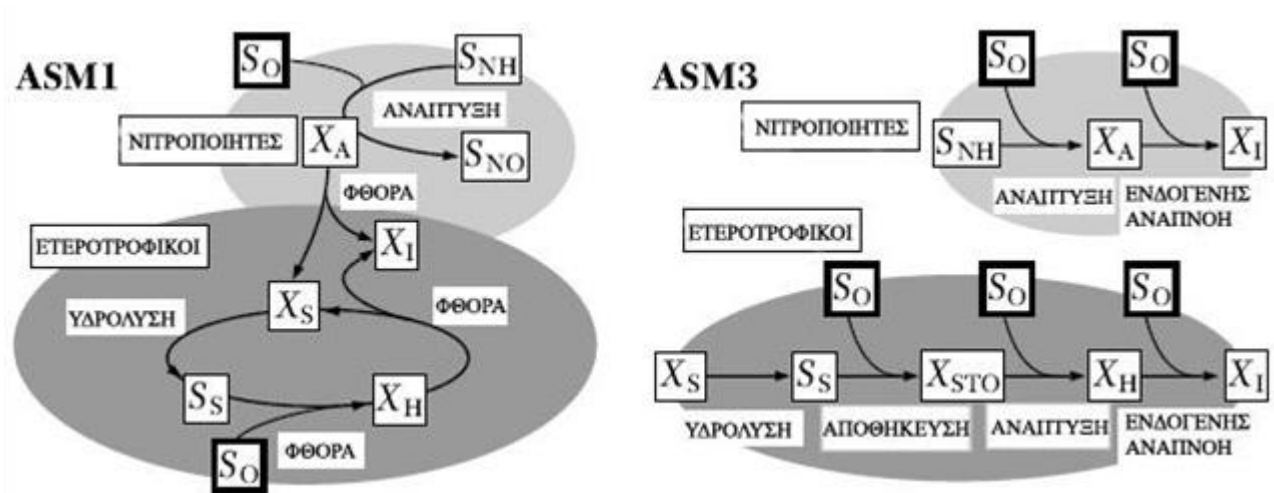
#### 2.2.4.3 Διαφορές ASM1-ASM3

Οι κύριες διαφορές του ASM1 με το ASM2 είναι δύο. Η μια αφορά τις διαδικασίες που γίνεται η αποσύνθεση ASM1 και η άλλη αφορά τον τρόπο κατανάλωσης της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής.

Στο ASM1 παρουσιάστηκε μια απλή διεργασία αποσύνθεσης για να περιγράψει την αποσύνθεση που γίνεται είτε σε αερόβιες είτε σε ανοξικές συνθήκες. Στο ASM3 εισάγεται μια πιο ρεαλιστική περιγραφή των διαδικασιών της αποσύνθεσης, η ενδογενής αναπνοή. Επίσης,

στο ASM1 οι διεργασίες φθοράς των ετεροτροφικών και αυτοτροφικών μικροοργανισμών είναι στενά συνδεδεμένες, ενώ οι δύο οργανισμοί διαφέρουν σημαντικά. Στο ASM3 οι δυο διεργασίες αποσύνθεσης διαχωρίζονται και περιγράφονται με ταυτόσημα μοντέλα (Σχήμα 2.3).

Στο ASM3 έχει γίνει η παραδοχή ότι οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί έχουν εσωτερική δομή, το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη στο ASM1. Πιο συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι η εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή πρέπει να θεωρείται ότι αποθηκεύεται στο εσωτερικό των κυττάρων τους με τη μορφή  $X_{STO}$  και στην συνέχεια ότι αφομοιώνεται από τη βιομάζα και να μην επικρατεί η άποψη μόνο της διεργασία ανάπτυξης της.



Σχήμα 2. 3: Αναπαράσταση διαφοράς νιτροποιητών ετεροτροφικών μικροοργανισμών στα δύο μοντέλα

#### 2.2.4.5 Συστατικά μοντέλου

Τα συστατικά του μοντέλου όπως περιγράφονται από το Henze et al (2000), είναι:

**Εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή ( $S_S$ )** : Θεωρείται ότι καταναλώνεται από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Αποθηκεύεται στην μορφή  $X_{STO}$

**Διαλυμένη οργανική ύλη  $S_I$**  : Ούτε καταναλώνεται ούτε παράγεται στο παρόν σύστημα . Με όποια συγκέντρωση μπαίνει στο σύστημα με την ίδια βγαίνει.

**Διαλυμένο οξυγόνο  $S_{O_2}$** : Το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να συμμετέχει σε διεργασίες ανταλλαγής αερίων όπως και το αέριο άζωτο.

**Διαλυμένο Αμμωνιακό Άζωτο  $S_{NH_4}$**  : Για να υπάρχει ισορροπία μεταξύ των ιόντων το μοντέλο θεωρεί ότι η αμμωνία είναι στη μορφή  $NH_4$  και ότι οι οργανικές ενώσεις περιέχουν και ένα κλάσμα οργανικού αζώτου

**Αέριο άζωτο  $S_{N_2}$**  : Είναι το μόνο προϊόν της απονιτροποίησης και μέσω αυτού μπορεί να υπολογιστεί η κατανάλωση αζώτου στο σύστημα. Μπορεί να υπόκειται σε ανταλλαγή αερίων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει προβλήματα λόγω υπερκορεσμού στη δευτεροβάθμια καθίζηση.

**Διαλυμένο Νιτρικό Άζωτο  $S_{NOX}$**  : Περιλαμβάνει το νιτρικό άζωτο καθώς και το νιτρικό άλας

**Αλκαλικότητα των λυμάτων  $S_{ALK}$**  : Η αλκαλικότητα χρησιμοποιείται για να προσφέρει πληροφορίες σχετικά με τις μεγάλες διακυμάνσεις του pH που μπορεί να μειώσουν τους ρυθμούς ή να σταματήσουν ορισμένες διαδικασίες. Το  $S_{ALK}$  θεωρείται ότι είναι μόνο διανθρακικό ιόν.

**Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη  $X_I$**  : Δεν παράγεται ούτε καταναλώνεται στο σύστημα. Είναι μέρος των αιωρούμενων πτητικών στερεών.

**Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη  $X_S$**  : Ισχύουν όσα αναφέρονται στο ASM1 με τη διαφορά ότι το ASM3 θεωρεί ότι η οργανική ύλη δεν παράγεται στο σύστημα λόγω της αποσύνθεσης, αλλά είναι μόνο αυτή που μπαίνει στην αρχή του συστήματος.

**Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί  $X_H$**  : Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί κάνουν τις περισσότερες διεργασίες στο σύστημα. Αναπτύσσονται τόσο αερόβια όσο και ανοξικά. Είναι υπεύθυνα για την υδρόλυση των  $X_S$ . Μπορούν να αποθηκεύσουν οργανικά στην μορφή γλυκογόνου.

**Εσωκυτταρικά προϊόντα αποθήκευσης  $X_{STO}$**  : Περιλαμβάνει πολυ-υδροξυ-αλκανοϊκούς εστέρες (PHA), γλυκογόνο, κλπ. Δημιουργείται μόνο όταν συνδέεται  $X_H$ . Δεν περιλαμβάνεται στη μάζα του  $X_H$ . Το  $X_{STO}$  είναι μόνο μια λειτουργική ένωση

**Νιτροποιητές  $X_A$**  : Είναι υπεύθυνοι για την νιτροποίηση. Οξειδώνουν την αμμωνία σε νιτρικό άζωτο.

**Αιωρούμενα Στερεά  $X_{SS}$**  : Η παράμετρος αυτή εισάγεται στο μοντέλο με σκοπό να υπολογιστεί η συγκέντρωση τους μέσω της στοιχειομετρίας. Η πρόβλεψη των TSS είναι σημαντική διότι μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση των TSS και MLSS μέσα στο μοντέλο ενεργούς ιλύος. Στα αιωρούμενα στερεά πρέπει να προσμετρηθούν και τα ιζήματα φωσφόρου.

#### 2.2.4.6 Περιορισμοί και διεργασίες μοντέλου

Οι βασικοί περιορισμοί που τέθηκαν κατά την ανάπτυξη του μοντέλου ASM3 είναι οι εξής:

- 1) Για να υπάρχουν σωστά αποτελέσματα η θερμοκρασία των λυμάτων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 8-23 βαθμών Κελσίου.
- 2) Στο ASM3, όπως γίνεται και στο ASM1 δεν μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά της βιομάζας σε αναερόβιες συνθήκες
- 3) Το pH των λυμάτων θα πρέπει να έχει τιμές μεταξύ 6.5 και 7.5.

4) Δεν είναι ικανό να χειριστεί υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών.

5) Όπως και το μοντέλο ASM1 ο χρόνος παραμονής στερεών πρέπει μην είναι μικρότερος της μιας μέρας.



Πίνακας 2. 11: Στοιχειομετρία και διεργασίες ASM3(Σαραντόπουλος 2015)

|                                 | Διεργασίες                         | $S_{O_2}$ | $S_I$     | $S_S$ | $S_{NH_4}$ | $S_{N_2}$ | $S_{NOX}$ | $S_{ALK}$ | $X_I$ | $X_S$ | $X_H$ | $X_{STO}$      | $X_A$ | $X_{SS}$  |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-------|------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|----------------|-------|-----------|
| 1                               | Υδρόλυση                           |           | $f_{S_1}$ | $x_1$ | $y_1$      |           |           | $z_1$     |       | -1    |       |                |       | $i_{x_s}$ |
| <b>Ετεροτροφικοί οργανισμοί</b> |                                    |           |           |       |            |           |           |           |       |       |       |                |       |           |
| 2                               | Αερόβια αποθήκευση του $S_S$       | $x_2$     |           | -1    | $y_2$      |           |           | $z_2$     |       |       |       | $Y_{STO,O_2}$  |       | $t_2$     |
| 3                               | Ανοξική αποθήκευση του $S_S$       |           |           | -1    | $y_3$      | $-x_3$    | $x_3$     | $z_3$     |       |       |       | $Y_{STO,NOX}$  |       | $t_3$     |
| 4                               | Αερόβια ανάπτυξη του $X_H$         | $x_4$     |           |       | $y_4$      |           |           | $z_4$     |       |       | 1     | $-1/Y_{H,O_2}$ |       | $t_4$     |
| 5                               | Ανοξική ανάπτυξη<br>απονιτροποίηση | -         |           |       | $y_5$      | $-x_5$    | $x_5$     | $z_5$     |       |       | 1     | $1/Y_{H,NOX}$  |       | $t_5$     |
| 6                               | Αερόβια ενδογενής αναπνοή          | $x_6$     |           |       | $y_6$      |           |           | $z_6$     | $f_1$ |       | -1    |                |       | $t_6$     |
| 7                               | Ανοξική ενδογενής αναπνοή          |           |           |       | $y_7$      | $-x_7$    | $x_7$     | $z_7$     | $f_1$ |       | -1    |                |       | $t_7$     |
| 8                               | Αερόβια αναπνοή των $X_{STO}$      | $x_8$     |           |       |            |           |           |           |       |       |       | -1             |       | $t_8$     |
| 9                               | Ανοξική αναπνοή των $X_{STO}$      |           |           |       |            | $-x_9$    | $x_9$     | $z_9$     |       |       |       | -1             |       | $t_9$     |

| Αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί |                            |          |             |             |          |           |          |          |              |              |             |      |             |          |
|------------------------------|----------------------------|----------|-------------|-------------|----------|-----------|----------|----------|--------------|--------------|-------------|------|-------------|----------|
| 10                           | Αερόβια ανάπτυξη των $X_A$ | $x_{10}$ |             |             | $y_{10}$ |           | $1/Y_A$  | $z_{10}$ |              |              |             |      | 1           | $t_{10}$ |
| 11                           | Αερόβια ενδογενής αναπνοή  | $x_{11}$ |             |             | $y_{11}$ |           |          | $z_{11}$ | $f_1$        |              |             |      | -1          | $t_{11}$ |
| 12                           | Ανοξική ενδογενής αναπνοή  |          |             |             | $y_{12}$ | $-x_{12}$ | $x_{12}$ | $z_{12}$ | $f_1$        |              |             |      | -1          | $t_{12}$ |
| Στοιχειομετρία $i_{K,I}$     |                            |          |             |             |          |           |          |          |              |              |             |      |             |          |
| Κ Συντηρητικά                |                            |          |             |             |          |           |          |          |              |              |             |      |             |          |
| 1                            | ThOD                       | -1       | 1           | 1           |          | -1.71     | -4.57    |          | 1            | 1            | 1           | 1    | 1           |          |
| 2                            | Άζωτο                      |          | $i_{n,S_i}$ | $i_{n,S_S}$ | 1        | 1         | 1        |          | $i_{n,x_i}$  | $i_{n,x_S}$  | $i_{n,BM}$  |      | $i_{n,BM}$  |          |
| 3                            | Φόρτιση Ιόντων             |          |             |             | $1/14$   | $-1/14$   |          | -1       |              |              |             |      |             |          |
| Παρατηρήσιμα                 |                            |          |             |             |          |           |          |          |              |              |             |      |             |          |
| 4                            | SS                         |          |             |             |          |           |          |          | $i_{SS,x_i}$ | $i_{SS,x_S}$ | $i_{SS,BM}$ | 0.60 | $i_{SS,BM}$ |          |

Πίνακας 2. 12: Κινητικές εξισώσεις ASM3(Σαραντόπουλος, 2015)

|                                 |                                   |  |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|
|                                 | Διεργασίες                        |  |
| 1                               | Υδρόλυση                          | $K_h * \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} * X_H$  |
| <b>Ετεροτροφικοί οργανισμοί</b> |                                   |  |
| 2                               | Αερόβια αποθήκευση του $S_S$      | $K_{STO} * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2}+S_{O_2}} * \frac{S_S}{K_S + S_S} * X_H$  |
| 3                               | Ανοξική αποθήκευση του $S_S$      | $K_{STO} * n_{NOX} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2}+S_{O_2}} * \frac{S_S}{K_S + S_S} * \frac{S_{NOX}}{K_{NOX} + S_{NOX}} * X_H$  |
| 4                               | Αερόβια ανάπτυξη του $X_H$        | $\mu_H * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2}+S_{O_2}} * \frac{X_{STO}/X_H}{K_{STO} + X_{STO}/X_H} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK}+S_{ALK}} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4}+S_{NH_4}} X_H$   |
| 5                               | Ανοξική ανάπτυξη - απονιτροποίηση | $\mu_H * n_{NOX} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2}+S_{O_2}} * \frac{S_{NOX}}{K_{NOX} + S_{NOX}} * \frac{X_{STO}/X_H}{K_{STO} + X_{STO}/X_H} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK}+S_{ALK}} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4}+S_{NH_4}} X_H$ |
| 6                               | Αερόβια ενδογενής αναπνοή         | $b_{H,O_2} * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2}+S_{O_2}} * X_H$  |
| 7                               | Ανοξική ενδογενής αναπνοή         | $b_{H,NOX} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2}+S_{O_2}} * \frac{S_{NOX}}{K_{NOX} + S_{NOX}} * X_H$  |
| 8                               | Αερόβια αναπνοή των $X_{STO}$     | $b_{STO,O_2} * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2}+S_{O_2}} * X_{STO}$  |
| 9                               | Ανοξική αναπνοή των $X_{STO}$     | $b_{STO,NOX} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2}+S_{O_2}} * \frac{S_{NOX}}{K_{NOX} + S_{NOX}} * X_{STO}$  |

| Αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί |                            |  |
|------------------------------|----------------------------|--|
| 10                           | Αερόβια ανάπτυξη των $X_A$ | $\mu_A * \frac{S_{O_2}}{K_{A,O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_{ALK}}{K_{A,ALK} + S_{ALK}} * \frac{S_{NH_4}}{K_{A,NH_4} + S_{NH_4}} X_A$ |
| 11                           | Αερόβια ενδογενής αναπνοή  | $b_{A,O_2} * \frac{S_{O_2}}{K_{A,O_2} + S_{O_2}} * X_H$  |
| 12                           | Ανοξική ενδογενής αναπνοή  | $b_{A,NOX} * \frac{K_{A,O_2}}{K_{A,O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_{NOX}}{K_{A,NOX} + S_{NOX}} * X_H$                                  |

## 2.3 Συστήματα ολοκληρωμένης προσομοίωσης ΕΕΛ (Benchmark Simulation Models)

### 2.3.1 Εισαγωγή

Οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (WWTP) είναι μη γραμμικά συστήματα που υπόκεινται σε μεγάλες αλλαγές της εισροής και του ρυπαντικού φορτίου. Υπάρχουν ακόμη αβεβαιότητες που αφορούν τη σύνθεση των εισερχόμενων λυμάτων. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων υπόκεινται σε σοβαρούς κανονισμούς και πρέπει να γίνεται συνεχής έλεγχος. Από το 1998 έως το 2004, αναπτύχθηκαν τρόποι αξιολόγησης με βάση την προσομοίωση.

Οι στρατηγικές ελέγχου αναλήφθηκαν αρχικά από την COST aid 682 και 624 (Alex et al, 2008) και τώρα είναι υπό την αιγίδα της Ομάδας Εργασίας IWA. Το Benchmark είναι ένα περιβάλλον προσομοίωσης που ορίζει την διάταξη της εγκατάστασης, ένα μοντέλο τα φορτία εισροής, τις διαδικασίες δοκιμών και τα κριτήρια αξιολόγησης. Το μοντέλο είναι αρκετά απλό αλλά λειτουργεί με ρεαλισμό και με ορθά πρότυπα. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τις στρατηγικές ελέγχου που επιθυμεί ο χρήστης. Παρακάτω θα αναλυθούν 2 μοντέλα το BSM1 και το BSM2.

### 2.3.2 Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1)

#### 2.3.2.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με τους Alex et al, (2008) το BSM1 γενικά είναι ένα απλό μοντέλο. Ο βιολογικός αντιδραστήρας αποτελείται από 5 δεξαμενές και συγκεκριμένα υπάρχουν 2 ανοξικές δεξαμενές στην αρχή και ακολουθούνται από 3 αερόβιες. Στη μονάδα επεξεργασίας γίνεται τόσο η νιτροποίηση όσο και η απονιτροποίηση για να επιτευχθεί η απομάκρυνση του αζώτου. Έπειτα, ακολουθεί η δεξαμενή καθίζησης. Ουσιαστικά γίνεται έλεγχος της συγκέντρωσης του οξυγόνου στην τελευταία αεριζόμενη δεξαμενή μεταβάλλοντας την μεταφορά οξυγόνου στη δεξαμενή όπως και στην τελευταία ανοξική δεξαμενή όπου γίνεται έλεγχος των νιτρικών αυξάνοντας ή μειώνοντας ανάλογα την εσωτερική επανακυκλοφορία. Για τους υπολογισμούς των συγκεντρώσεων χρησιμοποιείται το ASM1. Παρακάτω θα αναλυθούν οι διαστάσεις των δεξαμενών καθώς και διάφορες άλλες μεταβλητές που τις αφορούν.

### 2.3.2.2 Προσομοίωση μοντέλου

Ο βιολογικός αντιδραστήρας αποτελείται από 2 ανοξικές δεξαμενές. Η κάθε μια έχει όγκο 1000 m<sup>3</sup> και από 3 αερόβιες με όγκο 1333 m<sup>3</sup> σύνολο 6000 m<sup>3</sup>. Στις 2 πρώτες αερόβιες δεξαμενές υπάρχει σταθερή μεταφορά οξυγόνου μέσω του συντελεστή  $KL\alpha=10h^{-1}$ , ενώ στο τελευταίο το επίπεδο του διαλυμένου οξυγόνου ρυθμίζεται ίσο με 2 gr COD/m<sup>3</sup> μεταβάλλοντας το συντελεστή  $KL\alpha$ .

Η δεξαμενή καθίζησης χωρίζεται σε 10 στρώματα. Κάθε ένα έχει σταθερή  $A$  ίση με 1500 m<sup>2</sup>. Επίσης, κάθε στρώμα έχει ύψος 0.4 m, δηλαδή το συνολικό ύψος είναι 4 m, άρα ο όγκος της είναι ίσος με 6000 m<sup>3</sup>. Η τροφοδοσία της δεξαμενής γίνεται στο έκτο στρώμα, μετρώντας από τον πυθμένα της δεξαμενής (Alex et al, 2008).

Το μοντέλο καθίζησης που θα χρησιμοποιηθεί είναι του (Alex et al, 2008) όπου η δεξαμενή χωρίζεται σε 4 ζώνες.

Η ροή των στερεών ορίζεται από την σχέση

$J_s = v_s(X) * X$ , όπου  $X$  είναι η ολική συγκέντρωση της ιλύος και  $v_s$  η ταχύτητα καθίζησης, η οποία είναι μια διπλή εκθετική εξίσωση που αναγράφεται πιο κάτω:

$$v_s(X) = \max(0, \min\{v'_o, v_o(e^{-r_h(X-X_{min})} - e^{r_p(X-X_{min})})\})$$

Όπου:

$v_s$ : η ταχύτητα καθίζησης σε κάθε στρώμα της δεξαμενής (m/d)

$v'_o$ : η μέγιστη ταχύτητα καθίζησης (m/d)

$v_o$ : η μέγιστη ταχύτητα καθίζησης κατά Vesilind (m/d)

$r_h$ : παράμετρος ζωνικής καθίζησης (m<sup>3</sup>/gr SS)

$r_p$ : παράμετρος συσσωματούμενης καθίζησης (m<sup>3</sup>/gr SS)

$X$ : η συγκέντρωση των στερεών σε κάθε στρώμα (gr SS/m<sup>3</sup>)

$X_{min}$ : η ελάχιστη δυνατή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών (gr SS/m<sup>3</sup>)

$$X_{min} = f_{ns} * X_f$$

Όπου  $f_{ns}$ : αδιάστατος συντελεστής μη καθιζόντων στερεών

$X_f$ : η συγκέντρωση των στερεών που εισέρχονται στη δεξαμενή καθίζησης (gr SS/m<sup>3</sup>)

Οι τιμές των παραμέτρων αναγράφονται πιο κάτω:

Πίνακας 2. 13: Παραμέτρων καθίζησης(Alex et al, 2008).

|          | <b>Παράμετρος</b>                        | <b>Μονάδες</b>        | <b>Τιμή</b> |
|----------|--|-----------------------|-------------|
| $v'_o$   | Μέγιστη ταχύτητα καθίζησης               | m/d                   | 250         |
| $v_o$    | Μέγιστη ταχύτητα καθίζησης κατά Vesilind | m/d                   | 474         |
| $r_h$    | Παράμετρος ζωνικής καθίζησης             | m <sup>3</sup> /gr SS | 0.000576    |
| $r_p$    | Παράμετρος συσσωματούμενης καθίζησης     | m <sup>3</sup> /gr SS | 0.00286     |
| $f_{ns}$ | Συντελεστής μη καθιζόντων στερεών        | αδιάστατο             | 0.00228     |

Τα ισοζύγια της μάζας ανά στρώμα αναγράφονται πιο κάτω:

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{v_{dn}(X_2 - X_1) + \min(J_{s,2}, J_{s,1})}{z_1} \quad (\text{θέση 1})$$

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{v_{dn}(X_{m+1} - X_m) + \min(J_{s,m}, J_{s,m+1}) - \min(J_{s,m}, J_{s,m-1})}{z_m} \quad (\text{θέσεις 2-5})$$

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{\frac{Q_f * X_f}{A} + J_{clar,m+1} - (v_{up} + v_{dn})X_m - \min(J_{s,m}, J_{s,m-1})}{z_m} \quad (\text{θέση 6 στρώμα της τροφής})$$

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{v_{up}(X_{m-1} - X_m) + J_{clar,m+1} - J_{clar,m}}{z_m} \quad (\text{θέσεις 7-9})$$

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{v_{up}(X_9 - X_{10}) - J_{clar,10}}{z_{10}} \quad (\text{θέση 10})$$

(Alex et al, 2008).

$$J_{clar,j} = \begin{cases} \min(v_{s,j}X_j, v_{s,j-1}X_{j-1}) & \text{if } X_{j-1} > X_j \\ \text{or} \\ v_{s,j}X_j & \text{if } X_{j-1} \leq X_j \end{cases}$$

Όπου

Παρακάτω αναγράφονται οι εξισώσεις των διαλυόμενων στερεών συμπεριλαμβανομένου του οξυγόνου:

$$\text{Για τις θέσεις 1 με 5: } \frac{dZ_m}{dt} = \frac{v_{dn} * (Z_{m+1} - Z_m)}{z_m}$$

$$\text{Για την θέση 6: } \frac{dZ_m}{dt} = \frac{\frac{Q_f * X_f}{A} + (v_{up} + v_{dn})Z_m}{z_m}$$

$$\text{Για τις θέσεις 7 με 10: } \frac{dZ_m}{dt} = \frac{v_{up} * (Z_{m-1} - Z_m)}{z_m}$$

$$v_{dn} = \frac{Q_u}{A} = \frac{Q_r + Q_w}{A}$$

$$v_{up} = \frac{Q_e}{A}$$

### Διεργασία προσομοίωσης

Το μοντέλο μπορεί να τρέξει σε τριών ειδών συνθήκες : ξηρές, βροχερές και περιόδους καταιγίδων. Οι αρχικές τιμές επιλέγονται από το χρήστη. Το μοντέλο τρέχει για 100 μέρες υπό σταθερές συνθήκες που δίνονται από το πρόγραμμα. Έπειτα, οι πρώτες 2 εβδομάδες θα πρέπει να είναι σε ξηρές συνθήκες όπου μετά πρέπει να ελεγχθούν (Alex et al, 2008).

### Απόδοση εγκατάστασης επεξεργασίας

Αρχικά τίθενται κάποια όρια της ποιότητας ( Πίνακας 2.13) τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται κατά την εκροή. Ακολούθως, θα αναφερθούν κάποια χρηματοοικονομικά κριτήρια.

Πίνακας 2. 14 : Όρια ποιότητας εκροής.

| Μεταβλητή | Τιμή                       |
|-----------|----------------------------|
| $N_{TOT}$ | <18 gr N/m <sup>3</sup>    |
| $COD_T$   | <100 gr COD/m <sup>3</sup> |
| $S_{NH}$  | <4 gr N/m <sup>3</sup>     |
| TSS       | <30 gr SS/m <sup>3</sup>   |
| $BOD_5$   | <10 gr BOD/m <sup>3</sup>  |

Έπειτα, είναι ο δείκτης ποιότητας εκροής (EQI) που μετριέται κατά τη διάρκεια της δεύτερης εβδομάδας. Τα συστατικά που επηρεάζουν το EQI είναι τα αιωρούμενα στερεά (SS), το (COD), το άζωτο του Kjeldahl (SNKj), το νιτρικό άζωτο (SNO) και το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD).



Ο Δείκτης Λειτουργικού Κόστους (OCI) υπολογίζεται για ένα χρονικό διάστημα 7 ημερών και λόγω της σημαντικότητάς του πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Μετρείται βάσει 6 παραγόντων οι οποίοι περιλαμβάνουν,

- την παραγωγή ιλύος που διατίθεται (SP),
- τη συνολική παραγωγή ιλύος (SP<sub>total</sub>), που λαμβάνει υπόψη τόσο την ιλύ που θα διατεθεί όσο και την ιλύ που χάνεται από την υπερχειλίση,
- την ενέργεια αερισμού (AE),
- την ενέργεια άντλησης (PE),
- την κατανάλωση εξωτερικού άνθρακα (EC) και
- την ενέργεια ανάμιξης (ME).

Ο Γενικός Δείκτης Κόστους (OCI) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Alex et al, 2008):

$$OCI = AE + PE + 5 * SP + 3 * EC + ME$$

### 2.3.3 Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2)

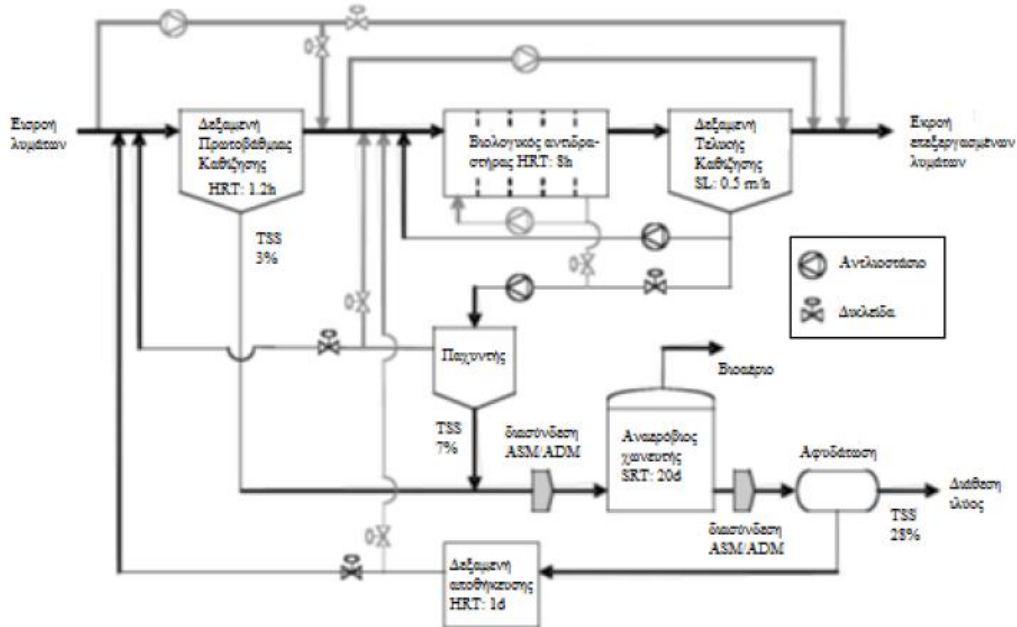
#### 2.3.3.1 Εισαγωγή

Το BSM1 είχε κριθεί ως ένα άκρως επιτυχημένο μοντέλο όμως υπήρχε η ανάγκη δημιουργίας ενός νέου μοντέλου που να περιλαμβάνει όλες τις εγκαταστάσεις μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων. Το πρώτο βήμα έγινε με τη δημιουργία του BSM1-LT (Gernaey et al, 2005) του οποίου η στρατηγική ελέγχου του διαρκεί 1 χρόνο αντί μια εβδομάδα και επιπλέον μια περίοδο έξι μηνών υπό σταθερές συνθήκες για να αξιολογηθεί η εγκατάσταση. Έπειτα ακολούθησε από τους (Jeppsson & Pons, 2004) το BSM2 που η κύρια διαφορά του με το BSM1-LT ήταν η ύπαρξη πρωτοβάθμιας καθίζησης. Η τελική μορφή του BSM2 παρουσιάστηκε από τους (Norpen et al, 2010)

#### 2.3.2 Προσομοιούμενο σύστημα

Στο BSM1 παρατηρούνταν κάποια προβλήματα υπερφόρτωσης του συστήματος, για αυτό το λόγο μειώθηκε ο φόρτος στη διεργασία της ενεργούς ιλύος. Αυτό έγινε με δύο τρόπους μειώνοντας τον όγκο του αζώτου κατά 15% και αυξάνοντας τον όγκο των δεξαμενών. Συγκεκριμένα, οι ανοξικές δεξαμενές αυξήθηκαν από 1000 m<sup>3</sup> σε 1500 m<sup>3</sup> και οι αερόβιες από 1333 m<sup>3</sup> σε 3000 m<sup>3</sup>. Ακόμη, μειώθηκε ο χρόνος παραμονής των στερεών στη πρωτοβάθμια καθίζηση και αυξήθηκε στους βιολογικούς αντιδραστήρες. Στην πρωτοβάθμια

καθίζηση ακόμη υπάρχει 50% απομάκρυνση των TSS με πυκνότητα 3%. Στην παρακάτω Σχήμα 2.4 εμφανίζονται αναλυτικά όλες οι μεταβολές στην ΕΕΛ(Norpens et al, 2010)



Σχήμα 2. 4 : Εγκατάσταση BSM2 (Σαραντόπουλος, 2015)

### Εκτίμηση απόδοσης εγκατάστασης

Ο υπολογισμός της απόδοσης της εγκατάστασης αλλάζει ελάχιστα σε σχέση με το BSM1. Τα όρια ποιότητας εκροής παραμένουν τα ίδια. Η εξίσωση της απόδοσης εγκατάστασης αλλάζει και μπαίνουν δύο επιπλέον παράμετροι μέσα (Norpens et al ,2010)

$$OCI = AE + PE + 3 \cdot SP + 3 \cdot EC + ME - 6 \cdot MP + HE_{net}$$

- Όπου AE είναι η ενέργεια αερισμού , PE είναι η ενέργεια άντληση, SP η ενέργεια για απόρριψη της λάσπης που παράγεται.
- EC ενέργεια κατανάλωσης εξωτερικού άνθρακα ME η ενέργεια ανάμιξης, MP η παραγωγή μεθανίου.
- HE<sub>net</sub> είναι η ενέργεια που χρειάζεται για τη λάσπη στον αναερόβιο αντιδραστήρα που συνήθως είναι μηδέν λόγω της παραγωγής μεθανίου (Norpens et al, 2010).

### 2.3.3 Μοντέλο χώνευσης ADM1 για το BSM2

Η υλοποίηση του ADM1 στο BSM2 αποκλίνει λίγο από το πώς περιγράφεται στο μοντέλο σύμφωνα με τους (Batstone et al, 2002). Πρώτον, η ADM1 εφαρμόζεται έτσι ώστε να είναι συμβατή με το BSM2 . Δεύτερον, πρέπει να εξεταστούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις. Τρίτον, δεν δίδονται ρητές τιμές στους (Batstone et al, 2002) όσον αφορά τις περιεκτικότητες άνθρακα και αζώτου ορισμένων μεταβλητών κατάστασης (Rosen & Jeppsson, 2008).

Για να ικανοποιηθούν οι πιο πάνω συνθήκες γίνεται εισαγωγή συνεχών λειτουργιών αναχαιτίσης του pH και έχει γίνει μια προσπάθεια για να υπάρχει ισορροπία μαζών στο μοντέλο σχετικά με το βαθμό του αζώτου και του COD προκειμένου (Σαραντόπουλος, 2015).

## 2.4 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

### 2.4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία 200 χρόνια παρατηρείται μια αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα η συγκέντρωση του  $CO_2$  έχει αυξηθεί από τα 280 ppm ανά όγκο στα 372 ppm σύμφωνα με το (Gupta & Singh, 2012) και αναμένεται μια αύξηση της τάξης του 0.5% ανά χρόνο. Ακόμη, παρατηρείται μια αύξηση στο  $CH_4$  σε βαθμό των 0.02 ppm ανά έτος. Συνεχίζουμε με το υποξείδιο του αζώτου  $N_2O$  για το οποίο παρατηρείται μια αύξηση 40-50% τα τελευταία 200 χρόνια. Ο λόγος που αναφέρονται αυτοί οι συγκεκριμένοι ρύποι είναι γιατί παράγονται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

Το IPCC το 2006 έθεσε μια παράμετρο που μετρά το πόσο επηρεάζει την κλιματική αλλαγή κάθε ένα από τα πιο πάνω αέρια σε περίοδο 100 ετών. Συγκεκριμένα, ένας τόνος μεθανίου επηρεάζει το φαινόμενο του θερμοκηπίου όπως θα έκαναν 25 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα και ένας τόνος υποξειδίου του αζώτου ισοδυναμεί με 296 τόνους διοξειδίου του άνθρακα. Παρακάτω θα αναλυθεί συνοπτικά η παραγωγή του  $CO_2$  και του  $CH_4$  και έπειτα θα αναλυθεί εκτενέστερα το  $N_2O$  (Gupta & Singh, 2012)

### 2.4.2 Διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο

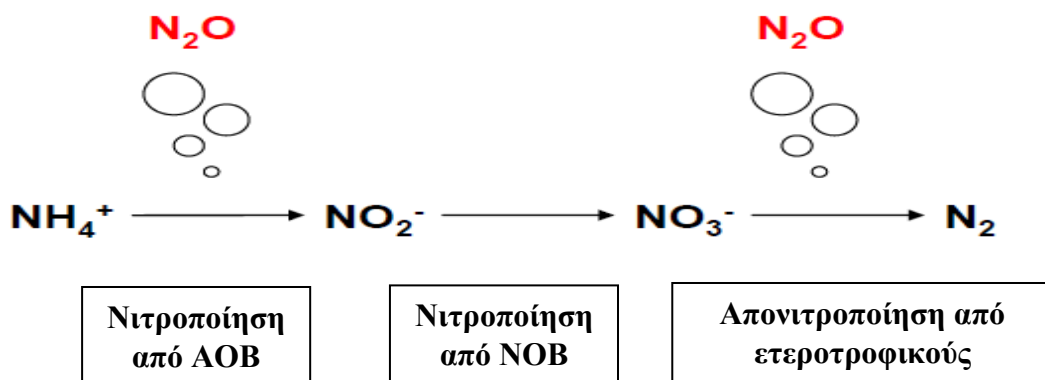
Το  $CO_2$  μπορεί να παραχθεί αναερόβια όταν βιομάζα διασπάται σε  $CO_2$  και  $CH_4$ . Επιπρόσθετα, ένα μέρος της βιομάζας μπορεί να διασπαστεί σε  $CO_2$  και  $CH_4$  μέσω της ενδογενούς αναπνοής. Ακόμη, το  $CO_2$  παράγεται κατά την αερόβια διεργασία και τη διάσπαση της οργανικής ύλης (Gupta & Singh, 2012).

## 2.4.3 Βιολογική απομάκρυνση αζώτου

### 2.4.3.1 Εισαγωγή

Η απομάκρυνση του αζώτου από μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων ακολουθεί μια σειρά χημικών εξισώσεων οι οποίες θα αναλυθούν βήμα βήμα. Ο λόγος είναι η σημαντικότητα της μέτρησης με ακρίβεια του  $N_2O$ . Ουσιαστικά οι κύριες διαδικασίες για την μετατροπή της αμμωνίας σε αέριο άζωτο είναι τρεις όπως φαίνονται και στην (Σχήμα 2.5.). Η διεργασία περιγράφεται ως εξής:

Η αμμωνία ( $NH_4$ ) οξειδώνεται σε διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ) από τα αυτοτροφικά αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια (AOB) και μετέπειτα σε νιτρικά ( $NO_3^-$ ) από τα αυτοτροφικά νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια (NOB). Αυτές οι δύο διεργασίες γίνονται υπό αερόβιες συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η νιτροποίηση. Η απονιτροποίηση γίνεται σε ανοξικές συνθήκες όπου τα νιτρικά μετατρέπονται σε αέριο άζωτο από τα ετεροτροφικά βακτήρια.



Σχήμα 2. 5: Παραγωγή  $N_2O$  από την απομάκρυνση του αζώτου (Pocquet, 2015)

Στη συνέχεια, θα γίνει μια αναφορά για τις διεργασίες που γίνονται από τα AOB για την παραγωγή  $N_2O$ . Η αντίδραση ξεκινά με την οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, ακολουθεί η απονιτροποίηση των νιτρικών και στο τέλος η απονιτροποίηση από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς (Massara, et al,2017).

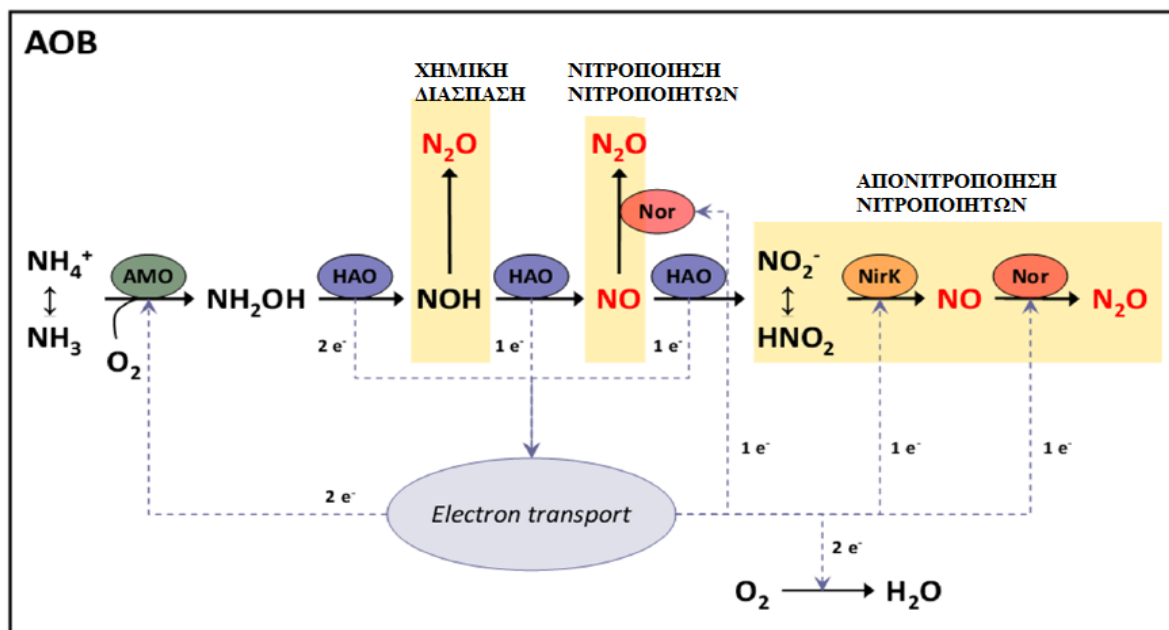
Η οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά γίνεται μέσα από διαδοχικές ενζυμικές διεργασίες από τους AOB. Η αμμωνία αρχικά οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη,  $NH_2OH$ , από το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση (AMO). Η υδροξυλαμίνη καταλύεται σε νιτρικά από το περιπλασματικό ένζυμο της οξυδωαναγωγίας της υδροξυλαμίνης (HAO). Η διεργασία αυτή

έχει 3 βήματα πριν ολοκληρωθεί (Pocquet, 2015). Αρχικά, η υδροξυλαμίνη οξειδώνεται σε νιτροξύλιο (NOH), το νιτροξύλιο μετατρέπεται σε NO και με περαιτέρω οξείδωση σε νιτρώδη (Pocquet, 2015).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία υπάρχουν 3 μονοπάτια για την παραγωγή υποξειδίου του αζώτου στους AOB. Το πρώτο είναι μέσω χημικής αποσύνθεσης του νιτροξυλίου σε  $N_2O$  (Pocquet, 2015). Αυτή η διεργασία ονομάζεται «χημική διάσπαση».

Συνεχίζουμε με την νιτροποίηση των νιτροποιητών όπου η υδροξυλαμίνη μετατρέπεται σε οξείδιο του αζώτου και το NO μετατρέπεται σε  $N_2O$  μέσω της νιτρικής οξειδοαναγωγής (Nor) (Pocquet, 2015).

Η απονιτροποίηση των νιτροποιητών, δηλαδή το τελευταίο μονοπάτι, αφορά την αναγωγή των νιτρικών σε  $N_2O$  σε δύο βήματα. Αρχικά τα νιτρώδη αναγάγονται σε NO μέσω του ενζύμου της νιτρικής αναγωγής (NirK) και ακολούθως αναγάγονται σε  $N_2O$  μέσω νιτρικής οξειδοαναγωγής. Όλες οι διεργασίες φαίνονται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2. 6: Σχηματική αναπαράσταση των AOB (Pocquet, 2015).

Στη συνέχεια, ακολουθεί η διεργασία απονιτροποίησης από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς (Σχήμα 2.7). Ουσιαστικά είναι μια αλυσίδα τεσσάρων αντιδράσεων. Τα νιτρικά καταλύονται σε νιτρώδη έπειτα σε μονοξείδιο του αζώτου και τέλος σε υποξείδιο του αζώτου. Οι διεργασίες καταλύονται αρχικά μέσω της νιτρικής αναγωγής (NaR)

συνεχίζονται με τη νιτρώδη αναγωγή (NiR), έπειτα με τη νιτρική οξειδοαναγωγή (NOR) και τέλος με τη αναγωγή του υποξειδίου του αζώτου ( $N_2OR$ ) (Massara et al, 2017).

### Ετεροτροφικοί Απονιτροποιητές

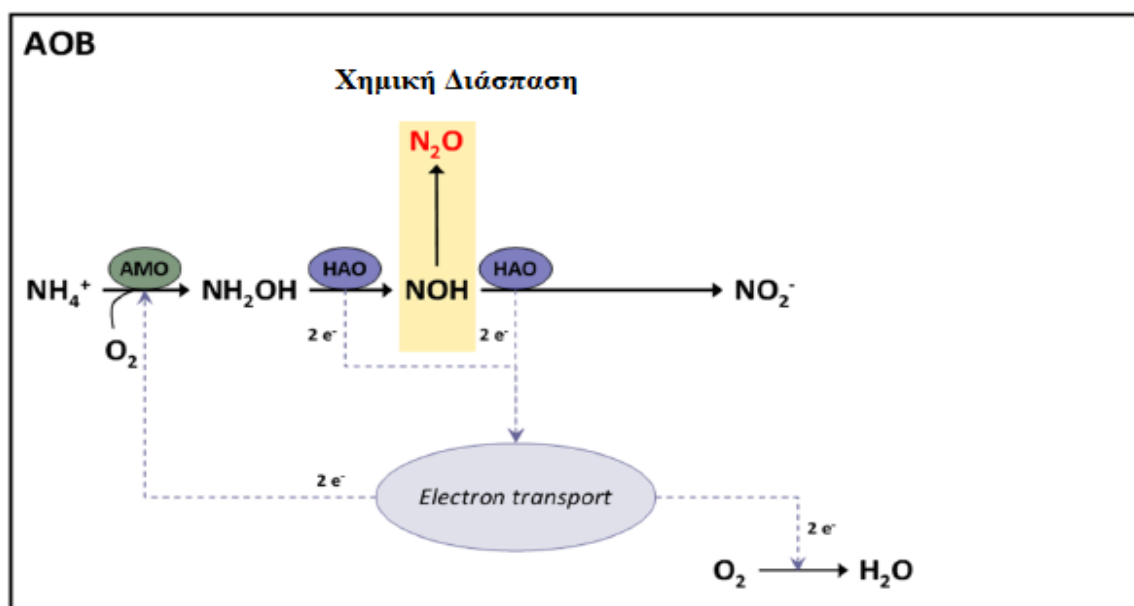


Σχήμα 2. 7: Σχηματική αναπαράσταση των ετεροτροφικών απονιτροποιητών (Massara et al, 2017)

#### 2.4.3.2 Μοντελοποίηση των διεργασιών

Η χημική διάσπαση, η νιτροποίηση των νιτροποιητών, η απονιτροποίηση των νιτροποιητών καθώς και οι ετεροτροφικοί απονιτροποιητές κρίθηκε η ανάγκη να μοντελοποιηθούν για να μετρηθεί κυρίως η ποσότητα του  $N_2O$  στην εγκατάσταση που παράγεται μέσω των μονοπατιών τους.

#### Χημική διάσπαση



Σχήμα 2. 8: Αναπαράσταση του μοντέλου χημικής διάσπασης (Pocquet ,2015)

Το μοντέλο θεωρεί ότι γίνεται παραγωγή  $N_2O$  από τη χημική αποσύνθεση του  $NOH$  που παράγεται κατά την οξειδωση του  $NH_2OH$  σε νιτρώδη. Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την αύξηση των  $AOB$ . Το οξυγόνο αποτελεί περιοριστικό παράγοντα αφού αποτελεί τον δότη ηλεκτρονίων στο σύστημα.

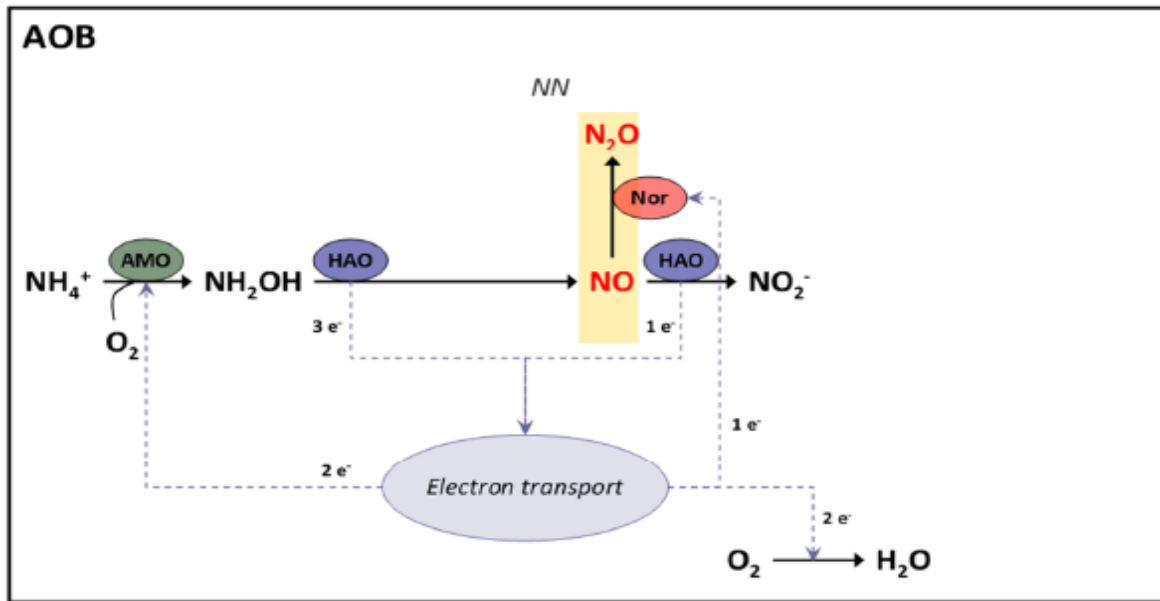
Πίνακας 2. 15:Στοιχειομετρία του μοντέλου χημικής διάσπασης (Pocquet 2015)

| Διεργασίες | $S_{O_2}$ | $S_{NH}$ | $S_{NH_2OH}$ | $S_{NOH}$ | $S_{NO_2}$ | $S_{N_2O}$ |
|------------|-----------|----------|--------------|-----------|------------|------------|
| 1          | -1        | -1       | 1            | 1         |            |            |
| 2          |           |          | -1           | -1        | 1          |            |
| 3          |           |          |              | -1        |            | 0.5        |
| 4          |           |          |              |           |            |            |
| 5          | -1        |          |              |           |            |            |

Πίνακας 2. 16 : Κινητικές εξισώσεις μοντέλου χημικής διάσπασης (Pocquet 2015)

| Διεργασίες | Κινητικές εξισώσεις  |
|------------|--|
| 1          | $q_{AOB,1,max} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,1}} \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4,AOB}} * X_{AOB}$       |
| 2          | $q_{AOB,2,max} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,2}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * X_{AOB}$ |
| 3          | $q_{AOB,3,max} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,3}} \frac{S_{NOH}}{S_{NOH} + K_{NOH,AOB}} * X_{AOB}$          |
| 4          | $q_{AOB,3,max} * S_{NOH} X_{AOB}$  |
| 5          | $0.5R_2 + R_3 - R_1$   |

Νιτροποίηση των Νιτροποιητών(NN)



Σχήμα 2. 9: Αναπαράσταση του μοντέλου νιτροποίηση των νιτροποιητών (Pocquet ,2015)

Το μοντέλο περιγράφει την παραγωγή  $\text{N}_2\text{O}$  μέσω της NN. Αρχικά, η αμμωνία οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη (πρώτη διεργασία) έπειτα η υδροξυλαμίνη οξειδώνεται σε NO(δεύτερη διεργασία) και έπειτα σε νιτρώδη(τρίτη διεργασία). Από το ένζυμο Nor ένα τμήμα του NO ανάγεται σε  $\text{N}_2\text{O}$  (τέταρτη διεργασία) . Η τελευταία διεργασία θεωρεί ότι η οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη γίνεται κατευθείαν και συνδυάζεται με την αναγωγή του NO σε  $\text{N}_2\text{O}$  . Η υδροξυλαμίνη είναι δότης ηλεκτρονίων αφού αποβάλλει 4 ηλεκτρόνια τα οποία καταναλώνονται από το NO ως τελικός δέκτης ηλεκτρονίων. Όλες οι διεργασίες καταναλώνουν οξυγόνο πλην τελευταίας.



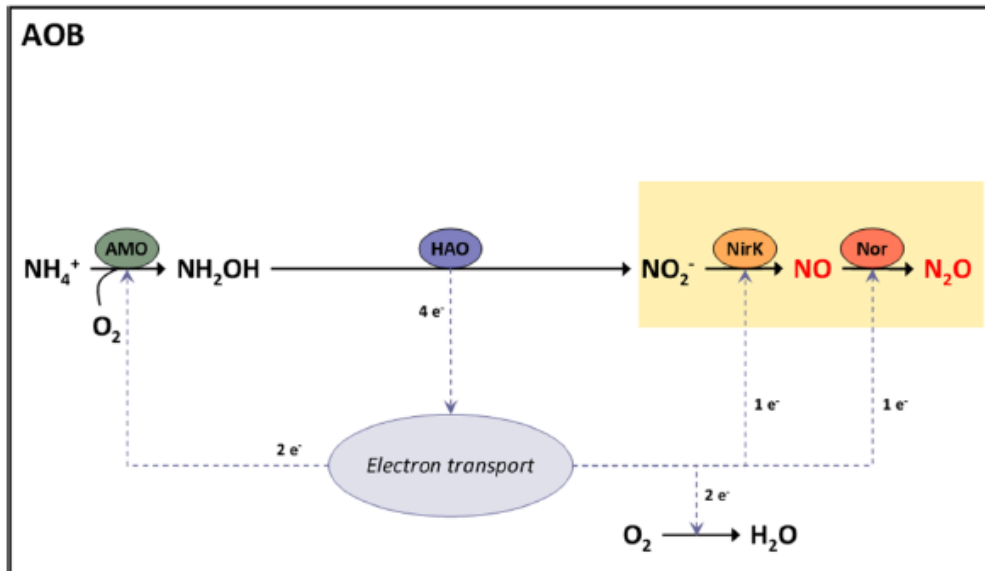
Πίνακας 2. 17: Στοιχειομετρία του μοντέλου νιτροποίησης των νιτροποιητών ( Rosquet 2015)

| Διεργασίες | $S_{O_2}$                                 | $S_{NH}$     | $S_{NH_2OH}$         | $S_{NO_2}$ | $S_{NO}$            | $S_{N_2O}$ | $X_{AOB}$ |
|------------|---|--------------|----------------------|------------|---------------------|------------|-----------|
| 1          | $-\frac{8}{7}$                            | -1           | 1                    |            |                     |            |           |
| 2          | $\frac{\frac{12}{7} - Y_{AOB}}{-Y_{AOB}}$ | $-i_{N,AOB}$ | $-\frac{1}{Y_{AOB}}$ |            | $\frac{1}{Y_{AOB}}$ |            | 1         |
| 3          | $-\frac{4}{7}$                            |              |                      | 1          | -1                  |            |           |
| 4          |   |              | -1                   | 1          | -4                  | 4          |           |

Πίνακας 2. 18: Κινητικές εξισώσεις μοντέλου νιτροποίησης των νιτροποιητών ( Rosquet 2015)

| Διεργασίες | Κινητικές εξισώσεις   |
|------------|---|
| 1          | $\mu_{AOB,AMO} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,1}} \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4,AOB}} * X_{AOB}$              |
| 2          | $\mu_{AOB,HAO,1} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,2}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * X_{AOB}$      |
| 3          | $\mu_{AOB,HAO,2} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,2}} \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO,AOB}} * X_{AOB}$                  |
| 4          | $n_{AOB} * \mu_{AOB,HAO,1} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO,AOB}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * X_{AOB}$ |

Απονιτροποίηση των νιτροποιητών



Σχήμα 2. 10: Αναπαράσταση του μοντέλου απονιτροποίηση των νιτροποιητών (Rocquet, 2015)

Σε αυτό το μοντέλο αρχικά γίνεται η οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη όπως αναφέρθηκε πιο πάνω. Η υδροξυλαμίνη οξειδώνεται σε νιτρώδη με τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων το οξυγόνο. Η ανάπτυξη των AOB λαμβάνεται υπόψη σε αυτό το μοντέλου. Τα νιτρώδη μετατρέπονται σε NO με το ένζυμο NirK και τελικά με το ένζυμο Nor το NO ανάγεται σε  $N_2O$ .

Πίνακας 2. 19: Στοιχειομετρία του μοντέλου απονιτροποίηση των νιτροποιητών ( Rocquet 2015)

| Διεργασίες | $S_{O_2}$                                 | $S_{NH}$     | $S_{NH_2OH}$         | $S_{NO_2}$          | $S_{NO}$ | $S_{N_2O}$ | $X_{AOB}$ |
|------------|---|--------------|----------------------|---------------------|----------|------------|-----------|
| 1          | $-\frac{8}{7}$                            | -1           | 1                    |                     |          |            |           |
| 2          | $-\frac{16}{7} - \frac{Y_{AOB}}{Y_{AOB}}$ | $-i_{N,AOB}$ | $-\frac{1}{Y_{AOB}}$ | $\frac{1}{Y_{AOB}}$ |          |            | 1         |
| 3          |   |              | -1                   | -3                  | 4        |            |           |
| 4          |   |              | -1                   | 1                   | -4       | 4          |           |

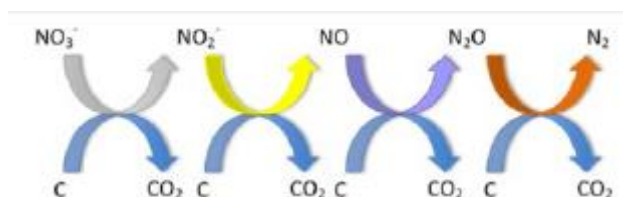
Πίνακας 2. 20: Κινητικές εξισώσεις μοντέλου απονιτροποίηση των νιτροποιητών ( Rocquet 2015)

| Διεργασίες | Κινητικές εξισώσεις   |
|------------|---|
| 1          | $\mu_{AOB,AMO} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,1}} \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4,AOB}} * X_{AOB}$  |
| 2          | $\mu_{AOB,HAO} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,2}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * X_{AOB}$  |
| 3          | $n_{AOB} * \mu_{AOB,HAO} * \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} \frac{S_{NO_2}}{S_{NO_2} + K_{NO_2,AOB}} * \frac{K_{I,O_2,AOB}}{K_{I,O_2,AOB} + S_{O_2}} X_{AOB}$ |
| 4          | $n_{AOB} * \mu_{AOB,HAO} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO,AOB}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * \frac{K_{I,O_2,AOB}}{K_{I,O_2,AOB} + S_{O_2}} * X_{AOB}$     |

#### Απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών

Υπάρχουν δύο μοντέλα που αφορούν την απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

Το μοντέλο ενεργού ιλύος για Άζωτο (ASMN) (Pan et al,2015), όπου οι διαδικασίες οξείδωσης του άνθρακα καθώς και της αναγωγής του αζώτου είναι άμεσα συνδεδεμένες (Σχήμα 2.11). Τα τέσσερα βήματα του μοντέλου που αναφέρονται προηγουμένως είναι ανεξάρτητα και διαφορετικά μεταξύ τους .

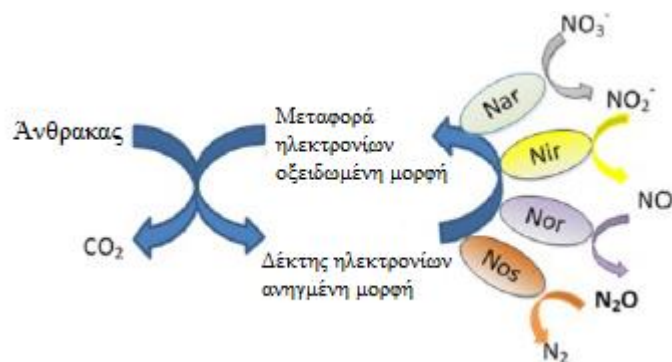


Σχήμα 2. 11: Μοντέλο ASMN (Pan et al 2015)

Ο ρόλος της οξείδωσης του αζώτου έχει δύο πτυχές. Πρώτη είναι ότι οι σχέσεις μεταξύ των σταθερών, για τη πηγή του άνθρακα μπορεί να είναι διαφορετικές, και δεύτερον ότι η οξείδωση του άνθρακα είναι το άθροισμα των τεσσάρων βημάτων απονιτροποίησης. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο θεωρεί πως ο άνθρακας πάντα θα ικανοποιεί τις ανάγκες

του μοντέλου σε ηλεκτρόνια πράγμα που ίσως να μην ισχύει και κάποια βήματα να είχαν διαφορετικά αποτελέσματα.

Το μοντέλο ενεργού ιλύος για την έμμεση σύνδεση των ηλεκτρονίων ASM-ICE που προτάθηκε από τους Pan et al, (2013) εκφράζει ότι οι διαδικασίες οξείδωσης του άνθρακα καθώς και της αναγωγής του αζώτου είναι έμμεσα συνδεδεμένες (Σχήμα 2.12). Στο μοντέλο εισάγεται ένας νέος δέκτης ηλεκτρονίων που να συνδέει το άζωτο με τον άνθρακα έτσι ώστε κάθε βήμα της απονιτροποίησης να εξαρτάται και από το άζωτο και από τον άνθρακα.



Σχήμα 2. 12: Μοντέλο ASM-ICE (Pan et al, 2015 )

Οι δέκτες ηλεκτρονίων, τα  $Mox$ , οξειδώνονται από τους μεταφορείς ηλεκτρονίων  $Mred$  όπως φαίνεται στη παρακάτω εξίσωση ( $Mred \rightleftharpoons Mox + 2e^- + 2H^+$ ). Αυτή η διεργασία μεταξύ των  $Mox$  και  $Mred$  πραγματοποιήθηκε θέτοντας σταθερές τιμές στο άθροισμα των συγκεντρώσεων των δύο. Η διαφορετικές τιμές για τις τέσσερις συγγενικές σταθερές των 4 βημάτων απονιτροποίησης επηρεάζουν την αναγωγή του αζώτου ενώ ο άνθρακας δεν αποτελεί περιοριστικός παράγοντας.

Ολοκληρώνοντας παρουσιάζεται η στοιχειομετρία και οι κινητικές εξισώσεις των δύο μοντέλων (Πίνακας 2.20-2.21).

Πίνακας 2. 21: Στοιχειομετρία και οι κινητικές εξισώσεις ASMN(Pan et al, 2015)

| Διεργασίες | Συστατικά Μοντέλου ASMN |           |          |           |          |                               |   | Εξισώσεις  |
|------------|-------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-------------------------------|---|--|
|            | $S_{NO3}$               | $S_{NO2}$ | $S_{NO}$ | $S_{N2O}$ | $S_{N2}$ | $S_S$                         | X |  |
| R1         | -A                      | +A        |          |           |          | $\frac{1}{Y_H * \eta_\gamma}$ | 1 | $\mu_H * n_{g1} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_{S1}}\right) * \left(\frac{S_{NO3}}{S_{NO3} + K_{NO3}^{HB}}\right)$   |
| R2         |                         | -B        | +B       |           |          | $\frac{1}{Y_H * \eta_\gamma}$ | 1 | $\mu_H * n_{g2} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_{S2}}\right) * \left(\frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}^{HB}}\right) * \left(\frac{K_{NO,2}}{S_{NO} + K_{NO,2}}\right)$ |
| R3         |                         |           | -B       | +B        |          | $\frac{1}{Y_H * \eta_\gamma}$ | 1 | $\mu_H * n_{g3} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_{S3}}\right) * \left(\frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO}^{HB} + S_{NO}^2/K_{NO3}}\right)$                                   |
| R4         |                         |           |          | -B        | +B       | $\frac{1}{Y_H * \eta_\gamma}$ | 1 | $\mu_H * n_{g4} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_{S4}}\right) * \left(\frac{S_{N2O}}{S_{N2O} + K_{N2O}^{HB}}\right) * \left(\frac{K_{NO,4}}{S_{NO} + K_{NO,4}}\right)$ |

$$A = \frac{1 - Y_H * n_\gamma}{1.143 Y_H * n_\gamma} \quad B = \frac{1 - Y_H * n_\gamma}{0.571 * Y_H * n_\gamma}$$

Πίνακας 2. 22: Στοιχειομετρία και οι κινητικές εξισώσεις ASM-ICE(Pan et al, 2015)

| Διεργασίες | Συστατικά Μοντέλου ASM-ICE |           |          |           |          |       |            |            |       | Εξισώσεις   |
|------------|----------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-------|------------|------------|-------|---|
|            | $S_{NO3}$                  | $S_{NO2}$ | $S_{NO}$ | $S_{N2O}$ | $S_{N2}$ | $S_S$ | $S_{Mox}$  | $S_{Mred}$ | X     |   |
| R1         |                            |           |          |           |          | -1    | $-(1-Y_H)$ | $1-Y_H$    | $Y_H$ | $r_{COD,max} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_S}\right) * \left(\frac{S_{Mox}}{S_{Mox} + K_{Mox}}\right)$                       |
| R2         | -1                         | 1         |          |           |          |       | 1          | -1         |       | $r_{NO3,max} * X * \left(\frac{S_{NO3}}{S_{NO3} + K_{NO3}^{HB}}\right) * \left(\frac{S_{Mred}}{S_{Mred} + K_{Mred,1}}\right)$ |
| R3         |                            | -1        | 1        |           |          |       | 0.5        | -0.5       |       | $r_{NO2,max} * X * \left(\frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}^{HB}}\right) * \left(\frac{S_{Mred}}{S_{Mred} + K_{Mred,2}}\right)$ |
| R4         |                            |           | -1       | 0.5       |          |       | 0.5        | -0.5       |       | $r_{NO,max} * X * \left(\frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO}^{HB}}\right) * \left(\frac{S_{Mred}}{S_{Mred} + K_{Mred,3}}\right)$     |
| R5         |                            |           |          | -1        | 1        |       | 1          | -1         |       | $r_{N2O,max} * X * \left(\frac{S_{N2O}}{S_{N2O} + K_{N2O}^{HB}}\right) * \left(\frac{S_{Mred}}{S_{Mred} + K_{Mred,4}}\right)$ |

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

## 3.1 Εισαγωγή

Η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων είναι από μόνη της ένα ανεξάρτητο ολοκληρωμένο σύστημα. Περιλαμβάνει μονάδες πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης, βιολογικούς αντιδραστήρες, παχυντές, αναερόβιους χωνευτές, συστήματα αφυδάτωσης και άλλες υπο-διαδικασίες που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και δεν λειτουργούν ως ξεχωριστές μονάδες αλλά σαν ενιαίο σύνολο.

Στην περίπτωση που το σύστημα δεν ελεγχόταν και θεωρείτο ως ενιαίο στην εγκατάσταση δεν θα υπήρχε η δυνατότητα να υπάρξει η βέλτιστη ποιότητα εκροής καθώς και η ελάχιστη χρήση ενέργειας.(Σαραντόπουλος 2015)

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μία ευρύτατη τροποποίηση του βασικού μοντέλου ASM1 της IWA έτσι ώστε να περιγράφουν αναλυτικά οι διεργασίες που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή υποξειδίου του αζώτου κατά την βιολογική επεξεργασία των λυμάτων. Το μοντέλο αυτό ενσωματώθηκε σε ένα υπάρχον ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων της Koumaki et al (2017) και Σαραντόπουλου (2015) που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας . Μάλιστα ο υπολογισμός των εκπομπών  $N_2O$  άρχισε να ερευνάται την τελευταία πενταετία ,προηγουμένως υπολογιζόταν εμπειρικά θεωρώντας ένα ποσοστό του ολικού αζώτου μεταξύ 0.5-3% για τα αστικά λύματα.

Εκτός από το ποσοστό των ρύπων  $N_2O$ , το μοντέλο αυτό συνδέεται με την ζήτηση οξυγόνου στο σύστημα, με τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και την ποιότητα εκροής της εγκατάστασης.

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά θα αναλυθούν τα νέα συστατικά του μοντέλου. Στη συνέχεια εξηγούνται λεπτομερώς οι διεργασίες που γίνονται στη βιολογική βαθμίδα, καθώς και στις άλλες μονάδες της εγκατάστασης. Τέλος γίνεται αναφορά στις διεργασίες κατανάλωσης ενέργειας καθώς και στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.

### 3.2 Συστατικά μοντέλου

Σύμφωνα με την ονοματολογία της IAWQ, τα συστατικά του μοντέλου χωρίζονται σε δύο είδη τα σωματιδιακά συμβολίζονται με το γράμμα X και τα διαλυτά που συμβολίζονται με το γράμμα S. Έπειτα από κάθε γράμμα ακολουθεί τουλάχιστον ακόμα ένα για να γίνεται ο προσδιορισμός του μοντέλου.

- Διαλυμένη οργανική ύλη  $S_I$

Ούτε καταναλώνεται ούτε παράγεται στο παρόν σύστημα. Με όποια συγκέντρωση μπαίνει στο σύστημα με την ίδια βγαίνει. Περιλαμβάνεται γιατί συμμετέχει στο COD της εκροής.

- Αδρανής Αιωρούμενη Οργανική Ύλη ( $X_I$ )

Σύμφωνα με τους ορισμούς που δόθηκαν για το συγκεκριμένο συστατικό θα έπρεπε να μην παράγεται να καταναλώνεται στο σύστημα. Για λόγους απλότητας όμως σε αυτό περιλαμβάνεται και τα σωματιδιακά προϊόντα λόγω φθοράς των μικροοργανισμών που αναφέρθηκαν σε προηγούμενα μοντέλα ως  $X_p$ .

- Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη ( $S_s$ )

Καταναλώνεται κατά την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών είτε σε αερόβιες είτε σε ανοξικές συνθήκες και κατά την απονιτροποίηση. Παράγεται κατά την υδρόλυση των οργανικών σε όλες τις συνθήκες (αερόβιες, ανοξικές, αναερόβιες) που βρίσκονται στη βιοκροκίδα.

- Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη ( $X_s$ )

Το κομμάτι αυτό της ύλης θεωρείται σωματιδιακό. Αποτελείται από σύνθετα μόρια και με αυτήν την σύσταση δεν μπορεί να εισέλθει στο κύτταρο. Μέσω εξωκυτταρικής δράσης μπορεί να μετατραπεί σε τροφή για τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς με τη διεργασία της υδρόλυσης. Παράγεται από τη φθορά της βιομάζας.

- Ετεροτροφική Βιομάζα ( $X_{BH}$ )

Η ετεροτροφική βιομάζα αναπτύσσεται με κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής. Η ανάπτυξη γίνεται κάτω από αερόβιες ή ανοξικές συνθήκες. Όπως



αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχει μια κυκλική διεργασία όπου με την αποσύνθεση της βιομάζας ένα ποσοστό ανακτάται ως αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη που οδηγεί στη δημιουργία ετεροτροφικής βιομάζας.

- Αμμωνιακά Οξειδωτικά Βακτήρια ( $X_{AOB}$ )

Τα αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια παράγεται κάτω από αερόβιες συνθήκες. Συγκεκριμένα κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου και καταναλώνεται λόγω αποσύνθεσης. Είναι απαραίτητα για να μετατραπεί η αμμωνία σε διοξείδιο του αζώτου.

- Νιτρικά Οξειδωτικά Βακτήρια ( $X_{NOB}$ )

Αποτελούν συνέχεια της αντίδρασης που γίνεται χάρις στα  $X_{AOB}$  καθώς μετατρέπουν το διοξείδιο του αζώτου σε νιτρικά όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Καταναλώνονται λόγω αποσύνθεσης

- Ανόργανη Σωματιδιακή Ύλη ( $X_{NV}$ )

Οι ανόργανες ενώσεις δεν συμμετέχουν σε καμία βιολογική διεργασία και απομακρύνονται από το σύστημα μέσω της περίσσειας ιλύος. Επομένως, συμπεριφέρονται όπως η αδρανής αιωρούμενη οργανική ύλη  $X_I$ .

- Διαλυμένο Οξυγόνο ( $S_O$ )

Εκφράζει την συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα λύματα. Η συγκέντρωση του επηρεάζει την ανάπτυξη οργανισμών.

- Υποξείδιο του Αζώτου ( $S_{N_2O}$ )

Μορφή αζώτου που δημιουργείται σύμφωνα με αυτό το μοντέλο μέσω τριών διαδικασιών και καταναλώνεται μέσω μιας. Καταναλώνεται μέσω της παραγωγής αέριου αζώτου. Παράγεται μέσω χημικής διάσπασης, το νιτροξύλιο μέσω αντίδρασης μετατρέπεται σε μονοξείδιο του αζώτου και έπειτα σε υποξείδιο του αζώτου. Από τη νιτροποίηση των νιτροποιητών η αμμωνία για να μετατραπεί σε νιτρώδη παράγει υποξείδιο του αζώτου. Τέλος, το μονοξείδιο του αζώτου μέσω της οδού της απονιτροποίησης των νιτροποιητών παράγει υποξείδιο του αζώτου.

- Αμμωνιακό Άζωτο ( $S_{NH}$ )

Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου είναι το άθροισμα της αμμωνίας  $NH_3$  και του αμμωνίου  $NH_4^+$ . Χρησιμοποιείται για παραγωγή βιομάζας παράγεται ελάχιστη κατά την υδρόλυση

- Μονοξειδίο του άζωτου ( $S_{NO}$ )

Παράγεται κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης καθώς και μέσω της αντίδρασης των νιτρώδη με το ένζυμο της νιτρώδους αναγωγάσεως. Καταναλώνεται με τους τρόπους που αναφέρθηκαν στο συστατικό του υποξειδίου του αζώτου.

- Νιτρώδη ( $S_{NO_2}$ )

Δημιουργείται λόγω της απονιτροποίησης, της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης και της οξείδωσης του μονοξειδίου του αζώτου. Καταναλώνεται λόγω της απονιτροποίησης των νιτροποιητών, της ανοξικής ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας και των νιτροποιητικών βακτηριδίων.

- Νιτρικά ( $S_{NO_3}$ )

Καταναλώνονται λόγω απονιτροποίησης και παράγονται από την ανάπτυξη των νιτροποιητικών βακτηριδίων.

- Υδροξυλαμίνη ( $S_{NH_2OH}$ )

Παράγεται λόγω της οξείδωσης της αμμωνίας. Καταναλώνεται λόγω της οξείδωσης του σε μονοξειδίο του αζώτου.

- Αέριο Άζωτο ( $S_{N_2}$ )

Παράγεται μέσω της αντίδρασης του υποξειδίου του αζώτου με το ένζυμο της αναγωγάσεως του υποξειδίου του αζώτου.

- Αλκαλικότητα ( $S_{ALK}$ )

Η αλκαλικότητα βοηθά ουσιαστικά στην αντίληψη των διακυμάνσεων του pH στο σύστημα .

- Φωσφορικά ( $S_{PO4}$ )

Παράγεται μέσω της αποσύνθεσης των βακτηρίων και των οργανισμών και καταναλώνεται για την ανάπτυξη τους.

- Διοξείδιο του άνθρακα ( $S_{CO2}$ )

Κατά την λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων υπάρχουν εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε αυτά περιλαμβάνονται και το υποξείδιο του αζώτου (Greenhouse Gas Emissions-GHG). Δημιουργούνται λόγω των βιολογικών διεργασιών σε αυτό το μοντέλο. Τα νιτρικά και τα αυτοτροφικά βακτήρια καταναλώνουν το διοξείδιο του άνθρακα.

- Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά (VSS)

Πρόκειται για το άθροισμα των οργανικών στερεών. Επειδή όμως οι συγκεντρώσεις των συστατικών εκφράζονται σε  $gr\ COD/m^3$  .Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι:  $COD/VSS=1,42\ gr\ COD/gr\ VSS$ . Δηλαδή θα έχουμε:

$$VSS=(X_I+X_S+X_{BH}+X_{AOB}+X_{NOB}) / 1,42 \quad (gr\ VSS/m^3)$$

- Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Τα ολικά αιωρούμενα στερεά είναι το άθροισμα των πτητικών και των ανόργανων στερεών. Δηλαδή:

$$TSS=VSS+X_{NV} \quad (gr\ SS/m^3)$$

Στη συνέχεια, ακολουθεί πίνακας που εμφανίζει όλα τα συστατικά του μοντέλου που αναλύθηκαν πιο πάνω.

Πίνακας 3.1: Συστατικά του μοντέλου προσομοίωσης

| Συστατικά    | Ερμηνεία                          |
|--------------|-----------------------------------|
| $S_I$        | Αδρανής Διαλυμένη Οργανική Ύλη    |
| $X_I$        | Αδρανής Αιωρούμενη Οργανική Ύλη   |
| $S_S$        | Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη |
| $X_S$        | Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη   |
| $X_{BH}$     | Ετεροτροφική Βιομάζα              |
| $X_{AOB}$    | Αμμωνιακά Οξειδωτικά Βακτήρια     |
| $X_{NOB}$    | Νιτρικά Οξειδωτικά Βακτήρια       |
| $X_{NV}$     | Ανόργανη Σωματιδιακή Ύλη          |
| $S_O$        | Διαλυμένο Οξυγόνο                 |
| $S_{N_2O}$   | Υποξείδιο του Αζώτου              |
| $S_{NH}$     | Αμμωνιακό Άζωτο                   |
| $S_{NO}$     | Μονοξείδιο του αζώτου             |
| $S_{NO_2}$   | Νιτρώδη                           |
| $S_{NO_3}$   | Νιτρικά                           |
| $S_{NH_2OH}$ | Υδροξυλαμίνη                      |
| $S_{N_2}$    | Αέριο Άζωτο                       |
| $S_{ALK}$    | Αλκαλικότητα                      |
| $S_{CO_2}$   | Διοξείδιο του άνθρακα             |
| $S_{PO_4}$   | Φωσφορικά                         |

### 3.3 Μαθηματική προσομοίωση του βιολογικού αντιδραστήρα

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες προσομοίωσης της λειτουργίας του βιολογικού αντιδραστήρα υλοποιήθηκε ένα μοντέλο ενεργού ιλύος, το οποίο στηρίζεται στο ASM1.

Το μοντέλο αναπτύχθηκε βάσει των διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον αντιδραστήρα, χωρίς όμως να γίνεται φλύαρο με πολλές διεργασίες. Ο λόγος που χρησιμοποιείται είναι για να υπάρχει ευκολία στη διαχείριση και στη σύνθεση του μοντέλου. Για αυτό τον λόγο περιλαμβάνονται μόνο οι απαραίτητες διεργασίες οι οποίες είναι απλές και εύχρηστες .

Η μαθηματική προσομοίωση του μοντέλου περιλαμβάνει :

- Τις διεργασίες του μοντέλου που αφορούν την υδρόλυση, την ετεροτροφική βιομάζα, τον κύκλο του αζώτου καθώς και τους AOB και NOB μικροοργανισμούς.
- Τις στοιχειομετρικές παραμέτρους
- Την επίδραση της θερμοκρασίας
- Τις απαιτήσεις οξυγόνου στο σύστημα

### 3.3.2 Διεργασίες μοντέλου

Οι διεργασίες που περιγράφονται στο μοντέλο είναι οι ακόλουθες:

#### Αερόβια Υδρόλυση

Κατά την αερόβια υδρόλυση, μέσω εξωκυτταρικής δράσης η αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη μπορεί να μετατραπεί σε εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη, τροφή για τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Λόγω της υδρόλυσης απελευθερώνεται ένα μικρό ποσοστό αμμωνίας. Ο ρυθμός της αερόβιας υδρόλυσης δίνεται από τη πιο κάτω σχέση:

$$\rho_1 = k_h * \frac{S_O}{S_O + K_{OH}} * \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$$

Όπως παρατηρούμε σε αυτή την εξίσωση είναι ότι οι περιοριστικοί παράγοντες είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου καθώς και ο λόγος της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης .

#### Ανοξική Υδρόλυση

Όπως και στην αερόβια, στην ανοξική υδρόλυση έχουμε ακριβώς τους ίδιους μηχανισμούς. Η διεργασία γίνεται σε ανοξικές συνθήκες και με πιο αργό ρυθμό για αυτό το λόγο υπάρχουν οι συντελεστές  $n_{NO3H}$  και  $n_{NO2H}$  , με την παρουσία νιτρικών στη μια περίπτωση και στην άλλη με νιτρώδη. Ο ρυθμός της ανοξικής υδρόλυσης δίνεται από τη πιο κάτω σχέση:

$$\rho_2 = k_h * n_{NO3H} * \frac{K_{OH}}{S_O + K_{OH}} * \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} * \frac{S_{NO3}}{S_{NO3} + K_{NO3}} * X_{BH}$$

$$\rho_3 = k_h * n_{NO2H} * \frac{K_{OH}}{S_O + K_{OH}} * \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} * \frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}} * X_{BH}$$

Όπως παρατηρούμε σε αυτή την εξίσωση οι περιοριστικοί παράγοντες είναι η έλλειψη συγκέντρωσης του οξυγόνου καθώς και ο λόγος της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης . Στην πρώτη περίπτωση όπως αναφέρθηκε περιοριστικός παράγοντας είναι η παρουσία νιτρικών και στη δεύτερη τα νιτρώδη.

### Αναερόβια υδρόλυση

Όπως και στην αερόβια και στην ανοξική υδρόλυση στην αναερόβια έχουμε ακριβώς τους ίδιους μηχανισμούς απλώς η διεργασία γίνεται σε αναερόβιες συνθήκες και πολύ πιο αργούς ρυθμούς. Ο ρυθμός της ανοξικής υδρόλυσης δίνεται από τη πιο κάτω σχέση:

$$\rho_4 = k_h * n_{fe} * \frac{K_{OH}}{S_O + K_{OH}} * \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} * \frac{K_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2} + S_{NO3}} * X_{BH}$$

### Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών

Κατά την αερόβια ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, γίνεται κατανάλωση από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής κάνοντας χρήση και διαλυμένου οξυγόνου. Επίσης, καταναλώνεται και ποσότητα αμμωνιακού αζώτου και παράγεται διοξείδιο του άνθρακα. Ο ρυθμός της αερόβιας ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας δίνεται από την σχέση:

$$\rho_5 = \mu_h * \frac{S_O}{S_O + K_{OH}} * \frac{S_S}{S_S + K_S} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + K_{NH}} * \frac{S_{PO4}}{S_{PO4} + K_P} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * X_{BH}$$

Όπως παρατηρούμε από τη κινητική της αερόβιας ανάπτυξης των ετεροτροφικών εξαρτάται από την συγκέντρωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής, του διαλυμένου οξυγόνου, από τη συγκέντρωση αμμωνίας, φωσφόρου και την αλκαλικότητα και οποιοδήποτε μπορεί να αποτελεί περιοριστικό παράγοντα.

### Απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών

Κατά την απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, γίνεται κατανάλωση από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής η οποία γίνεται σε πιο αργούς ρυθμούς. Επίσης, καταναλώνεται και ποσότητα αμμωνιακού αζώτου και νιτρικά ενώ παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και νιτρικά. Ο

ρυθμός της απονιτροποίησης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών δίνεται από την σχέση:

$$\rho_6 = \mu_h * n_{NO3D} * \frac{K_{OH}}{S_O + K_{OH}} * \frac{S_{NO3}}{S_{NO3} + K_{NO3}} * \frac{S_S}{S_S + K_S} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + K_{NH}} * \frac{S_{PO4}}{S_{PO4} + K_P} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * X_{BH}$$

Όπως παρατηρούμε από την κινητική εξίσωση εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες με την προηγούμενη εξίσωση αλλά γίνεται σε ανοξικές συνθήκες και παρουσία νιτρικών.

#### Ανοξική Ανάπτυξη των Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών

Η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών όπως αναφέρθηκε προηγουμένως μπορεί να γίνει 3 διεργασίες.

Στη πρώτη διεργασία τα νιτρώδη μετατρέπονται σε μονοξείδιο του αζώτου με το ένζυμο της νιτρώδους αναγωγής. Στη δεύτερη διεργασία το μονοξείδιο του αζώτου μετατρέπεται σε υποξείδιο του αζώτου με το ένζυμο της νιτρικής οξειδοαναγωγής. Στην τρίτη διεργασία το υποξείδιο του αζώτου μετατρέπεται σε αέριο άζωτο με το ένζυμο της αναγωγής του υποξειδίου του αζώτου.

Για να γίνουν οι αντιδράσεις λόγω της ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών απαιτούνται φωσφορικά και αμμωνία και παράγεται διοξείδιο του άνθρακα. Οι ρυθμοί των αντιδράσεων δίνονται στις πιο κάτω σχέσεις:

$$\rho_7 = \mu_h * n_{G3} * \frac{K_{OH3}}{S_O + K_{OH3}} * \frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}} * \frac{S_S}{S_S + K_{S2}} * \frac{K_{I3NO}}{S_{NO} + K_{I3NO}} * X_{BH}$$

Όπως ήταν λογικό, περιοριστικός παράγοντας μπορεί να είναι η παρουσία οξυγόνου, η έλλειψη νιτρωδών και η βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη αντίθετα όσο αυξάνεται το μονοξείδιο του αζώτου τόσο πιο αργή γίνεται η διεργασία.



$$\rho_8 = \mu_h * n_{G4} * \frac{K_{OH4}}{S_O + K_{OH4}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOD} + \left(\frac{S_{NO}^2}{K_{I4NO}}\right)} * \frac{S_S}{S_S + K_{S4}} * X_{BH}$$

Όπως φαίνεται περιοριστικός παράγοντας πλην του οξυγόνου και της έλλειψης βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης είναι και η απουσία νιτρικού οξειδίου.

$$\rho_9 = \mu_h * n_{G5} * \frac{K_{OH5}}{S_O + K_{OH5}} * \frac{S_{N2O}}{S_{N2O} + K_{N2O}} * \frac{S_S}{S_S + K_{S5}} * \frac{K_{I5NO}}{S_{NO} + K_{I5NO}} * X_{BH}$$

Παρατηρούνται οι ίδιοι περίπου περιοριστικοί παράγοντες με τη διεργασία  $\rho_6$  με τη διαφορά ότι αυτή η διεργασία απαιτεί υποξείδιο του αζώτου για να πραγματοποιηθεί σε αντίθεση με τη προηγούμενη που απαιτεί νιτρώδη.

#### Αποσύνθεση ετεροτροφικής βιομάζας

Όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής των ετεροτροφικών μικροοργανισμών μειώνεται η καθαρή παραγωγή ιλύος. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται σε πολλούς μηχανισμούς, όπως η λύση ή η ανάγκη των μικροοργανισμών για συντηρούμενη ενέργεια. Η αποσύνθεση προσομοιώνεται για λόγους απλότητας με ένα σταθερό ρυθμό φθοράς  $b_H$  που δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες περιβάλλοντος.

Η αποσύνθεση της βιομάζας έχει σαν αποτέλεσμα την μετατροπή της σε αργά βιοδιασπάσιμη τροφή  $X_S$  και σε αδρανή σωματιδιακά προϊόντα  $X_I$ , ενώ εκλύεται αμμωνία και φωσφορικά.

$$\rho_{10} = b_h * X_{BH}$$

#### Οξείδωση αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη

Είναι το πρώτο βήμα της βιολογικής απομάκρυνσης αζώτου. Η αμμωνία οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη με τη βοήθεια του ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση (AMO). Ο ρυθμός της αντίδρασης φαίνεται πιο κάτω:

$$\rho_{11} = q_{AOBAMO} * \frac{S_O}{S_O + K_{OHAOB1}} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + K_{NHAOB}} * X_{AOB}$$

#### Οξείδωση υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου

Η υδροξυλαμίνη οξειδώνεται σε μονοξείδιο του αζώτου από το περιπλασματικό ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης (HAO). Γίνεται κατανάλωση αμμωνίας και φωσφόρου και παράγονται αυτοτροφικά οξειδωτικά βακτήρια. Επίσης, καταναλώνεται διοξείδιο του άνθρακα.

$$\rho_{12} = \mu_{AOBHAO} * \frac{S_O}{S_O + K_{OHAOB2}} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + 10^{-12}} * X_{AOB}$$

#### Οξείδωση μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη

Το μονοξείδιο του αζώτου οξειδώνεται σε νιτρώδη με το ίδιο ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης. Η διεργασία φαίνεται πιο κάτω:

$$\rho_{13} = q_{AOBHAO} * \frac{S_O}{S_O + K_{OHAOB2}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOAOBHAO}} * X_{AOB}$$

#### Αναγωγή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου

Το μονοξείδιο του αζώτου μπορεί να μετατραπεί σε υποξείδιο του αζώτου μέσω της νιτρικής οξειδοαναγωγάσης (Nor). Η διεργασία ονομάζεται 'NN' (νιτροποίηση των νιτροποιητών).

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

### Αναγωγή των νιτρικών σε υποξείδιο του αζώτου

Αρχικά τα νιτρικά αναγάγονται σε NO μέσω του ενζύμου της νιτρικής αναγωγάσης (NirK) και ακολούθως αναγάγονται σε  $N_2O$  μέσω νιτρικής οξειδοαναγωγάσης.

$$fS_O = \frac{S_O}{\left[ K_{OHAOBN_2O} + \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{K_{OHAOBN_2O}}{K_{IOHAOBN_2O}}} \right) \right]} \cdot S_O \cdot \frac{S_O^2}{K_{IOHAOBN_2O}}$$
$$S_{HNO_2} = \frac{S_{NO_2}}{K_a(10^{pH}) + 1} * \frac{47}{14}$$
$$K_a = \exp\left(-\frac{2300}{273 + t}\right)$$

$$\rho_{15} = q_{AOBN_2OND} * \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OHAOB}} * \frac{S_{HNO_2}}{S_{HNO_2} + K_{HNO_2AOB}} * fS_O * X_{AOB}$$

- **Αερόβια ανάπτυξη των Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτηριδίων**

Για να αναπτυχθεί οποιοσδήποτε μικροοργανισμός απαιτείται οξυγόνο, αμμωνία και φωσφορικά. Επιπλέον, για την ανάπτυξη των NOB γίνεται κατανάλωση διοξειδίου του άνθρακα και τα νιτρικά μετατρέπονται σε νιτρικά.

$$\rho_{16} = \mu_{NOB} * \frac{S_O}{S_O + K_{OHNOB}} * \frac{S_{NO_2}}{S_{NO_2} + K_{NO_2NOB}} * \frac{S_{PO_4}}{S_{PO_4} + K_P} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * X_{NOB}$$

- **Αποσύνθεση Νιτρικών και Αυτοτροφικών Βακτηριδίων**

Ακολουθείται η ίδια διεργασία με την αποσύνθεση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

$$\rho_{17} = X_{AOB} * b_{AOB}$$
$$\rho_{18} = X_{NOB} * b_{NOB}$$

### 3.3.3 Περιγραφή βασικών εξισώσεων του μοντέλου

Πιο κάτω θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι αλλαγές στο βιολογικό αντιδραστήρα για κάθε συστατικό του μοντέλου σε κάθε K διαμέρισμα.

#### Αδρανής Διαλυμένη Οργανική Ύλη ( $S_I$ )

Το κομμάτι αυτό της ύλης δεν συμμετέχει σε καμία βιολογική διεργασία. Παραμένει σταθερό και κατά την υδρόλυση δεν παράγεται καθόλου αδρανής διαλυμένη οργανική ύλη.

$$DS_I(k) = \left( (Q(k-1) * S_I(k-1) - Q(k) * S_I(k)) + fS_i * V_k * (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) \right) * dt/V(k)$$
$$fS_i = 0.0$$

η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_I(t + dt, k) = S_I(t, k) + DS_I(k)$$

#### Εύκολα Βιοδιασπáσιμη Οργανική Ύλη ( $S_S$ )

Η εύκολα βιοδιασπáσιμη οργανική ύλη απομακρύνεται από το σύστημα μέσω της αερόβιας και της ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικής βιομάζας, ενώ παράγεται μέσω της υδρόλυσης της αργά βιοδιασπáσιμης οργανικής ύλης. Η μεταβολή της συγκέντρωσης του SS δίνεται από την σχέση:

$$DS_S(k) = \left( (Q(k-1) * S_S(k-1) - Q(k) * S_S(k)) + ((1 - fS_i) * V_k * (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) - \frac{1}{Y_H} * V_k * \rho_5 - \frac{1}{Y_H * n_g} * V_k (\rho_6 + \rho_7 + \rho_8 + \rho_9)) \right) * dt/V(k)$$

η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_S(t + dt, k) = S_S(t, k) + DS_S(k)$$

#### Αδρανής Αιωρούμενη Οργανική Ύλη ( $X_I$ )

Πρόκειται για ένα ακόμη κομμάτι της ύλης που δεν συμμετέχει σε καμία βιολογική διεργασία αλλά για λόγους ευκολίας σε αυτό το σύστημα εντάσσονται σε αυτή τα προϊόντα της αποσύνθεσης. Η μεταβολή στην συγκέντρωση του συστατικού δίνεται από την σχέση:

$$DX_I(k) = \left( (Q(k-1) * X_I(k-1) - Q(k) * X_I(k)) + (f_p) * V_k * (\rho_{10} + \rho_{17} + \rho_{18}) \right) * dt/V(k)$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$X_I(t + dt, k) = X_I(t, k) + DX_I(k)$$

#### Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη ( $X_S$ )

Η συγκέντρωση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης αυξάνεται μέσω της αποσύνθεσης της βιομάζας, ενώ μειώνεται λόγω της υδρόλυσης. Η σχέση από την οποία δίνεται είναι η εξής:

$$DX_S(k) = \left( (Q(k-1) * X_S(k-1) - Q(k) * X_S(k)) - 1 * V_k * (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) + f_p * V_k * (\rho_{10} + \rho_{17} + \rho_{18}) \right) * dt/V(k)$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$X_S(t + dt, k) = X_S(t, k) + DX_S(k)$$

#### Ετεροτροφική Βιομάζα ( $X_{BH}$ )

Η ετεροτροφική βιομάζα παράγεται κατά την αερόβια ή ανοξική συνθήκες, ενώ η συγκέντρωσή της μειώνεται μέσω της αποσύνθεσης. Η μεταβολή της συγκέντρωσης δίνεται από την σχέση:

$$DX_{BH}(k) = \left( (Q(k-1) * X_{BH}(k-1) - Q(k) * X_{BH}(k)) + V_k * (\rho_5 + \rho_6 + \rho_7 + \rho_8 + \rho_9 - \rho_{10}) \right) * dt/V(k)$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$X_{BH}(t + dt, k) = X_{BH}(t, k) + DX_{BH}(k)$$

### Αυτοτροφικά Οξειδωτικά Βακτήρια ( $X_{AOB}$ )

Τα αυτοτροφικά οξειδωτικά βακτήρια αναπτύσσονται κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου υπό αερόβιες συνθήκες και καταστρέφονται μέσω της αποσύνθεσης. Η εξίσωση μεταβολής τους είναι:

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

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$X_{AOB}(t + dt, k) = X_{AOB}(t, k) + DX_{AOB}(k)$$

### Νιτρικά Οξειδωτικά Βακτήρια ( $X_{BH}$ )

Τα νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια παράγονται σε αερόβιες συνθήκες ή ανοξική ανάπτυξη της βιομάζας, ενώ η συγκέντρωσή της μειώνεται μέσω της αποσύνθεσης. Η μεταβολή της συγκέντρωσης δίνεται από την σχέση:

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

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$X_{NOB}(t + dt, k) = X_{NOB}(t, k) + DX_{NOB}(k)$$

### Ανόργανη Σωματιδιακή Ύλη ( $X_{NV}$ )

Ένα ακόμη κομμάτι της ύλης που δεν συμμετέχει σε καμία βιολογική διεργασία. Συνεπώς, η μεταβολή στην συγκέντρωσή του δίνεται από την εξίσωση:

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

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$X_{NV}(t + dt, k) = X_{NV}(t, k) + DX_{NV}(k)$$

### Διαλυμένο Οξυγόνο ( $S_O$ )

Η κατανάλωση οξυγόνου συνδέεται με τις διεργασίες της αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικής, βακτηρίων και όλες τις διεργασίες οξείδωσης. Η εξίσωση μεταβολής της συγκέντρωσης του δίνεται από την σχέση:

$$DS_O(k) = \left( (Q(k-1) * S_O(k-1) - Q(k) * S_O(k)) - \left( \frac{1 - Y_H}{Y_H} \right) V_k * (\rho_5) - \frac{8}{7} * V_k * (\rho_{11}) - \left( \frac{\frac{12}{7} - Y_{AOB}}{Y_{AOB}} \right) V_k * (\rho_{12}) - \frac{4}{7} * V_k * (\rho_{13}) - \left( \frac{\frac{8}{7} - Y_{NOB}}{Y_{NOB}} \right) * V_k * (\rho_{16}) \right) * dt/V(k)$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_O(t + dt, k) = S_O(t, k) + DS_O(k)$$

Ο όρος  $8/7$ ,  $12/7$  και  $4/7$  είναι η θεωρητική απαίτηση οξυγόνου για την οξείδωση κάθε ουσίας σε κάθε αντίδραση. Τα επίπεδα της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου μπορούν να οριστούν από το σύστημα για κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα.

### Υποξείδιο του Αζώτου ( $S_{N2O}$ )

Το Υποξείδιο του Αζώτου καταναλώνεται μέσω της παραγωγής αέριου αζώτου. Παράγεται μέσω χημικής διάσπασης, το νιτροξύλιο μέσω αντίδρασης μετατρέπεται σε μονοξείδιο του αζώτου και έπειτα σε υποξείδιο του αζώτου. Από τη νιτροποίηση των νιτροποιητών η αμμωνία για να μετατραπεί σε νιτρώδη παράγει υποξείδιο του αζώτου. Τέλος, το μονοξείδιο του αζώτου μέσω της οδού της απονιτροποίησης των νιτροποιητών παράγει υποξείδιο του αζώτου. Σύμφωνα με τους (Baeza et al, 2017) υπάρχει μια ογκομετρική μάζα του υποξειδίου του αζώτου που μεταδίδεται από το νερό στον αέρα με αποτέλεσμα να υπάρχει μείωση της συγκέντρωσης του υποξειδίου του Αζώτου σε αεριζόμενες δεξαμενές.

Η εξίσωση μεταβολής της συγκέντρωσης είναι:

$$DS_{N2O}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{N2O}(k-1) - Q(k) * S_{N2O}(k)) + \left( \frac{1 - Y_H * n_g}{Y_H * n_g * \frac{4}{7}} \right) V_k * (\rho_8 - \rho_9) + 4 * V_k * (\rho_{14}) + 2 * V_k * (\rho_{15}) \right) * \frac{dt}{V(k)} - 0.91 * KLA(K) * S_{N2O} * N2OSE * dt$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_{N2O}(t + dt, k) = S_{N2O}(t, k) + DS_{N2O}(k)$$

### Μονοξείδιο του αζώτου $S_{NO}$

Παράγεται κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης καθώς και μέσω της αντίδρασης των νιτρώδη με το ένζυμο της νιτρώδους αναγωγάσεως. Καταναλώνεται μέσω χημικής διάσπασης, το νιτροξυλίο μέσω αντίδρασης μετατρέπεται σε μονοξείδιο του αζώτου και έπειτα σε υποξείδιο του αζώτου. Από τη νιτροποίηση των νιτροποιητών η αμμωνία για να μετατραπεί σε νιτρώδη παράγει υποξείδιο του αζώτου. Τέλος, το μονοξείδιο του αζώτου μέσω της οδού της απονιτροποίησης των νιτροποιητών παράγει υποξείδιο του αζώτου.

$$DS_{NO}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{NO}(k-1) - Q(k) * S_{NO}(k)) + \left( \frac{1 - Y_H * n_g}{Y_H * n_g * \frac{4}{7}} \right) * V_k * (\rho_7 - \rho_8) + \frac{1}{Y_{AOB}} * V_k * (\rho_{12}) - 4 * V_k * (\rho_{14}) - V_k * (\rho_{13}) \right) * \frac{dt}{V(k)}$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_{NO}(t + dt, k) = S_{NO}(t, k) + DS_{NO}(k)$$

### Νιτρώδη $S_{NO2}$

Δημιουργείται λόγω της απονιτροποίησης, της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης και της οξείδωσης του μονοξειδίου του αζώτου. Καταναλώνεται λόγω της απονιτροποίησης των νιτροποιητών, της ανοξικής ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας και των



νιτροποιητικών βακτηριδίων.

$$DS_{NO_2}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{NO_2}(k-1) - Q(k) * S_{NO_2}(k)) + \left( \frac{1 - Y_H * n_g}{Y_H * n_g * \frac{8}{7}} \right) * V_k * (\rho_6 - 2 * \rho_7) + V_k * (\rho_{13} + \rho_{14} - \rho_{15}) - \frac{1}{Y_{NOB}} * \rho_{16} * V_k \right) * \frac{dt}{V(k)}$$

### Νιτρικά ( $S_{NO_3}$ )

Καταναλώνεται λόγω της απονιτροποίησης και παράγεται κατά την ανάπτυξη των νιτροποιητικών βακτηρίων.

$$DS_{NO_3}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{NO_3}(k-1) - Q(k) * S_{NO_3}(k)) - \left( \frac{1 - Y_H * n_g}{Y_H * n_g * \frac{8}{7}} \right) * V_k * (\rho_6) + V_k * \frac{1}{Y_{NOB}} * \rho_{16} \right) * \frac{dt}{V(k)}$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_{NO_3}(t + dt, k) = S_{NO_3}(t, k) + DS_{NO_3}(k)$$

### Αμμωνία ( $S_{NH}$ )

Ένα μικρό ποσοστό της αμμωνίας δημιουργείται από την υδρόλυση και μέσω της αποσύνθεσης των οργανισμών απομακρύνεται από το σύστημα κατά την ανάπτυξη των οργανισμών καθώς και κατά την οξείδωση της για να γίνει παραγωγή υδροξυλαμίνης. Η μεταβολή της συγκέντρωσης δίνεται από την εξίσωση:

$$DS_{NH}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{NH}(k-1) - Q(k) * S_{NH}(k)) - (i_{NXS} - (1 - f_{SI}) * i_{NSF}) * V_k * (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) - i_{xb} * V_k * (\rho_5 + \rho_6 + \rho_7 + \rho_8 + \rho_9 + \rho_{12} + \rho_{16}) + (i_{xb} - i_{xp} * f_p) * V_k * (\rho_{10} + \rho_{17} + \rho_{18}) - \rho_{11} * V_k \right) * \frac{dt}{V(k)}$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_{NH}(t + dt, k) = S_{NH}(t, k) + DS_{NH}(k)$$

### Υδροξυλαμίνη ( $S_{NH_2OH}$ )

Η υδροξυλαμίνη δημιουργείται από την οξείδωση της αμμωνίας και καταναλώνεται κατά την οξείδωση του σε μονοξείδιο του αζώτου και κατά την οξείδωση του σε νιτρώδη. Η εξίσωση μεταβολής της υδροξυλαμίνης είναι:

$$DS_{NH_2OH}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{NH_2OH}(k-1) - Q(k) * S_{NH_2OH}(k)) + (i_{NXS} - (1 - f_{SI}) * i_{NSF}) * V_k * (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) \right. \\ \left. - i_{xb} * V_k * (\rho_5 + \rho_6 + \rho_7 + \rho_8 + \rho_9 + \rho_{12} + \rho_{16}) + (i_{xb} - i_{xp} * f_p) * V_k * (\rho_{10} + \rho_{17} + \rho_{18}) \right. \\ \left. - \rho_{11} * V_k \right) * \frac{dt}{V(k)}$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_{NH_2OH}(t + dt, k) = S_{NH_2OH}(t, k) + DS_{NH_2OH}(k)$$

### Αέριο Άζωτο ( $S_{N_2}$ )

Παράγεται όταν το υποξείδιο του αζώτου καταλύεται από το ένζυμο της αναγωγής του υποξειδίου του αζώτου ( $N_2OR$ ). Η εξίσωση της μεταβολής του Αέριου Αζώτου είναι:

$$DS_{N_2}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{N_2}(k-1) - Q(k) * S_{N_2}(k)) + \left( \frac{1 - Y_H * n_g}{Y_H * n_g * \frac{12}{7}} \right) * V_k * (\rho_9) \right) * \frac{dt}{V(k)}$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_{N_2}(t + dt, k) = S_{N_2}(t, k) + DS_{N_2}(k)$$

### Φωσφορικά ( $S_{PO_4}$ )

Δημιουργείται από την υδρόλυση και μέσω της αποσύνθεσης των οργανισμών. Απομακρύνεται από το σύστημα κατά την ανάπτυξη των οργανισμών καθώς και κατά την οξείδωση της για να γίνει παραγωγή υδροξυλαμίνης. Η μεταβολή της συγκέντρωσης δίνεται από την εξίσωση:

$$DS_{PO_4}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{PO_4}(k-1) - Q(k) * S_{PO_4}(k)) - (i_{PXS} - (1 - f_{SI}) * i_{PSF}) * V_k \right. \\ \left. * (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) - i_{xb} * V_k * (\rho_5 + \rho_6 + \rho_7 + \rho_8 + \rho_9 + \rho_{12} + \rho_{16}) \right. \\ \left. + (i_{PBM} - i_{pxi} * f_p) * V_k * (\rho_{10} + \rho_{17} + \rho_{18}) \right) * \frac{dt}{V(k)}$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_{PO_4}(t + dt, k) = S_{PO_4}(t, k) + DS_{PO_4}(k)$$

#### Αλκαλικότητα ( $S_{ALK}$ )

Η αλκαλικότητα μας παρέχει πληροφορίες για τον υπολογισμό του pH. Η εξίσωση μεταβολής της αλκαλικότητας είναι:

$$DS_{ALK}(k) = \left( (Q(k-1) * S_{PO_4}(k-1) - Q(k) * S_{PO_4}(k)) - \left( \frac{i_{XB}}{14} \right) * V_k * (\rho_5 + \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{13} + \rho_{14} + \rho_{15}) \right. \\ \left. + \left( \frac{1 - Y_H}{14 * 2.86 * Y_H} - \left( \frac{i_{XB}}{14} \right) \right) * V_k * (\rho_6 + \rho_7 + \rho_8 + \rho_9) \right) * \frac{dt}{V(k)}$$

ενώ η νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$S_{ALK}(t + dt, k) = S_{ALK}(t, k) + DS_{ALK}(k)$$

### 3.3.4 Παράμετροι του μαθηματικού ομοιώματος

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις στο μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιούνται ένας σημαντικός αριθμός στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων εισέρχεται βάσει των οποίων εξαρτάται η λειτουργικότητα τόσο των διεργασιών όσο και του μοντέλου. Έπειτα, γίνεται μια προσπάθεια επεξήγησης των παραμέτρων αυτών, όπως και οι τυπικές τιμές τους.

#### **α) Στοιχειομετρικές παράμετροι**

Ο συντελεστής απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας  $Y_H$  εκφράζει τη μάζα ετεροτροφικών μικροοργανισμών που αναπτύσσεται για κατανάλωση συγκεκριμένης μάζας βιοδιασπάσιμης ύλης. Η τιμή του  $Y_H$  που θα χρησιμοποιήσουμε είναι 0,60 gr δημιουργούμενου κυττάρου COD/gr οξειδωμένου COD.

Αντίστοιχα οι τιμές των συντελεστών απόδοσης της αυτοτροφικής και νιτρικής βιομάζας είναι κατά πολύ μικρότερες. Συγκεκριμένα, η τιμή του  $Y_{AOB}$  είναι 0.18 και του  $Y_{NOB}$  0.08 gr δημιουργούμενου κυττάρου COD/gr οξειδωμένου COD.

Ο συντελεστής  $f_P$  αντιπροσωπεύει το ποσοστό της βιομάζας που μετατρέπεται σε αδρανή σωματιδιακά προϊόντα κατά την διεργασία της αποσύνθεσης. Για το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρούμε ότι το  $f_P$  παίρνει την τιμή 0,08.

Η παράμετρος  $i_{XB}$  υποδηλώνει την μάζα αζώτου που υπάρχει ανά κύτταρο βιομάζας και παίρνει την τιμή 0,086 gr N/gr COD. Τα αδρανή στερεά περιέχουν μικρότερη ποσότητα αζώτου στα κύτταρά τους και για αυτό ο συντελεστής  $i_{XP}$  λαμβάνει την τιμή 0,01 gr N/gr COD.

Η παράμετρος  $i_{NXS}$  συμβολίζει την ποσότητα του αζώτου που εμπεριέχεται στο συστατικό της αργά βιοδιασπάσιμης ύλης και παίρνει την τιμή 0.04 gr N/gr COD. Η παράμετρος  $i_{NSF}$  φανερώνει την ποσότητα του αζώτου που εμπεριέχεται στο συστατικό της εύκολα βιοδιασπάσιμης ύλης και παίρνει την τιμή 0.03 gr N/gr COD. Η παράμετρος  $i_{NSI}$  φανερώνει την ποσότητα του αζώτου που εμπεριέχεται στο συστατικό της αδρανής διαλυμένης οργανικής ύλης και παίρνει την τιμή 0.01 gr N/gr COD.

Συνεχίζοντας με την αντίστοιχη ποσότητα του φωσφόρου που εμπεριέχονται στα ίδια συστατικά παρατηρούμε ότι είναι μικρότερη σε σχέση με το άζωτο αλλά ακόμη παραμένει σταθερή στη τιμή 0.01 gr P/gr COD για τις παραμέτρους  $i_{PXS}$ ,  $i_{PSF}$ ,  $i_{PSI}$ . Ακόμη, η παράμετρος που δείχνει την ποσότητα φωσφόρου στο συστατικό της αδρανής διαλυμένης οργανικής ύλης  $i_{PSI}$  είναι 0.0 .

Τέλος, για τα φωσφορικά ορίζεται η ποσότητα του φωσφόρου που εμπεριέχεται στη βιομάζα  $i_{PBM}$  που είναι της τάξης του 0.02 gr P/ gr COD.

Οι τελευταίες δύο στοιχειομετρικές παράμετροι που αναφέρονται στο μοντέλο είναι η παραγωγή αδρανής διαλυμένης οργανικής ύλης κατά την υδρόλυση  $f_{SI}$  η οποία είναι μηδενική και ο διορθωτικός συντελεστής για ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών  $n_g$  που είναι 1.0.

## **β) Κινητικές Παράμετροι**

Η παράμετρος  $\mu_H$  αποτελεί το μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης ετεροτροφικής βιομάζας. Στην τιμή του σημαντικό ρόλο παίζει η θερμοκρασία των λυμάτων, ενώ στους 20°C χρησιμοποιείται η τιμή  $6d^{-1}$ .

Ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης της ετεροτροφικής βιομάζας  $b_H$  επηρεάζεται μόνο από την θερμοκρασία των λυμάτων. Για θερμοκρασία 20°C ο συντελεστής  $b_H$  παίρνει την τιμή  $0,62d^{-1}$ .

Ο συντελεστής  $\mu_{AOBHAO}$  και ο συντελεστής  $\mu_{NOB}$  αντιπροσωπεύει το μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών και νιτροποιητικών οξειδωτικών βακτηριδίων. Και αυτοί οι συντελεστές εξαρτώνται από την θερμοκρασία των

λυμάτων και για τους 20°C χρησιμοποιείται η τιμή 0,78d<sup>-1</sup>.

Ο συντελεστής  $b_{\text{ΑΟΒΗΑΟ}}$  και ο συντελεστής  $b_{\text{ΝΟΒ}}$  συμβολίζει τον ειδικό ρυθμό αποσύνθεσης της αυτοτροφικής και νιτροποιητικών οξειδωτικών βακτηριδίων. Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε και στις δύο περιπτώσεις είναι 0,096d<sup>-1</sup>, όταν η θερμοκρασία των λυμάτων ισούται με 20°C.

Η παράμετρος  $K_H$  αντιπροσωπεύει το μέγιστο ειδικό ρυθμό που πραγματοποιείται η υδρόλυση. Επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Η τιμή που λαμβάνει είναι 0.3 gr αργά βιοδιασπάσιμου COD/gr COD.

Η παράμετρος  $K_S$  αντιπροσωπεύει τον συντελεστή κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας. Η τιμή του εξαρτάται από τη φύση των λυμάτων, ενώ επηρεάζεται και από την μορφή των βιοαντιδραστήρων. Η τιμή που λαμβάνει είναι 20 gr COD/m<sup>3</sup>.

Ο συντελεστής κορεσμού οξυγόνου  $K_{\text{O}_2}$  λειτουργεί ως «διακόπτης» στην προσομοίωση, αφού δεν επιτρέπει την αερόβια ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών όταν δεν υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο. Η τιμή που λαμβάνει είναι 0,2 gr O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

Ο συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου  $K_{\text{NH}}$ . Η τιμή που λαμβάνει είναι 0,05 gr Αμμωνιακού Αζώτου/m<sup>3</sup>.

Ο συντελεστής κορεσμού της υδρόλυσης της αργά βιοδιασπάσιμης ύλης  $K_x$ . Η τιμή που λαμβάνει είναι 0,03 gr αργά βιοδιασπάσιμου COD/gr COD.

Η διεργασία της υδρόλυσης χωρίζεται σε 3 στάδια την αερόβια την ανοξική και την αναερόβια. Η ανοξική γίνεται σε 2 βήματα. Αρχικά, από τα νιτρικά και έπειτα από τα νιτρώδη. Η ταχύτητα τους όμως είναι μικρότερη από την αερόβια και για αυτό μπαίνουν οι συντελεστές  $n_{\text{NO}_3\text{H}}$  και  $n_{\text{NO}_2\text{H}}$  με τιμή 0.6 αδιάστατο. Η ταχύτητα σε αναερόβιες συνθήκες είναι ακόμα μικρότερη και μπαίνει ο συντελεστής  $n_{\text{Fe}}$  με τιμή 0.4.

Όπως και στη περίπτωση του οξυγόνου και στα νιτρώδη και στα νιτρικά τοποθετείται ένας συντελεστής ‘αναστολής’ που δεν επιτρέπει να γίνονται οι διεργασίες αν δεν υπάρχει ικανοποιητική ποσότητα νιτρώδη ή νιτρικών αντίστοιχα. Οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές  $K_{\text{NO}_2}$  και  $K_{\text{NO}_3}$  είναι 0.5 gr NO<sub>2</sub>-N/m<sup>3</sup> και αντίστοιχα 0.5 gr NO<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup>.

Το ίδιο συμβαίνει και στη περίπτωση των φωσφορικών όπως και της αλκαλικότητας με πολύ χαμηλότερες τιμές. Για τα φωσφορικά 0.01 gr P/m<sup>3</sup> και για την

αλκαλικότητα  $0.082 \text{ gr CaCO}_3/\text{m}^3$ .

Χρησιμοποιούνται ακόμα μειωτικοί συντελεστές στην ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας σε ανοξικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, κατά τη διεργασία της απονιτροποίησης υπάρχει ο μειωτικός συντελεστής  $n_{\text{NO}_3\text{D}}$  με τιμή 0.8. Στη συνέχεια, έχουμε τον ανοξικό μειωτικό συντελεστή  $n_{\text{G}_3}$  που αφορά τη διεργασία μετατροπής νιτρικών σε μονοξείδιο του αζώτου με τιμή 0.5. Τέλος, έχουμε τους μειωτικούς συντελεστές  $n_{\text{G}_4}$  και  $n_{\text{G}_5}$  με τιμή 0.5 που αφορούν τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου και αντίστοιχα τη μετατροπή του υποξειδίου αζώτου σε αέριο άζωτο.

Ακόμη, για τις ίδιες διεργασίες που αναφέρθηκαν πιο πάνω, δηλαδή τη μετατροπή των νιτρικών σε μονοξείδιο του αζώτου έπειτα σε υποξείδιο του αζώτου και τέλος σε μονοξείδιο του αζώτου χρησιμοποιούνται συντελεστές κορεσμού του οξυγόνου της οργανικής ύλης και του οξειδίου του αζώτου. Το οξυγόνο και η έλλειψη οργανικής ύλης αποτελεί περιοριστικό παράγοντας στις εξισώσεις ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας. Το οξείδιο του αζώτου είναι αναγκαίο κατά τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου για τις άλλες περιπτώσεις είναι περιοριστικός παράγοντας. Οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές του οξυγόνου  $k_{\text{O}_2}$ ,  $k_{\text{O}_4}$ ,  $k_{\text{O}_5}$  έχουν τιμή ίση με  $0.1 \text{ grO}_2/\text{m}^3$ . Οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές της οργανικής ύλης  $k_{\text{S}_3}$ ,  $k_{\text{S}_4}$ ,  $k_{\text{S}_5}$  είναι  $20 \text{ grCOD}/\text{m}^3$ . Οι τιμές των συντελεστών του οξειδίου του αζώτου  $k_{\text{I}_3\text{NO}}$ ,  $k_{\text{I}_4\text{NO}}$ ,  $k_{\text{I}_5\text{NO}}$  μειώνονται όσο προχωρούν οι αντιδράσεις σε 0.5, 0.3, 0.075  $\text{grN}/\text{m}^3$ .

Για τις διαδικασίες ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών για τη μετατροπή των νιτρικών σε μονοξείδιο του αζώτου χρησιμοποιείται ο συντελεστής κορεσμού για τα νιτρικά  $k_{\text{NO}_2\text{D}}$  με την τιμή  $0.2 \text{ gr NO}_2\text{-N}/\text{m}^3$ . Για τη μετατροπή από μονοξείδιο του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου χρησιμοποιείται ο συντελεστής κορεσμού για το μονοξείδιο του αζώτου  $k_{\text{NO}}$  με την τιμή  $0.05 \text{ gr NO-N}/\text{m}^3$ . Τέλος, για να δημιουργηθεί αέριο άζωτο από υποξείδιο του αζώτου χρησιμοποιείται ο συντελεστής κορεσμού για το μονοξείδιο του αζώτου  $k_{\text{N}_2\text{O}}$  με την τιμή  $0.05 \text{ gr N}_2\text{O-N}/\text{m}^3$ .

Για τη διεργασία όπου η αμμωνία αρχικά οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη  $\text{NH}_2\text{OH}$  από το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση (AMO) χρησιμοποιούνται τρεις συντελεστές. Πρώτα έχουμε τη χρήση του συντελεστή μέγιστου ρυθμού για να πραγματοποιηθεί η πιο πάνω αντίδραση  $q_{\text{AOBAMO}}$  με τιμή  $5.2008 \text{ mgN}/(\text{mgCOD}\cdot\text{d})$ . Οι

άλλοι δύο συντελεστές που χρησιμοποιούνται αφορούν το οξυγόνο και το αμμωνιακό άζωτο που λειτουργούν σαν διακόπτες όταν μειωθεί η συγκέντρωση είτε του ενός είτε του άλλου. Η τιμή για τον συντελεστή κορεσμού του οξυγόνου  $k_{OHAOB1}$  είναι  $1 \text{ gr O}_2/\text{m}^3$  και για το αμμωνιακό άζωτο  $k_{NHAOB}$   $0.2 \text{ gr NH}_4\text{-N}/\text{m}^3$ .

Για τη διεργασία όπου η υδροξυλαμίνη καταλύεται σε νιτρικά από το περιπλασματικό ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης (HAO). Η διεργασία αυτή έχει 3 βήματα πριν ολοκληρωθεί (Pocquet, 2015). Αρχικά, η υδροξυλαμίνη οξειδώνεται σε νιτροξύλιο (NOH), το νιτροξύλιο μετατρέπεται σε NO και με περαιτέρω οξείδωση σε νιτρώδη (Pocquet, 2015). Χρησιμοποιούνται τέσσερις συντελεστές ,πρώτα έχουμε τη χρήση του συντελεστή μέγιστου ρυθμού για να πραγματοποιηθεί η πιο πάνω αντίδραση  $q_{AOBHAO}$  με τιμή  $5.2008 \text{ mgN}/(\text{mgCOD}\cdot\text{d})$ . Οι άλλοι δύο συντελεστές που χρησιμοποιούνται αφορούν το οξυγόνο και την υδροξυλαμίνη που λειτουργούν σαν διακόπτες όταν μειωθεί η συγκέντρωση είτε του ενός είτε του άλλου. Η τιμή για τον συντελεστή κορεσμού του οξυγόνου  $k_{OHAOB2}$  είναι  $0.6 \text{ gr O}_2/\text{m}^3$  και για την υδροξυλαμίνη  $k_{NH2OHAOB}$   $0.9 \text{ gr NH}_2\text{OH-N}/\text{m}^3$ . Τέλος, επειδή γίνεται οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου χρησιμοποιείται ο συντελεστής  $k_{NOAOBHAO}$  με τιμή  $0.0003 \text{ gr NO-N}/\text{m}^3$ .

Έπειτα έχουμε τη διεργασία της νιτροποίησης των νιτροποιητών. Χρησιμοποιούνται δύο συντελεστές, πρώτα έχουμε τη χρήση του συντελεστή μέγιστου ρυθμού  $q_{AOBN2ONN}$  για να πραγματοποιηθεί η πιο πάνω αντίδραση με τιμή  $0.0078 \text{ mgN}/(\text{mgCOD}\cdot\text{d})$ . Ο άλλος συντελεστής αφορά το νιτρικό οξείδιου που λειτουργεί σαν διακόπτης  $k_{NOAOBNN}$  με τιμή  $0.008 \text{ gr NO-N}/\text{m}^3$ .

Για την ανάπτυξη των νιτροποιητικών βακτηριδίων χρησιμοποιούνται τέσσερις συντελεστές. Οι συντελεστές κορεσμού του οξυγόνου  $k_{OHNOB}$   $1.2 \text{ gr O}_2/\text{m}^3$ , για τα νιτρώδη  $k_{NO2NOB}$   $0.5 \text{ gr NO}_2\text{-N}/\text{m}^3$ , για το φώσφορο  $k_{PNOB}$   $0.01 \text{ gr P}/\text{m}^3$  και για την αλκαλικότητα  $k_{ALKNOB}$   $0.082 \text{ gr CaCO}_3/\text{m}^3$ .

Για τη διεργασία της απονιτροποίησης των νιτροποιητών χρησιμοποιούνται πέντε συντελεστές. Πρώτα έχουμε τη χρήση του συντελεστή μέγιστου ρυθμού για να πραγματοποιηθεί η πιο πάνω αντίδραση  $q_{AOBN2OND}$  με τιμή  $13.008 \text{ mgN}/(\text{mgCOD}\cdot\text{d})$ . Ο ένας συντελεστής αφορά τη σταθερά ισορροπίας ιονισμού του μονοξειδίου του αζώτου

Κα. Ο επόμενος αφορά τον συντελεστή  $K_{HNO2AOB}$  που λειτουργεί ο διακόπτης στη εξίσωση στο νιτρώδες οξύ με τιμή  $0.004 \text{ gr HNO}_2\text{-N/m}^3$ . Τέλος, υπάρχουν δύο συντελεστές που είναι το πόσο επηρεάζει το οξυγόνο την απονιτροποίηση των νιτροποιητών  $K_{OHAOBND}$  με τιμή  $0.5 \text{ gr O}_2\text{/m}^3$  και το άλλο αποτελεί διακόπτη του οξυγόνου στη πιο πάνω διεργασία  $K_{IOHAOB} 0.8 \text{ gr O}_2\text{/m}^3$ .

Στη συνέχεια, ακολουθούν οι Πίνακες(3.2-3.3) όπου συγκεντρώνονται οι συμβολισμοί των παραμέτρων με την ερμηνεία τους, καθώς και με τις τιμές που λαμβάνουν όταν η θερμοκρασία των λυμάτων ισούται με  $20^\circ\text{C}$ .

Πίνακας 3.2: Στοιχειομετρικές παράμετροι του μοντέλου προσομοίωσης

| Σύμβολο   | Ερμηνεία   | Μονάδες  | Τιμή<br>( $20^\circ\text{C}$ ) |
|-----------|--|--|--------------------------------|
| $Y_H$     | Απόδοση Ετεροτροφικής Βιομάζας   | gr δημιουργούμενου<br>κυττάρου COD/gr<br>οξειδωμένου COD | 0,600                          |
| $Y_{AOB}$ | Απόδοση Αυτοτροφικών Οξειδωτικών Βακτηρίων                                   | gr δημιουργούμενου<br>κυττάρου COD/gr<br>οξειδωμένου N   | 0,180                          |
| $Y_{NOB}$ | Απόδοση Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτηρίων                                       | gr δημιουργούμενου<br>κυττάρου COD/gr<br>οξειδωμένου N   | 0,080                          |
| $f_p$     | Κομμάτι βιομάζας που παράγει<br>σωματιδιακά προϊόντα                         | αδιάστατο  | 0,080                          |
| $i_{NH}$  | Μάζα αζώτου ανά μάζα COD στη<br>βιομάζα                                      | gr N/gr COD  | 0,086                          |
| $i_{XP}$  | Μάζα αζώτου ανά μάζα COD στην<br>αδρανή ύλη                                  | gr N/gr COD  | 0,010                          |
| $i_{NXS}$ | Περιεκτικότητα αζώτου στην αργά<br>βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη Xs             | gr N/gr COD  | 0.040                          |
| $i_{NSF}$ | Περιεκτικότητα αζώτου στην ζυμώσιμη,<br>εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη Sf | gr N/gr COD  | 0.030                          |
| $i_{NSI}$ | Περιεκτικότητα αζώτου στην αδρανή<br>διαλυμένη οργανική ύλη                  | gr N/gr COD  | 0.010                          |
| $i_{PXS}$ | Περιεκτικότητα φωσφόρου στην αργά<br>βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη Xs           | gr P/gr COD  | 0.01                           |



|           |  |               |      |
|-----------|--|---------------|------|
| $i_{PSF}$ | Περιεκτικότητα φωσφόρου στην ζυμώσιμη, εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη Sf        | gr P/gr COD   | 0.01 |
| $i_{PXI}$ | Περιεκτικότητα φωσφόρου στην αδρανή διαλυμένη οργανική ύλη                         | gr P/gr COD   | 0.01 |
| $i_{PBM}$ | Περιεκτικότητα φωσφόρου στην βιομάζα   | gr P/gr COD   | 0.02 |
| $i_{PSI}$ | Περιεκτικότητα φωσφόρου στην αδρανή διαλυμένη οργανική ύλη                         | gr P/gr COD   | 0.0  |
| fSI       | Παραγωγή αδρανούς διαλυμένης οργανικής ύλης κατά την υδρόλυση                      | gr COD/gr COD | 0.0  |
| $n_g$     | Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών | Αδιάστατο     | 1.0  |

Πίνακας 3.3: Κινητικές παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης

| Σύμβολο        | Ερμηνεία  | Μονάδες                           | Τιμή<br>(20°C) |
|----------------|---|-----------------------------------|----------------|
| $\mu_H$        | Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ετεροτροφικής βιομάζας                                    | 1/ημέρα                           | 6.0            |
| $b_H$          | Ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικής βιομάζας   | 1/ημέρα                           | 0.62           |
| $\mu_{AOBHAO}$ | Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων                                | 1/ημέρα                           | 0.78           |
| $b_{AOB}$      | Ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των αυτοτροφικών βακτηρίων                                       | 1/ημέρα                           | 0.096          |
| $\mu_{NOB}$    | Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων                              | 1/ημέρα                           | 0.78           |
| $b_{NOB}$      | Ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης των νιτροποιητικών βακτηρίων                                     | 1/ημέρα                           | 0.096          |
| $K_h$          | Μέγιστος ειδικός ρυθμός υδρόλυσης   | g αργά βιοδιασπάσιμο              | 3              |
| $K_S$          | Συντελεστής κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας   | g COD m-3                         | 20             |
| $K_{OH}$       | Συντελεστής κορεσμού οξυγόνου   | g O2 m-3                          | 0.20           |
| $K_{NH}$       | Συντελεστής κορεσμού αμμωνιακού αζώτου  | g NH3-N m-3                       | 0.05           |
| $K_X$          | Συντελεστής κορεσμού της υδρόλυσης της αργά βιοδιασπάσιμης ύλης                             | g αργά βιοδιασπάσιμοCOD (g COD)-1 | 0.03           |
| $n_{NO3H}$     | Συντελεστής υδρόλυσης νιτρικών  | Αδιάστατο                         | 0.6            |
| $K_{NO3}$      | Συντελεστής κορεσμού νιτρικών   | g NO3-N m-3                       | 0.5            |
| $n_{NO2H}$     | Συντελεστής υδρόλυσης νιτρώδη   | Αδιάστατο                         | 0.6            |
| $K_{NO2}$      | Συντελεστής κορεσμού νιτρώδη  | g NO2-N m-3                       | 0.5            |
| $N_{Fe}$       | Συντελεστής υδρόλυσης αναερόβιας συνθήκες   | Αδιάστατο                         | 0.4            |
| $K_P$          | Συντελεστής κορεσμού φωσφορικών   | (g P/ m3)                         | 0.01           |
| $K_{ALK}$      | Συντελεστής κορεσμού αλκαλικότητας  | CaCO3 mg/L                        | 0.082          |
| $n_{NO3D}$     | Μειωτικός συντελεστής απονιτροποίησης   | αδιάστατο                         | 0.8            |
| $n_{G3}$       | Ανοξικός μειωτικός συντελεστής μετατροπή νιτρώδων σε μονοξείδιο του αζώτου                  | Αδιάστατο                         | 0.6            |
| $K_{OH3}$      | Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατά τη μετατροπή νιτρώδων σε μονοξείδιο του αζώτου       | g O2/m3                           | 0.1            |
| $K_{NO2D}$     | Συντελεστής κορεσμού για νιτρώδη μετατροπή των νιτρώδη σε μονοξείδιο του αζώτου             | g NO2-N m-3                       | 0.2            |
| $K_{S3}$       | Συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή νιτρώδων σε μονοξείδιο του αζώτου | g COD/ m3                         | 20             |

|           |  |               |        |
|-----------|--|---------------|--------|
| KI3NO     | Συντελεστής κορεσμού του μονοξειδίου του αζώτου οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή νιτρώδων σε μονοξείδιο του αζώτου                             | g N/ m3       | 0.5    |
| nG4       | Ανοξικός μειωτικός συντελεστής μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου  | αδιάστατο     | 0.6    |
| KS4       | Συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου                                   | g COD/ m3     | 20     |
| KNOD      | Συντελεστής κορεσμού για το μονοξείδιο του αζώτου στη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου                             | g N/ m3       | 0.05   |
| KI4NO     | Συντελεστής κορεσμού του μονοξειδίου του αζώτου οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου            | g N/ m3       | 0.3    |
| KOH4      | Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατά τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου   | g O2/ m3      | 0.1    |
| nG5       | Ανοξικός μειωτικός συντελεστής μετατροπή του υποξειδίου αζώτου σε αέριο άζωτο  | Αδιάστατο     | 0.6    |
| KS5       | Συντελεστής κορεσμού της οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή του υποξειδίου αζώτου σε αέριο άζωτο   | g COD/ m3     | 20     |
| KN2OD     | Συντελεστής κορεσμού για το μονοξείδιο του αζώτου κατά τη μετατροπή του αερίου αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου.                                 | g NO2-N m-3   | 0.05   |
| KOH5      | Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου κατά τη μετατροπή του υποξειδίου αζώτου σε αέριο άζωτο   | g O2/ m3      | 0.1    |
| KI5NO     | Συντελεστής κορεσμού του μονοξειδίου του αζώτου κατά τη μετατροπή του υποξειδίου αζώτου σε αέριο άζωτο   | g N/ m3       | 0.075  |
| qAOBAMO   | Μέγιστος ρυθμός της οξειδωσης της υδροξυλαμίνης $NH_2OH$ από το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση(AMO)   | mgN/(mgCOD·d) | 5.2008 |
| KOHAOB1   | Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης $NH_2OH$ από το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση(AMO)                   | g/ m3 as O2   | 1      |
| KNHAOB    | Συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου οξυγόνου για την αντίδραση της υδροξυλαμίνης $NH_2OH$ από το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση(AMO) | g/ m3 as N    | 0.2    |
| qAOBHAO   | Μέγιστος ρυθμός κατάλυσης της υδροξυλαμίνης σε νιτρικά από το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης (HAO)                                  | mgN/(mgCOD·d) | 5.2008 |
| KNOAOBHAO | Συντελεστής κορεσμού του μονοξειδίου του αζώτου στην αντίδραση της (HAO)   | g/ m3 as N    | 0.0003 |
| KOHAOB2   | Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου στην αντίδραση της (HAO)   | g/ m3 as O2   | 0.6    |
| KNH2OHAOB | Συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου στην αντίδραση της (HAO)  | g/ m3 as N    | 0.9    |

|                       |   |                                      |        |
|-----------------------|---|--------------------------------------|--------|
| q <sub>AOBN2ONN</sub> | Μέγιστος ρυθμός παραγωγής υποξειδίου του αζώτου στην νιτροποίηση των νιτροποιητών | mgN/(mgCOD·d)                        | 0.0078 |
| K <sub>NOAOBNN</sub>  | Συντελεστής κορεσμού μονοξειδίου του αζώτου για τη νιτροποίηση των νιτροποιητών   | g/ m <sup>3</sup> as N               | 0.008  |
| K <sub>HNO2AOB</sub>  | Συντελεστής κορεσμού του νιτρώδους οξέως για την απονιτροποίηση των νιτροποιητών  | g/ m <sup>3</sup> as N               | 0.004  |
| K <sub>OHN0B</sub>    | Συντελεστής κορεσμού οξυγόνου για τα νιτροποιητικά βακτήρια                       | g/ m <sup>3</sup> as O <sub>2</sub>  | 1.2    |
| K <sub>NO2NOB</sub>   | Συντελεστής κορεσμού των νιτρώδων για τα νιτροποιητικά βακτήρια                   | g NO <sub>2</sub> -N m <sup>-3</sup> | 0.5    |
| K <sub>PNOB</sub>     | Συντελεστής κορεσμού των φωσφορικών για τα νιτροποιητικά βακτήρια                 | g P/ m <sup>3</sup>                  | 0.01   |
| K <sub>ALKNOB</sub>   | Συντελεστής κορεσμού των αλκαλικών για τα νιτροποιητικά βακτήρια                  | CaCO <sub>3</sub> mg/L               | 0.082  |
| K <sub>OHAOBND</sub>  | Συντελεστής κορεσμού του οξυγόνου για την απονιτροποίηση των νιτροποιητών         | g/ m <sup>3</sup> as O <sub>2</sub>  | 0.5    |
| K <sub>IOHAOB</sub>   | Σταθερά του υποξειδίου του αζώτου για περιορισμό κορεσμού του οξυγόνου            | g/ m <sup>3</sup> as O <sub>2</sub>  | 0.8    |
| q <sub>AOBN2OND</sub> | Μέγιστη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των νιτροποιητών    | mgN/(mgCOD·d)                        | 1.3008 |

### 3.3.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στις βιολογικές διεργασίες

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην επεξήγηση των παραμέτρων του μοντέλου, κάποιες από αυτές εξαρτώνται από την θερμοκρασία των λυμάτων. Έτσι, για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας στις βιολογικές διεργασίες χρησιμοποιούμε σχέσεις Arrhenius. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε εξαρτώμενη παράμετρο για θερμοκρασία θ<sup>o</sup>C έχουμε (Σαραντόπουλος, 2015):

α) Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ετεροτροφικής βιομάζας

$$\mu_H^\theta = \mu_H^{20} * 1.072^{(\theta-20)}$$

β) Μέγιστος ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικής βιομάζας

$$b_H^\theta = b_H^{20} * 1.116^{(\theta-20)}$$

γ) Μέγιστος ειδικός ρυθμός υδρόλυσης

$$k_H^\theta = k_H^{20} * 1.116^{(\theta-20)}$$

δ) Συντελεστής κορεσμού υδρόλυσης για αργά βιοδιασπάσιμη ύλη

$$k_x^\theta = k_x^{20} * 1.116^{(\theta-20)}$$

### 3.3.6 Ζήτηση οξυγόνου

Από τον στοιχειομετρικό πίνακα του μοντέλου παρατηρούμε ότι το οξυγόνο καταναλώνεται κατά την αερόβια ανάπτυξη βιομάζας, τόσο ετεροτροφικής όσο και αυτοτροφικής όπως και για τις περιπτώσεις όπου χρειάζεται η οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου, της υδροξυλαμίνης όπως και του μονοξειδίου του αζώτου.

Ακόμη, πιο πάνω καταγράφηκε αναλυτικά η εξίσωση που διαμορφώνει τη μεταβολή του οξυγόνου στο βιολογικό αντιδραστήρα. Η ποσότητα του οξυγόνου μπορεί να διαμορφωθεί στις δεξαμενές αερισμού ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος.

Το κύριο συστατικό μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων είναι ο αερισμός. Είναι απαραίτητο άρα να γνωρίζουμε τη ποσότητα που καταναλώνεται. Πιο κάτω φαίνεται η σχέση που υπολογίζει το απαιτούμενο οξυγόνο:

$$\text{OTR} = \frac{dS_o}{dt} * V$$

όπου  $\frac{dS_o}{dt}$ : ο ρυθμός μεταβολής του οξυγόνου σε  $\text{gr}/(\text{m}^3 \cdot \text{χρονικό βήμα})$

V: ο όγκος της δεξαμενής

Η πιο πάνω σχέση δείχνει το οξυγόνο που απαιτείται σε μια δεξαμενή σε μονάδες  $\text{grO}_2/\text{χρονικό βήμα}$ . Η ζήτηση οξυγόνου δεν υπάρχει λόγος να μετριέται ανά δευτερόλεπτο αλλά ανά ώρα ή μέρα. Για αυτό το λόγο, οι μεταβολές αθροίζουν τις συγκεντρώσεις σε κάθε αερόβια δεξαμενή ανά ώρα ή ανά μέρα. Τέλος, η ολική ζήτηση προκύπτει σε μονάδες  $\text{kg/hr}$  ή σε  $\text{kg/d}$ .

Το OTR όμως δεν αρκεί για τον σχεδιασμό του συστήματος αερισμού. Μεγάλο ρόλο παίζει η θερμοκρασία, που επηρεάζει τη συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου σε νερό. Με την αλλαγή του OTR σε SOTR, τα λύματα μετατρέπονται σε καθαρό νερό θερμοκρασίας  $20^\circ\text{C}$ . Η σχέση με την οποία συνδέονται οι δυο δείκτες είναι:

$$\text{SOTR} = \text{OTR} * C_{s20} / (aF * \theta^{T-20} * (C_{sTb} - C))$$

όπου ( $\alpha F$ ): συντελεστής επίδρασης λυμάτων και γήρανσης διαχυτών

$\theta$ : θερμοκρασιακός συντελεστής ίσος με 1,024

$C_{STb}$ : συγκέντρωση κορεσμού λυμάτων σε θερμοκρασία  $T$ . Ισούται με  $0.95 \cdot C_{ST}$ , όπου  $C_{ST}$  είναι η συγκέντρωση κορεσμού οξυγόνου σε νερό σε θερμοκρασία  $T$ . Οι τιμές του  $CST$  συναρτήσεως της θερμοκρασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

$C$ : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου που θέτουμε στη δεξαμενή αερισμού

$C_{S20}$ : συγκέντρωση κορεσμού οξυγόνου στους  $20^{\circ}C$ .

Πίνακας 3. 4: Τυπικές τιμές συγκέντρωσης κορεσμού οξυγόνου σε νερό συναρτήσεως της Θερμοκρασίας(Σαραντόπουλος ,2015)

| Θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ ) | Συγκέντρωση Κορεσμού Οξυγόνου σε νερό (mg/l) | Θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ ) | Συγκέντρωση Κορεσμού Οξυγόνου σε νερό (mg/l) |
|-----------------------------|--|-----------------------------|--|
| 15                          | 10.08  | 21                          | 8.92   |
| 16                          | 9.87   | 22                          | 8.74   |
| 17                          | 9.67   | 23                          | 8.58   |
| 18                          | 9.47   | 24                          | 8.42   |
| 19                          | 9.28   | 25                          | 8.26   |
| 20                          | 9.09   | 26                          | 8.11   |

Πίνακας 3. 5: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για άζωτουχα συστατικά διεργασίες υδρόλυσης

|                 | Διεργασίες           | SN2O | SNO | SNO2 | SNO3 | SNH                             | SNH2OH | SN2 |
|-----------------|----------------------|------|-----|------|------|---------------------------------|--------|-----|
| <b>Υδρόλυση</b> |                      |      |     |      |      |                                 |        |     |
| 1               | <b>Αερόβια</b>       |      |     |      |      | <b>0,01 (iNXS-(1-fSI)·iNSF)</b> |        |     |
| 2               | <b>Ανοξική (NO3)</b> |      |     |      |      | <b>0,01 (iNXS-(1-fSI)·iNSF)</b> |        |     |
| 3               | <b>Ανοξική (NO2)</b> |      |     |      |      | <b>0,01 (iNXS-(1-fSI)·iNSF)</b> |        |     |
| 4               | <b>Αναερόβια</b>     |      |     |      |      | <b>0,01 (iNXS-(1-fSI)·iNSF)</b> |        |     |

Πίνακας 3.6 : Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για μη αζωτούχα συστατικά διεργασίες υδρόλυσης

|                 | Διεργασίες           | SI                 | SS                   | XI | XS        | XBH | XAOB | XNOB | SALK | SCO2 | SPO4                           | SO2 |
|-----------------|----------------------|--------------------|----------------------|----|-----------|-----|------|------|------|------|--------------------------------|-----|
| <b>Υδρόλυση</b> |                      |                    |                      |    |           |     |      |      |      |      |                                |     |
| 1               | <b>Αερόβια</b>       | <b>0 ((fSi=0))</b> | <b>1 ((1-fSi)=1)</b> |    | <b>-1</b> |     |      |      |      |      | <b>0,0 (iPXS-(1-fSI)·iPSF)</b> |     |
| 2               | <b>Ανοξική (NO3)</b> | <b>0 ((fSi=0))</b> | <b>1 ((1-fSi)=1)</b> |    | <b>-1</b> |     |      |      |      |      | <b>0,0 (iPXS-(1-fSI)·iPSF)</b> |     |
| 3               | <b>Ανοξική (NO2)</b> | <b>0 ((fSi=0))</b> | <b>1 ((1-fSi)=1)</b> |    | <b>-1</b> |     |      |      |      |      | <b>0,0 (iPXS-(1-fSI)·iPSF)</b> |     |
| 4               | <b>Αναερόβια</b>     | <b>0 ((fSi=0))</b> | <b>1 ((1-fSi)=1)</b> |    | <b>-1</b> |     |      |      |      |      | <b>0,0 (iPXS-(1-fSI)·iPSF)</b> |     |

Πίνακας 3. 7: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για άζωτουχα συστατικά διεργασίες ετεροτροφικών μικροοργανισμών

|                                      | Διεργασίες                  | SN2O                                    | SNO                                     | SNO2                                    | SNO3                                    | SNH                           | SNH2OH | SN2                                     |
|--------------------------------------|-----------------------------|---|---|---|---|-------------------------------|--------|---|
| <b>Ετεροτροφικοί Μικροοργανισμοί</b> |                             |   |   |   |   |                               |        |   |
| 5                                    | Αερόβια ανάπτυξη            |   |   |   |   | -iXB (-iNBM)                  |        |   |
| 6                                    | Απονιτροποίηση (NO3-> NO2)  |   |   | $(1-YH \cdot nG) / ((8/7)YH \cdot nG)$  | $-(1-YH \cdot nG) / ((8/7)YH \cdot nG)$ | -iXB (-iNBM)                  |        |   |
| 7                                    | Ανοξική Ανάπτυξη (NO2-> NO) |   | $(1-YH \cdot nG) / ((4/7)YH \cdot nG)$  | $-(1-YH \cdot nG) / ((4/7)YH \cdot nG)$ |   | -iXB (-iNBM)                  |        |   |
| 8                                    | Ανοξική Ανάπτυξη (NO-> N2O) | $(1-YH \cdot nG) / ((4/7)YH \cdot nG)$  | $-(1-YH \cdot nG) / ((4/7)YH \cdot nG)$ |   |   | -iXB (-iNBM)                  |        |   |
| 9                                    | Ανοξική Ανάπτυξη (N2O-> N2) | $-(1-YH \cdot nG) / ((4/7)YH \cdot nG)$ |   |   |   | -iXB (-iNBM)                  |        | $(1-YH \cdot nG) / ((12/7)YH \cdot nG)$ |
| 10                                   | Αποσύνθεση                  |   |   |   |   | iXB-iXP*fp<br>(iNBM-iNXI*fxI) |        |   |



Πίνακας 3. 8: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για μη άζωτουχα συστατικά διεργασίες ετεροτροφικών μικροοργανισμών

|                                      | Διεργασίες                  | SI | SS         | XI       | XS         | XBH | XAOB | XNOB | SALK                         | SCO2          | SPO4         | SO2        |
|--------------------------------------|-----------------------------|----|------------|----------|------------|-----|------|------|------------------------------|---------------|--------------|------------|
| <b>Ετεροτροφικοί Μικροοργανισμοί</b> |                             |    |            |          |            |     |      |      |                              |               |              |            |
| 5                                    | Αερόβια ανάπτυξη            |    | -1/YH      |          |            | 1   |      |      | -iXB/14                      | 1.1·(1-YH)/YH | -iPBM        | -(1-YH)/YH |
| 6                                    | Απονιτροποίηση (NO3-> NO2)  |    | -1/(YH·nG) |          |            | 1   |      |      | ((1-Yh)/(14·2.86·Yh))-iXB/14 | 1.1·(1-YH)/YH | -iPBM        |            |
| 7                                    | Ανοξική Ανάπτυξη (NO2-> NO) |    | -1/(YH·nG) |          |            | 1   |      |      | ((1-Yh)/(14·2.86·Yh))-iXB/14 | 1.1·(1-YH)/YH | -iPBM        |            |
| 8                                    | Ανοξική Ανάπτυξη (NO-> N2O) |    | -1/(YH·nG) |          |            | 1   |      |      | ((1-Yh)/(14·2.86·Yh))-iXB/14 | 1.1·(1-YH)/YH | -iPBM        |            |
| 9                                    | Ανοξική Ανάπτυξη (N2O-> N2) |    | -1/(YH·nG) |          |            | 1   |      |      | ((1-Yh)/(14·2.86·Yh))-iXB/14 | 1.1·(1-YH)/YH | -iPBM        |            |
| 10                                   | Αποσύνθεση                  |    |            | fP (0.1) | 1-fP (0.9) | -1  |      |      |                              |               | iPBM-iPXI·fp |            |

Πίνακας 3.9: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για άζωτουχα συστατικά διεργασίες αυτοτροφικών και οξειδωτικών βακτηρίων

| Διεργασίες   | SN2O  | SNO | SNO2   | SNO3    | SNH    | SNH2OH                     | SN2     |
|--|---|-----|--------|---------|--------|----------------------------|---------|
| <b>Αυτοτροφικά και Νιτροποιητικά οξειδωτικά βακτήρια</b> |   |     |        |         |        |                            |         |
| 11   | Οξείδωση αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη   |     |        |         |        | -1                         | 1       |
| 12   | Οξείδωση υδροξυλαμίνης σε οξείδιο του αζώτου με αναγωγή του οξυγόνου  |     | 1/YAOB |         |        | -iXB(-iNBM)                | -1/YAOB |
| 13   | Οξείδωση οξείδιο του αζώτου σε νιτρώδη με αναγωγή του οξυγόνου  |     | -1     | 1       |        |                            |         |
| 14   | Αναγωγή του οξείδιο του αζώτου σε υποοξείδιο του αζώτου συνδεδεμένο με την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη (νιτροποίηση νιτροποιητών) | 4   | -4     | 1       |        |                            | -1      |
| 15   | Αναγωγή του νιτρωδών σε υποοξείδιο του αζώτου συνδεδεμένο με την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη (απονιτροποίηση των νιτροποιητών)    | 2   |        | -1      |        |                            | -1      |
| 16   | Αερόβια ανάπτυξη νιτροποιητών   |     |        | -1/YNOB | 1/YNOB | -iXB(-iNBM)                |         |
| 17   | Αποσύνθεση αυτοτροφικών (AOB) (r17)   |     |        |         |        | iXB-iXP·fP (iNBM-iNXI·fXI) |         |
| 18   | Αποσύνθεση νιτροποιητών (NOB) (r18)   |     |        |         |        | iXB-iXP·fP (iNBM-iNXI·fXI) |         |

Πίνακας 3. 10: Στοιχειομετρικός πίνακας μοντέλου προσομοίωσης για μη άζωτου συστατικά διεργασίες αυτοτροφικών και οξειδωτικών βακτηρίων

| Διεργασίες   | SI  | SS | XI | XS       | XBH        | XAOB | XNOB | SALK    | SCO2       | SPO4         | SO2                |
|--|---|----|----|----------|------------|------|------|---------|------------|--------------|--------------------|
| <b>Αυτοτροφικά και Νιτροποιητικά οξειδωτικά βακτήρια</b> |   |    |    |          |            |      |      |         |            |              |                    |
| 11   | Οξείδωση αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη   |    |    |          |            |      |      | -iXB/14 |            |              | -8/7               |
| 12   | Οξείδωση υδροξυλαμίνης σε οξείδιο του αζώτου με αναγωγή του οξυγόνου  |    |    |          |            | 1    |      | -iXB/14 | -3.63/YAOB | -iPBM        | -(12/7-YAOB)/YAOB  |
| 13   | Οξείδωση οξείδιο του αζώτου σε νιτρώδη με αναγωγή του οξυγόνου  |    |    |          |            |      |      | -iXB/14 |            |              | -4/7               |
| 14   | Αναγωγή του οξείδιο του αζώτου σε υποοξείδιο του αζώτου συνδεδεμένο με την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη (νιτροποίηση νιτροποιητών) |    |    |          |            |      |      | -iXB/14 |            |              |                    |
| 15   | Αναγωγή του νιτρωδών σε υποοξείδιο του αζώτου συνδεδεμένο με με την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη (απονιτροποίηση των νιτροποιητών) |    |    |          |            |      |      | -iXB/14 |            |              |                    |
| 16   | Αερόβια ανάπτυξη νιτροποιητών   |    |    |          |            |      | 1    | -iXB/14 | -1.43/YNOB | -iPBM        | -((8/7)-YNOB)/YNOB |
| 17   | Αποσύνθεση αυτοτροφικών (AOB) (r17)   |    |    | fP (0.1) | 1-fP (0.9) |      | -1   |         |            | iPBM-iPXI-fp |                    |
| 18   | Αποσύνθεση νιτροποιητών (NOB) (r18)   |    |    | fP (0.1) | 1-fP (0.9) |      | -1   |         |            | iPBM-iPXI-fp |                    |

Πίνακας 3.11 Κινητικές Εξισώσεις Μοντέλου Προσομοίωσης

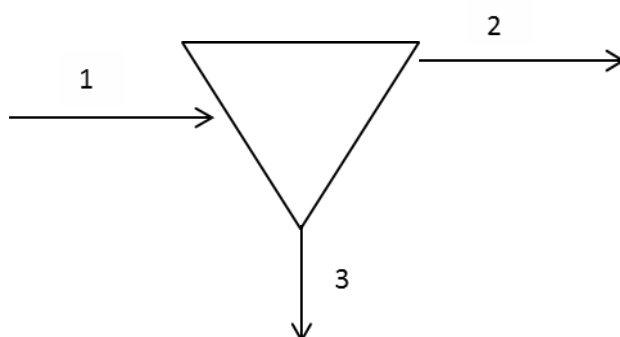
|    |                                       |   |
|----|---------------------------------------|---|
| 1  | <b>Αερόβια</b>                        | $\rho_1 = k_h * \frac{S_o}{S_o + K_{OH}} * \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} * X_{BH}$   |
| 2  | <b>Ανοξική (NO3)</b>                  | $\rho_2 = k_n * n_{NO3H} * \frac{K_{OH}}{S_o + K_{OH}} * \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} * \frac{S_{NO3}}{S_{NO3} + K_{NO3}} * X_{BH}$   |
| 3  | <b>Ανοξική (NO2)</b>                  | $\rho_3 = k_n * n_{NO2H} * \frac{K_{OH}}{S_o + K_{OH}} * \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} * \frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}} * X_{BH}$   |
| 4  | <b>Αναερόβια</b>                      | $\rho_4 = k_h * n_{fe} * \frac{K_{OH}}{S_o + K_{OH}} * \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} * \frac{K_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2} + S_{NO3}} * X_{BH}$   |
| 5  | <b>Αερόβια ανάπτυξη</b>               | $\rho_5 = \mu_h * \frac{S_o}{S_o + K_{OH}} * \frac{S_S}{S_S + K_S} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + K_{NH}} * \frac{S_{PO4}}{S_{PO4} + K_P} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * X_{BH}$   |
| 6  | <b>Απονιτροποίηση (NO3-&gt; NO2)</b>  | $\rho_6 = \mu_h * n_{NO3D} * \frac{K_{OH}}{S_o + K_{OH}} * \frac{S_{NO3}}{S_{NO3} + K_{NO3}} * \frac{S_S}{S_S + K_S} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + K_{NH}} * \frac{S_{PO4}}{S_{PO4} + K_P} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * X_{BH}$ |
| 7  | <b>Ανοξική Ανάπτυξη (NO2-&gt; NO)</b> | $\rho_7 = \mu_h * n_{G3} * \frac{K_{OH3}}{S_o + K_{OH3}} * \frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}} * \frac{S_S}{S_S + K_{S2}} * \frac{K_{I3NO}}{S_{NO} + K_{I3NO}} * X_{BH}$  |
| 8  | <b>Ανοξική Ανάπτυξη (NO-&gt; N2O)</b> | $\rho_8 = \mu_h * n_{G4} * \frac{K_{OH4}}{S_o + K_{OH4}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOD} + \left(\frac{S_{NO}^2}{K_{I4NO}}\right)} * \frac{S_S}{S_S + K_{S4}} * X_{BH}$  |
| 9  | <b>Ανοξική Ανάπτυξη (N2O-&gt; N2)</b> | $\rho_9 = \mu_h * n_{G5} * \frac{K_{OH5}}{S_o + K_{OH5}} * \frac{S_{N2O}}{S_{N2O} + K_{N2O}} * \frac{S_S}{S_S + K_{S5}} * \frac{K_{I5NO}}{S_{NO} + K_{I5NO}} * X_{BH}$  |
| 10 | <b>Αποσύνθεση</b>                     | $\rho_{10} = b_h * X_{BH}$  |

|    |  |  |
|----|--|--|
| 11 | Οξείδωση αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη  | $\rho_{11} = q_{AOBAMO} * \frac{S_O}{S_O + K_{OHAOB1}} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + K_{NHAOB}} * X_{AOB}$  |
| 12 | Οξείδωση υδροξυλαμίνης σε οξείδιο του αζώτου με αναγωγή του οξυγόνου   | $\rho_{12} = \mu_{AOBHAO} * \frac{S_O}{S_O + K_{OHAOB2}} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{NH}}{S_{NH} + 10^{-12}} * X_{AOB}$                        |
| 13 | Οξείδωση οξείδιο του αζώτου σε νιτρώδη με αναγωγή του οξυγόνου   | $\rho_{13} = q_{AOBHAO} * \frac{S_O}{S_O + K_{OHAOB2}} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOAOBHAO}} * X_{AOB}$   |
| 14 | Αναγωγή του οξείδιο του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου συνδεδεμένο με την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη (νιτροποίηση νιτροποιητών) | $\rho_{14} = q_{AOBN2ONN} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NOAOBN}} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * X_{AOB}$   |
| 15 | Αναγωγή του νιτρωδών σε υποξείδιο του αζώτου συνδεδεμένο με την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη (απονιτροποίηση των νιτροποιητών)    | $\rho_{15} = q_{AOBN2OND} * \frac{S_{NH2OH}}{S_{NH2OH} + K_{NH2OHAOB}} * \frac{S_{HNO2}}{S_{HNO2} + K_{HNO2AOB}} * f_{SO} * X_{AOB}$                                       |
| 16 | Αερόβια ανάπτυξη νιτροποιητών  | $\rho_{16} = \mu_{NOB} * \frac{S_O}{S_O + K_{OHNOB}} * \frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2NOB}} * \frac{S_{PO4}}{S_{PO4} + K_P} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * X_{NOB}$ |
| 17 | Αποσύνθεση αυτοτροφικών (AOB) (r17)  | $\rho_{17} = X_{AOB} * b_{AOB}$  |
| 18 | Αποσύνθεση νιτροποιητών (NOB) (r18)  | $\rho_{18} = X_{NOB} * b_{NOB}$  |

### 3.4 Δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης

#### 3.4.1 Προσομοίωση της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Για να επιτευχθεί η προσομοίωση της ΔΠΚ θεωρούμε ότι κατά την λειτουργία της επιτυγχάνεται ένας σταθερός βαθμός απομάκρυνσης στερεών. Έστω ότι ο βαθμός αυτός είναι  $a$  (%). Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι συγκεντρώσεις των διαλυτών συστατικών παραμένουν ίδιες τόσο για τα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα όσο και για την ιλύ(σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Διακριτοποίηση θέσεων δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης

α) Πρωτοβάθμια Ιλύς (Θέση 3)

Μέσω της πρωτοβάθμιας ιλύος απομακρύνεται η ποσότητα  $\frac{aX}{100}$  όπου  $X$  τα σωματιδιακά στοιχεία του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα για τη μάζα των Ολικών Αιωρούμενων Στερεών TSS έχουμε:

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

Θεωρώντας ότι η συγκέντρωση της Πρωτοβάθμιας Ιλύος είναι  $TSS(3)=1,5\%=15\text{kg/m}^3$ , μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή της ιλύος από την σχέση:

$$Q(3) = \frac{M_{TSS(3)}}{TSS(3)} = \frac{M_{TSS(3)}}{15}$$

Αντίστοιχα, για τη μάζα και την συγκέντρωση κάθε σωματιδιακού συστατικού θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$M_X(3) = \frac{a \cdot M_X(1)}{100}$$

$$X(3) = \frac{M_X(3)}{Q(3)}$$

Τα διαλυτά συστατικά γνωρίζουμε ότι η συγκέντρωσή τους παραμένει σταθερή. Έτσι υπολογίζουμε βάσει της παροχής στη θέση 3 τη μάζα στη θέση 3.

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

$$M_S(3)=S(3) \cdot Q(3)$$

β) Πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα (Θέση 2)

Η παροχή που εισέρχεται είναι η αρχική μείον την παροχή της πρωτοβάθμιας ιλύς.

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

Η μάζα και η συγκέντρωση κάθε σωματιδιακού συστατικού υπολογίζονται από τις σχέσεις:

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

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

Ενώ για τα διαλυτά στοιχεία υπολογίζουμε την συγκέντρωση και τη μάζα τους με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζαμε προηγουμένως για την πρωτοβάθμια ιλύ. Δηλαδή θα έχουν τη μορφή:

$$S(2)=S(1)$$

$$M_S(2)=S(2) \cdot Q(2)$$

### 3.5 Δεξαμενή τελικής καθίζησης

#### 3.5.1 Εισαγωγή

Η Δεξαμενή Τελικής Καθίζησης (ΔΤΚ) είναι ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια μιας εγκατάστασης καθώς καθορίζει την ποιότητα εκροής των λυμάτων. Ο ρόλος της δεξαμενής καθίζησης είναι πολυσήμαντος και καθορίζεται από τους εξής παράγοντες:

α) Μείωση των αιωρούμενων στερεών.

β) Καθίζηση της βιομάζας (λάσπης) και διαχωρισμός από τα επεξεργασμένα λύματα.

γ) να γίνεται επαρκής συμπύκνωση της βιομάζας για να διεκπεραιώνεται πιο εύκολα η επαναφορά της μέσω επανακυκλοφορίας στο βιολογικό αντιδραστήρα.

(Σαραντόπουλος, 2015)

#### 3.5.2 Δείκτες καθιζησιμότητας ιλύος

Όταν οι συγκεντρώσεις των στερεών του ανάμικτου υγρού είναι υψηλές, δηλαδή μεγαλύτερες από 1000 mg/l, δεν καθιζάνουν ανεξάρτητα το ένα με το άλλο, αλλά λόγω των αλληλοεπιδρώντων δυνάμεων μεταξύ τους καθιζάνουν σαν ένα στρώμα με ομοιόμορφη ταχύτητα. Ο τύπος αυτός της καθίζησης είναι γνωστός ως «ζωνική καθίζηση» και είναι χαρακτηριστικός του τρόπου καθίζησης στις Δεξαμενές Τελικής Καθίζησης. Η καθιζησιμότητα της ιλύος έχει δύο χαρακτηριστικά όπου αυτά είναι κοινά ως δείκτης Sludge Volume Index (SVI) και η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης (Zone Settling Velocity). Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά θα σχολιαστούν εκτενέστερα πιο κάτω.

#### Sludge Volume Index (SVI)

Σε έναν ογκομετρικό κύλινδρο 1L τοποθετείται ανάμικτο υγρό με συγκέντρωση MLSS. Το υγρό αφήνεται να καθιζάνει και σε μικρό χρονικό διάστημα δημιουργείται μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ ιλύος και διαυγασμένου υγρού. Η ταχύτητα που κατεβαίνει από τη διαχωριστική επιφάνεια είναι η ταχύτητα της ζωνικής καθίζησης. Μετά από διάστημα 30 λεπτών μετريέται ο όγκος που καταλαμβάνει η ιλύς, εκφρασμένος σε ml και διαιρείται με την αρχική συγκέντρωση του ανάμικτου υγρού, εκφρασμένη σε gr/l. Ο λόγος αυτός είναι ο δείκτης SVI.



Σε περιπτώσεις κακής καθιζησιμότητας ιλύος ή υψηλών συγκεντρώσεων MLSS είναι δυνατό η τιμή του SVI να είναι πλασματική. Για να μην υπάρξουν λανθασμένες εκτιμήσεις του δείκτη συνηθίζεται να γίνεται εκτέλεση του πειράματος με αραιώση των MLSS. Σε αυτή τη περίπτωση, ο προσδιοριζόμενος δείκτης είναι ο DSVI που προκύπτει με επαρκή αραιώση του ανάμικτου υγρού, για να είναι δυνατόν ο όγκος της ιλύος να είναι αρκετά μικρότερος από τον όγκο του κυλίνδρου.

Ένας ακόμη τρόπος αντιμετώπισης των αδυναμιών του SVI είναι ο προσδιορισμός του δείκτη SSVI. Το πείραμα αυτό εκτελείται σε κύλινδρο με όγκο μεγαλύτερο από 1L, ενώ η αρχική συγκέντρωση των MLSS ρυθμίζεται στα 3500 mg/l.

Οι δείκτες DSVI και SSVI είναι γενικώς μικρότεροι του SVI και αντιπροσωπεύουν καλύτερα τη καθίζησης της ιλύος στις ΔTK. Ο δείκτης DSVI είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος λόγω της ευκολίας προσδιορισμού του.

(Σαραντόπουλος, 2015)

### Ταχύτητα ζωνικής καθίζησης

Η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης μπορεί να μετρηθεί με αντίστοιχα πειράματα στα οποία ο κύλινδρος καθίζησης έχει μεγαλύτερο βάθος (2m). Ο κύλινδρος ακόμα είναι εφοδιασμένος με μηχανισμό αργής ανάμειξης. Ο δείκτης συμβολίζεται ως SSVI (Stirred Sludge Volume Index)

Μικρές ταχύτητες ζωνικής καθίζησης και μεγάλες τιμές SVI χαρακτηρίζουν τα ανάμικτα υγρά με δυσμενή χαρακτηριστικά καθίζησης και άρα χρειάζονται μεγάλες απαιτούμενες επιφάνειες ΔTK. Τα κριτήρια φορτίου στερεών προϋποθέτουν καλή καθιζησιμότητα ( $SVI < 150$ ) και άρα κατάλληλες ρυθμίσεις των κριτηρίων που θα πρέπει να γίνονται, όταν το ανάμικτο υγρό χαρακτηρίζεται από δείκτη με υψηλότερη τιμή (Μπουκοβάλας, 2015).

#### 3.5.3 Εμπειρικές σχέσεις ταχύτητας καθίζησης

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μαθηματικές εκφράσεις για την εκτίμηση της ζωνικής ταχύτητας καθίζησης, οι οποίες χρησιμοποιούν ως δεδομένο την συγκέντρωση των στερεών. Δυο αρκετά διαδεδομένες εξισώσεις είναι:

α)  $V_s = V_0 \cdot X^{-k}$

$$\beta) V_s = V_0 \cdot e^{-kx}$$

όπου  $V_s$  : η ταχύτητα καθίζησης (m/d)

$X$  : η συγκέντρωση των MLSS ( $\text{kgCOD/m}^3$ )

$V_0$  και  $k$  : σταθερές που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος  
 Στην παρούσα προσομοίωση για την εκτίμηση της ταχύτητας καθίζησης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που προτείνονται από τον Α. Ανδρεαδάκη (1993):

$$V_s = V_0 \cdot e^{-kx}$$

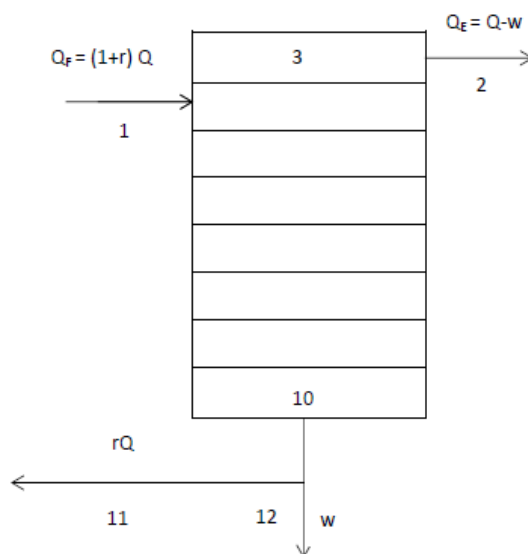
$$k = 0.22 + 0.0033 \cdot \text{DSVI}$$

$$V_0 = 11 - 0.025 \cdot \text{DSVI}$$

### 3.5.4 Υπομοντέλο καθίζησης

Η δεξαμενή τελικής καθίζησης χωρίζεται σε οκτώ ισοϋψή στρώματα σταθερής επιφάνειας  $A \text{ m}^2$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Για κάθε χρονικό βήμα στο κάθε τμήμα εφαρμόζονται οι εξισώσεις για να διαπιστωθεί η μεταβολή των ουσιών σε κάθε στρώμα.

Η συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών παραμένει σταθερή, δηλαδή αυτή που έχουν με την απομάκρυνση τους από το βιολογικό αντιδραστήρα, αντίθετα τα σωματιδιακά συστατικά συμπυκνώνονται.



Σχήμα 3. 2: Διακριτοποίηση δεξαμενής τελικής καθίζησης (Σαραντόπουλος, 2015)

Οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν είναι αυτές που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο:

$$V_S(I) = V_0 \cdot e^{k \cdot X(I)} \text{ όπου}$$

$$X(I) = X_I(I) + X_S(I) + X_{BH}(I) + X_{AOB}(I) + X_{NOB}(I)$$

$$V_0 = 11 - 0,025 \cdot DSVI$$

$$k = 0,22 + 0,0033 \cdot DSVI$$

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις μεταβολής για κάθε θέση.

α) Στρώμα ανάντη του στρώματος εισόδου στη ΔTK (Θέση 3)

Η συγκέντρωση σε αυτό το στρώμα αποτελούν επίσης την συγκέντρωση που θα παρατηρηθεί κατά την έξοδο του συστήματος. Η εξίσωση που υπολογίζει το ισοζύγιο μάζας για όλα τα σωματιδιακά συστατικά σε χρόνο dt είναι:

$$DX(3) = \left( -V_S \cdot X(3) + \frac{Q_E}{A} \cdot (X(4) - X(3)) \right) \cdot \frac{dt}{H(3)}$$

β) Στρώμα Εισόδου στη ΔTK (Θέση 4)

Σύμφωνα με το μοντέλο καθίζησης το ισοζύγιο μάζας για όλα τα σωματιδιακά συστατικά σε χρόνο dt είναι:

$$DX(4) = \left( V_S \cdot X(3) - V_S \cdot X(4) + \frac{Q_F \cdot X(1) - Q_E \cdot X(4) - r \cdot Q \cdot X(4)}{A} \right) \cdot \frac{dt}{H(4)}$$

γ) Στρώματα κατάντη της Θέσης Εισόδου στη ΔTK (Θέσεις 5-9)

Η μεταβολή στην συγκέντρωση για χρονικό διάστημα dt θα δίνεται από τις εξισώσεις :

$$DX(I) = \left( V_S(I-1) \cdot X(I-1) - V_S(I) \cdot X(I) + \frac{r \cdot Q \cdot (X(I-1) - X(I))}{A} \right) \cdot \frac{dt}{H(I)}$$

δ) Πυθμένας Δεξαμενής Τελικής Καθίζησης (Θέση 10)

Από αυτή τη θέση ένα ποσοστό της μάζας μεταφέρεται για επανακυκλοφορία και το υπόλοιπο πάει για χώνευση. Η συγκέντρωση των συστατικών τόσο στη θέση 10

όσο και στην ανακυκλοφορία και την περίσσια είναι ίδιες. Η μεταβολή της συγκέντρωσης σε χρονικό διάστημα dt υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$DX(10) = \left( V_S(9) \cdot X(9) + \frac{r \cdot Q \cdot (X(9) - X(10))}{A} \right) \cdot \frac{dt}{H(10)}$$

Η συγκέντρωση κάθε συστατικού στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος dt σε κάθε στρώμα της δεξαμενής θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$S(t+dt, I) = S(t, I) + DS(I)$$

$$X(t+dt, I) = X(t, I) + DX(I)$$

### 3.5.4 Όρια εξόδου – Δείκτης ποιότητας εκροής

Για την έξοδο του συστήματος έχουν θεσπιστεί κάποια όρια από τη νομοθεσία. Ο λόγος είναι για να μην υπάρχει κίνδυνος περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων στο οικοσύστημα του αποδέκτη. Τα όρια των τιμών απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3. 12: Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις εκροής ((ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι/ Κ.Υ.Α. αριθ. 5673/400/1997)

| Παράμετρος Ρύπανσης  |   | Μέγιστο Επιτρεπόμενο Όριο |
|--|---|---------------------------|
| BOD <sub>5</sub> στους 20 <sup>o</sup> C (χωρίς νιτροποίηση) |   | 25 mg/l *                 |
| Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο COD                               |   | 125 mg/l*                 |
| SS   | για οικισμούς με ι.π. άνω των 10.000            | 35 mg/l*                  |
|  | για οικισμούς με ι.π. μεταξύ 2.000 και 10.000   | 60 mg/l*                  |
| N <sub>total</sub>   | για οικισμούς με ι.π. μεταξύ 10.000 και 100.000 | 15 mg/l**                 |
|  | για οικισμούς με ι.π. άνω των 100.000           | 10 mg/l**                 |

\* για συγκεκριμένο ποσοστό δειγμάτων, που κυμαίνεται συνήθως από 90-95%

\*\* ως μέση ετήσια τιμή

Για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας εκροής των λυμάτων προτείνεται ακόμα ένας τρόπος (EQI) που αναφέρθηκε προηγουμένως στο μοντέλο BSM1. Έχει σχέση με τα πρόστιμα που πρέπει να πληρωθούν λόγω του φορτίου της ρύπανσης. Ο δείκτης αυτός αποτελεί μέσο όρο συνήθως μιας εβδομάδας περιόδου και υπολογίζεται αναλόγως της επίδρασης που έχουν στον αποδέκτη τα διαφορετικά συστατικών. Η Ποιότητα Εκροής (Effluent Quality – EQ) ορίζεται από την σχέση:

$$EQI = \frac{1}{1000 \cdot T} \int_{t_1}^{t_2} B_{TSS} \cdot TSS(t) + B_{COD} \cdot COD(t) + B_{NKj} \cdot SNK_j(t) + B_{NO} \cdot SNO(t) + B_{BOD_5} \cdot BOD_5(t) \cdot Q(t) \cdot dt$$

όπου EQ : Ποιότητα Εκροής (kg pollution/d)

T : η περίοδος παρατήρησης της ποιότητας εκροής (d)

t1,t2 : η αρχή και η λήξη της περιόδου Tα

S<sub>Se</sub> : συγκέντρωση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών, δηλαδή το άθροισμα των VSS και X<sub>NV</sub> στην έξοδο (gr/m<sup>3</sup>)

COD<sub>e</sub> = S<sub>s,e</sub> + S<sub>l,e</sub> + X<sub>s,e</sub> + X<sub>l,e</sub> + X<sub>BH,e</sub> + X<sub>AOB,e</sub> + X<sub>NOB,e</sub> (gr/m<sup>3</sup>)

SNK<sub>j,e</sub> = S<sub>NH,e</sub> + i<sub>XB</sub> · ( X<sub>BH,e</sub> + X<sub>NOB,e</sub> + X<sub>AOB,e</sub> ) + i<sub>XP</sub> · ( X<sub>l,e</sub> ) (gr/m<sup>3</sup>)

SNO<sub>e</sub> : συγκέντρωση Νιτρικού Αζώτου (gr/m<sup>3</sup>)

BOD<sub>5,e</sub> = 0,25 · (S<sub>s,e</sub> + X<sub>s,e</sub> + (1-f<sub>p</sub>) · (X<sub>BH,e</sub> + X<sub>BA,e</sub> + X<sub>NOB,e</sub>)) (gr/m<sup>3</sup>)

Οι τιμές των δεικτών βαρύτητας που μετατρέπουν τις συγκεντρώσεις σε μονάδες ρύπανσης φαίνονται πιο κάτω .

Πίνακας 3. 13: Συντελεστές βαρύτητας φορτίων εκροής

| Συντελεστής              | B <sub>SS</sub> | B <sub>CO</sub> | B <sub>N</sub> | B <sub>N</sub> | B <sub>BO</sub> |
|--------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Τιμή<br>(gr ρύπανσης/gr) | 2               | 1               | 30             | 10             | 2               |

(Meneses ,Concepción & Vilanova, 2016)

## 3.6 Πάχυνση ιλύος

### 3.6.1 Εισαγωγή

Οι μονάδες πάχυνσης έχουν ως σκοπό την απομάκρυνση μέρους του περιεχόμενου υγρού, και κατά συνέπεια τη μείωση του όγκου της ιλύος, και την βελτίωση των χαρακτηριστικών της, δηλαδή την αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών. Η συγκέντρωση των στερεών πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3% για να γίνεται οικονομικά και εύκολα η σταθεροποίηση της λάσπης.

Σε μια ΕΕΛ μπορούν να υπάρχουν δυο μορφές ιλύος, η πρωτοβάθμια και η βιολογική ιλύς. Στην περίπτωση της πρωτοβάθμιας ιλύς μπορεί να υπάρχει από προηγουμένως ικανοποιητική συμπύκνωση και να μην απαιτείται η πάχυνση της. Αν όμως γίνεται συχνά απομάκρυνση ιλύος και η συγκέντρωση της είναι μεταξύ 1.5-2% τότε γίνεται πάχυνση της όπως γίνεται και στο μοντέλο. Η βιολογική ιλύς πάντα απαιτεί πάχυνση καθώς εξέρχεται με μια συγκέντρωση της τάξης 0,5- 1,5%.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη πάχυνσης της ιλύος είναι τρεις, η πάχυνση με βαρύτητα, η μηχανική πάχυνση και οι παχυντές επίπλευσης. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται για την πρωτοβάθμια ιλύ, ενώ η δεύτερη είναι καταλληλότερη για την βιολογική ιλύ. Στη μηχανική πάχυνση γίνεται ανάμειξη με διάλυμα πολυμερούς.

Κατά τη διεργασία της πάχυνσης ένα ποσοστό της λάσπης επιστρέφει στο σύστημα μέσω των στραγγιδίων για να μην αυξάνονται τα φορτία εισροής στο σύστημα. Το υπόλοιπο ποσοστό ονομάζεται ποσοστό συγκράτησης σωματιδίων CR που πρέπει να κυμαίνεται στο 85-95%.

### 3.6.2 Προσομοίωση πάχυνσης

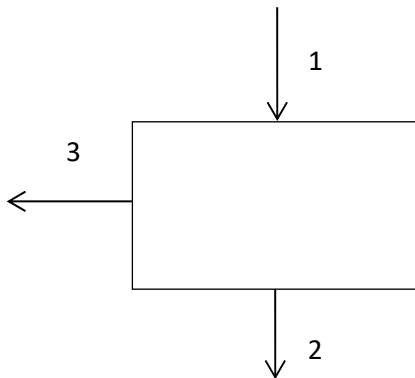
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για το παρόν σύστημα επιλέχθηκε πάχυνση βαρύτητας για την πρωτοβάθμια λάσπη και μηχανική πάχυνση για τη δευτεροβάθμια λάσπη.

Υπάρχει ένα ποσοστό συγκράτησης στερεών ίσο με το 95% το οποίο αφορά το ποσοστό των σωματιδιακών συστατικών που θα συνεχίσει στη μονάδα της χώνευσης και το υπόλοιπο θα είναι στραγγίδια. Η συγκέντρωση των συνολικών στερεών της εξερχόμενης ιλύος θεωρούμε ότι ισούται με  $5\% = 50\text{kg/m}^3$ . Τα διαλυτά συστατικά του μοντέλου θα παραμείνουν με την ίδια συγκέντρωση όπως προηγουμένως και ότι το

οξυγόνο καταναλώνεται πλήρως.

Η συγκέντρωση στην επεξεργασία ιλύος εκφράζεται σε όρους  $\text{grVSS}/\text{m}^3$  και για αυτό χρησιμοποιείται ο συντελεστής μετατροπής  $1,42 \text{ grCOD}/\text{grVSS}$ .

Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η εγκατάσταση του παχυντή και για τις 2 περιπτώσεις πιο κάτω αναγράφονται οι εξισώσεις τόσο για τα στραγγίδια τόσο και για την έξοδο του παχυντή. Επίσης, για τη μηχανική πάχυνση δίνονται οι εξισώσεις του πολυηλεκτρολύτη.



Σχήμα 3. 3: Διακριτοποίηση θέσεων παχυντή

α) Εξερχόμενη Ιλύς (Θέση 2)

Η εξερχόμενη μάζα των ολικών στερέων θα είναι:

$$M_{TSS(2)} = \frac{CR}{100} \cdot M_{TSS(1)}$$

Η συγκέντρωση του  $TSS=5\%=50\text{kg}/\text{m}^3$  είναι γνωστή άρα υπολογίζουμε την παροχή της εξερχόμενης ιλύος:

$$Q(2) = \frac{M_{TSS(2)}}{TSS(2)} = \frac{M_{TSS(2)}}{50}$$

Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση των σωματιδιακών συστατικών όπως φαίνεται πιο κάτω:

$$M_X(2) = \frac{CR}{100} \cdot M_X(1)$$
$$X(2) = \frac{M_X(2)}{Q(2)}$$

Τα διαλυτά συστατικά όπως αναφέρθηκε προηγουμένως διατηρούν την συγκέντρωσή τους σταθερή. Η μάζα μπορεί να υπολογισθεί από τη συγκέντρωση του

και την παροχή, οι σχέσεις είναι οι εξής:

$$S(2)=S(1)$$
$$M\_S(2)=Q(2) \cdot S(2)$$

β) Στραγγίδια (Θέση 3)

Η παροχή των στραγγιδίων θα ισούται με:

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

ενώ η συγκέντρωση και η μάζα κάθε σωματιδιακού συστατικού θα δίνεται από τις πιο κάτω εξισώσεις:

$$M\_X(3)=M\_X(1)-M\_X(2)$$
$$X(3) = \frac{M\_X(3)}{Q(3)}$$

Από την άλλη, ο υπολογισμός της συγκέντρωσης και της μάζας κάθε διαλυτού συστατικού θα γίνεται μέσω των σχέσεων:

$$S(3)=S(1)$$
$$M\_S(3)=Q(3) \cdot S(3)$$

γ) Απαιτούμενη ποσότητα πολυηλεκτρολύτη για τη μηχανική πάχυνση

Ανά kg TS εκτιμάται ότι προστίθεται 5 gr πολυηλεκτρολύτη. Άρα, μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα του πολυηλεκτρολύτη που θα χρησιμοποιηθεί αρκεί να γνωρίζουμε την ημερήσια μάζα των στερεών που περνούν από τη μονάδα μηχανικής πάχυνσης .

$$M_{\text{πολ,παχ}} = \frac{5}{1000} * M_{\text{TSS}}(1)$$



### 3.7 Χώνευση ιλύος

#### 3.7.1 Εισαγωγή

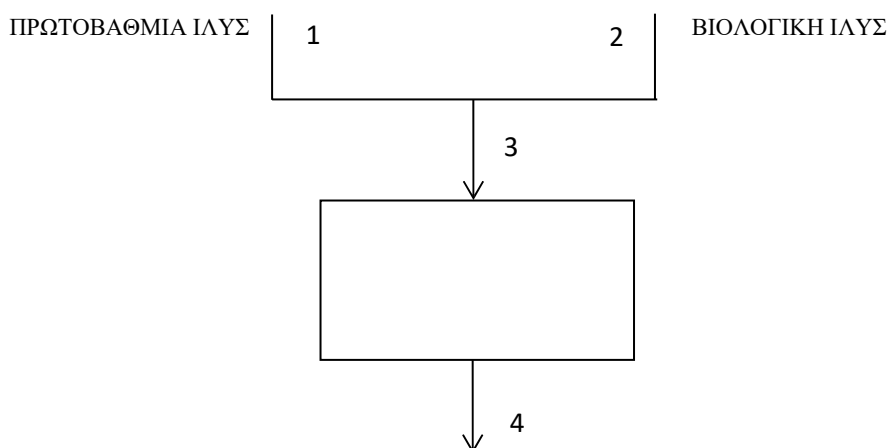
Η παραγόμενη ιλύς, τόσο η πρωτοβάθμια όσο και η βιολογική, περιέχουν σημαντικά ποσοστά οργανικών στερεών. Με τη χώνευση της ιλύος τα οργανικά στερεά διασπώνται σε πιο σταθερά συστατικά. Η χώνευση μειώνει τον αριθμό των στερεών καταστρέφει τους παθογόνους μικροοργανισμούς και έτσι γίνεται πιο εύκολη η αφυδάτωση της ιλύος. Ακόμη περιορίζει τις οσμές και την αποξυγόνωση.

Η αερόβια σταθεροποίηση είναι μια μέθοδος η οποία κοστίζει αρκετά και χρησιμοποιείται σε μικρές εγκαταστάσεις που έχουν μικρές απαιτήσεις αερισμού.

Η αναερόβια χώνευση περιλαμβάνει αρκετές διεργασίες κατά τις οποίες γίνεται διάσπαση των οργανικών στερεών σε απουσία οξυγόνου και έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή βιοαερίου. Η ταχύτητα σταθεροποίησης εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του χωνευτή. Υπάρχουν δύο περιοχές όπου παρατηρείται η μέγιστη σταθεροποίηση οι οποίες είναι η μεσοφιλική (35°C) και η θερμοφιλική στους 55°C . Πλην της περίπτωσης που αναφέρθηκε προηγουμένως προτιμάται η αναερόβια χώνευση καθώς γίνεται παραγωγή μεθανίου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας. Για την εγκατάσταση βέβαια η αναερόβια χώνευση είναι πολύ πιο αργή από την αερόβια.

#### 3.7.2 Προσομοίωση χώνευσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να γίνει αναερόβια μεσοφιλική σταθεροποίηση της ιλύος. Για την προσομοίωση της λειτουργίας της μονάδας χώνευσης έγιναν οι παρακάτω θεωρήσεις.



Σχήμα 3.4: Διακριτοποίηση ενδιαφερόμενων θέσεων για τη μονάδα χώνευσης

Τα αργά βιοδιασπάσιμα οργανικά σωματιδιακά συστατικά ( $X_S$ ,  $X_{BH}$ ,  $X_{AOB}$ ) θεωρείται ότι διασπώνται εξαιτίας των διεργασιών που συντελούνται στη μονάδα σταθεροποίησης. Ο βαθμός διάσπασης διαφέρει μεταξύ της πρωτοβάθμιας και βιολογικής ύλης, με τον πρώτο να είναι μεγαλύτερος. Ο βαθμός διάσπασης της πρωτοβάθμιας αναφέρεται ως  $pr\_dig$  και της βιολογικής ως  $sec\_dig$ . Οι εξισώσεις που δίνουν τη μάζα και την συγκέντρωση των συστατικών αυτών στην έξοδο του χωνευτή θα είναι:

$$M_{X(4)} = \frac{100 - pr_{dig}}{100} \cdot M_{X(1)} + \frac{100 - sec_{dig}}{100} \cdot M_{X(2)}$$

Τα υπόλοιπα σωματιδιακά συστατικά θα έχουν την ίδια μάζα καθώς και συγκέντρωση με προηγούμενως όπως φαίνεται πιο κάτω για παράδειγμα η αδρανής διαλυμένη οργανική ύλη:

$$M_{X_I(4)} = M_{X_I(3)}$$

$$X_I(4) = X_I(3)$$

Το αμμωνιακό άζωτο παράγεται κατά την αποσύνθεση τόσο της ετεροτροφικής βιομάζας όσο και των αυτοτροφικών και νιτροποιητικών βακτηριδίων όπως φαίνεται από την εξίσωση πιο κάτω:

$$M_{S_{NH}(4)} = M_{S_{NH}(3)} + \frac{pr_{dig}}{100} \cdot i_{XB} \cdot (M_{X_{BH}(1)} + M_{X_{BA}(1)} + M_{X_{NOB}(1)}) + \frac{sec_{dig}}{100} \cdot i_{XB} \cdot (M_{X_{BH}(2)} + M_{X_{BA}(2)} + M_{X_{NOB}(2)})$$

Η κατανάλωση της τροφής είναι απαραίτητη για τη μετατροπή των οργανικών στερεών σε οργανικά οξέα και μετέπειτα την παραγωγή μεθανίου από τα οργανικά οξέα. Στο σύστημα θεωρείται ένα βαθμός κατανάλωσης (BK) και συγκεκριμένα στην περίπτωση μας 80% της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής. Οι σχέσεις που θα δίνουν τη νέα μάζα και τη νέα συγκέντρωση θα είναι:

$$M_{Ss}(4) = M_{Ss}(3) \cdot \frac{100 - BK}{100}$$

Τα υπόλοιπα διαλυτά στοιχεία που εξέρχονται από το χωνευτή θα παραμείνουν με την ίδια μάζα και συγκέντρωση με αυτήν που εισέρχονται. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

$$\begin{aligned} M_S(4) &= M_S(3) \\ S(4) &= S(3) \end{aligned}$$

### 3.7.3 Παραγωγή βιοαερίου

Το πλεονέκτημα της αναερόβιας χώνευσης είναι η παραγωγή βιοαερίου. Το βιοαέριο αποτελείται από μεθάνιο CH<sub>4</sub> και διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> σε αναλογίες 65-70% και 30-35% αντίστοιχα. Για αυτό το σύστημα θεωρούμε ότι για κάθε 1 kg VS που διασπάται παράγεται 1 m<sup>3</sup> βιοαερίου. Ένα ποσοστό στην περίπτωση μας 1% διαφεύγει από τον χωνευτή.

Το υπόλοιπο 99% του βιοαερίου στέλνεται σε μια μονάδα συμπαραγωγής ενέργειας CHP (Combined Heat and Power) και μετατρέπεται σε:

- 50% θερμική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για τις ανάγκες του χωνευτή που θα αναλυθούν στο επόμενο υποκεφάλαιο.
- 35% ηλεκτρική ενέργεια. Η ποσότητα αυτής της ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλυφθεί μέρος της ενεργειακής κατανάλωσης της εγκατάστασης.
- 15% καυσαέρια.

### 3.7.4 Απαιτήσεις θέρμανσης και θερμικές απώλειες χωνευτή

Η θερμοκρασία του χωνευτή θα πρέπει να παραμένει σταθερή σε μια τιμή μεσοφιλική συνήθως για να υπάρχουν μικρότερες απαιτήσεις ενέργειας. Επομένως, θα πρέπει να καλυφθούν οποιεσδήποτε θερμικές απώλειες από τον χωνευτή. Εκτός αυτού, η προσφερόμενη θερμότητα θα πρέπει να ανυψώσει τη θερμοκρασία της ιλύος στη θερμοκρασία της χώνευσης.

$$Q_{\theta} = W \cdot C \cdot (T_2 - T_1)$$

Για την θέρμανση της ιλύος η απαιτούμενη θερμότητα δίνεται από την σχέση:

όπου  $W$  : η ροή μάζας της ιλύος (kg/h)

$C$  : η μέση ειδική θερμότητα της ιλύος ίση με 1

Kcal/(kg·°C)  $T_1$  : η θερμοκρασία του χωνευτή (°C)

$T_2$  : η θερμοκρασία της ιλύος (°C)

Ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών του χωνευτή εξαρτάται από τη μόνωση, τα λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των χωνευτών. Στην περίπτωση μας εκτιμήθηκαν ως ένα ποσοστό 30% της απαιτούμενης θερμότητας για την ιλύ. Δηλαδή:

$$Q_{\alpha} = 0.30 \cdot Q_{\theta}$$

### 3.8 Αφυδάτωση

#### 3.8.1 Εισαγωγή

Η αφυδάτωση αποτελεί την τελευταία διεργασία πριν τη διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση της λάσπης. Κατά την αφυδάτωση όπως και κατά την πάχυνση μειώνεται ο όγκος της ιλύς και αυξάνονται το ποσοστό των στερεών. Η ιλύς εξέρχεται από την αφυδάτωση με μια συγκέντρωση στερεών μεταξύ 18-35%. Η απομάκρυνση της υγρασίας μειώνει τις οσμές και ο χειρισμός της λάσπης γίνεται ευκολότερος. Η αφυδάτωση μπορεί να γίνει είτε σε κλίνες ξήρανσης είτε με μηχανικά μέσα.

Η ξήρανση της λάσπης σε κλίνες άμμου ήταν διαδεδομένη παλιότερα αλλά σήμερα αποφεύγεται λόγω της μεγάλης επιφάνειας που απαιτείται, του υψηλού εργατικού κόστους καθώς και τις κλιματολογικές συνθήκες. Βασικό χαρακτηριστικό της μηχανικής αφυδάτωσης είναι η χρήση κροκιδωτικών, που αυξάνει την απόδοση της με τη δημιουργία μια αφυδατωμένης λάσπης με συγκέντρωση στερεών πάνω από 20 %.

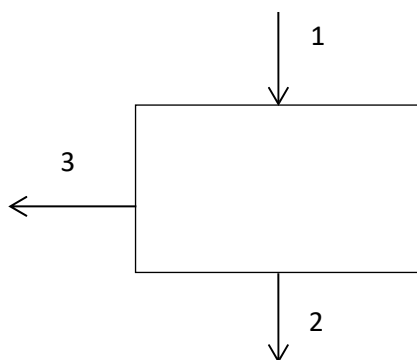
(Λογγινού, 2010)

Η απόδοση της μονάδας αφυδάτωσης εξαρτάται από το ποσοστό συγκράτησης στερεών CR (%) που επιτυγχάνει, όπως ακριβώς και στην πάχυνση της ιλύος.

### 3.8.2 Προσομοίωση αφυδάτωσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι διαδικασίες είναι περίπου ίδιες με τη πάχυνση αφού και εδώ θεωρείται ένα ποσοστό συγκράτησης στερεών. Η διαφορά με την πάχυνση είναι η συγκέντρωση με την οποία εξέρχεται η ιλύς, η οποία στην προσομοίωση μας θεωρείται 25%=250kg/m<sup>3</sup>.

Στη συνέχεια καταγράφονται οι εξισώσεις για τις δυο εξόδους της αφυδάτωσης.



Σχήμα 3. 5: Διακριτοποίηση των θέσεων της μονάδας αφυδάτωσης

α) Εξερχόμενη Ιλύς προς διάθεση (Θέση 2)

Με βάση το ποσοστό CR θα έχουμε ότι η μάζα των ολικών αιωρούμενων στερεών TSS θα είναι:

$$M_{TSS(2)} = M_{TSS(1)} \cdot \frac{CR}{100}$$

Γνωρίζοντας επίσης ότι η συγκέντρωση των TSS είναι 25% μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή από την σχέση:

$$Q(2) = \frac{M_{TSS(2)}}{TSS(2)} = \frac{M_{TSS(2)}}{250}$$

Γνωρίζοντας την εξερχόμενη παροχή υπολογίζεται η συγκέντρωση κάθε σωματιδιακού συστατικού. Πιο συγκεκριμένα, η εξερχόμενη μάζα και η συγκέντρωση για κάθε σωματιδιακό συστατικό θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$M_X(2) = M_X(1) \cdot \frac{CR}{100}$$

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

Τα διαλυτά συστατικά θα διατηρήσουν αμετάβλητη τη συγκέντρωσή τους. Επομένως, για κάθε διαλυτό συστατικό θα ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\begin{aligned} S(2) &= S(1) \\ M_S(2) &= Q(2) \cdot S(2) \end{aligned}$$

β) Στραγγίδια (Θέση 3)

Η παροχή των στραγγιδίων θα ισούται με:

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

Η μάζα και η συγκέντρωση κάθε σωματιδιακού συστατικού θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} M_X(3) &= M_X(1) - M_X(2) \\ X(3) &= \frac{M_X(3)}{Q(3)} \end{aligned}$$

Η συγκέντρωση των διαλυτών στοιχείων παραμένει σταθερή και από την παροχή των στραγγιδίων υπολογίζουμε τη μάζα τους. Οι εξισώσεις για κάθε διαλυτό συστατικό είναι:

$$\begin{aligned} S(3) &= S(1) \\ M_S(3) &= Q(3) \cdot S(3) \end{aligned}$$

γ) Απαιτούμενη ποσότητα πολυηλεκτρολύτη

Εκτιμάται ότι χρησιμοποιούνται για τη πάχυνση 8gr πολυηλεκτρολύτη ανά kg TS. Γνωρίζουμε την ημερήσια μάζα στερεών που διέρχονται από την μονάδα της αφυδάτωσης άρα μπορεί να υπολογιστεί η ημερήσια κατανάλωση του πολυηλεκτρολύτη από την σχέση:

$$M_{\text{πολ.αφυδάτ}} = \frac{8}{100} \cdot M_{\text{TSS}}(1)$$

όπου  $M_{TSS}$  σε kg TS/d.  
(Σαραντόπουλος, 2015)

### 3.9 Γραμμή στραγγιδίων

Τα στραγγίδια ουσιαστικά είναι ότι επιστρέφει στο σύστημα ανάντη της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης από τη βαρυτική πάχυνση, τη μηχανικής πάχυνση και την αφυδάτωση. Οι μάζες τους αθροίζονται και για να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις των στοιχείων διαιρούνται με το σύνολο των παροχών.

Πρέπει να προσεχθεί ότι η σωματιδιακή οργανική ύλη πρέπει να μετατραπεί σε μονάδες COD/ m<sup>3</sup> από TSS/m<sup>3</sup> βάσει της αναλογίας

$$\text{COD/VSS}=1,42 \text{ gr COD/gr VSS.}$$

Για να γίνει έλεγχος υπολογίζεται το ποσοστό που καταλαμβάνουν τα στραγγίδια στην εισροή των λυμάτων σε σχέση με την εισροή στη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης συγκεκριμένα υπολογίζονται οι λόγοι COD, TN, TSS, S<sub>NH</sub> όπως φαίνονται πιο κάτω:

$$\frac{M_{COD_{\text{στραγ}}}}{M_{COD_{\text{εισροή, ΔΠΚ}}}}$$

Όπου  $M_{COD}=(S_I+S_S+X_I+X_S+X_{BH}+X_{AOB}+X_{NOB}) \cdot Q$

$$\frac{M_{TN_{\text{στραγ}}}}{M_{TN_{\text{εισροή, ΔΠΚ}}}}$$

Όπου

$$M_{TN}=(S_{N2}+S_{NO}+S_{NH}+S_{NH2OH}+S_{N2O}+S_{NO2}+S_{NO3}+i_{xb} \cdot (X_{BH}+X_{AOB}+X_{NOB})+i_{xp} \cdot (X_i)) \cdot Q$$

$$\frac{M_{S_{NH_{\text{στραγ}}}}}{M_{S_{NH_{\text{εισροή, ΔΠΚ}}}}}$$

όπου  $M_{S_{NH}} = S_{NH} \cdot Q$

$$\frac{M_{TSS_{\text{στραγ}}}}{M_{TSS_{\text{εισροή, ΔΠΚ}}}}$$

όπου  $M_{TSS} = TSS \cdot Q = (VSS+X_{NV}) \cdot Q$

### 3.10 Κατανάλωση ενέργειας

#### 3.10.1 Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια σε κάθε επεξεργασία.

##### 1) Προεπεξεργασία

Στις μονάδες προεπεξεργασίας θεωρούμε ότι υπάρχει μια κατανάλωση ενέργειας  $E$  σε μονάδες kWh/m<sup>3</sup> εισερχόμενης ροής.

$$E_{\text{προεπεξ}} = E \cdot Q_{\text{εισερχ}}$$

Ο δείκτης  $E$  στην περίπτωση μας θεωρείται ως 0.04 kWh/m<sup>3</sup> εισερχόμενης ροής

##### 2) Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας και Τελικής Καθίζησης

Η κατανάλωση ενέργειας στις δεξαμενές καθίζησης οφείλεται στην ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση των ξέστρων. Θεωρείται μια ισχύ  $P$  (kW) για 24 λειτουργία:

$$E_{\text{δεξαμενής}} = P \cdot 24 \text{ (kWh/d)}$$

Ο δείκτης  $P$  στην περίπτωση μας παίρνει την τιμή 3 kW

##### 3) Βιολογικός Αντιδραστήρας

Η κατανάλωσης ενέργειας στο Βιοαντιδραστήρα οφείλονται είτε στο σύστημα ανάμιξης των δεξαμενών είτε στο σύστημα αερισμού των αερόβιων δεξαμενών.

- **Σύστημα Ανάμιξης**

Για κάθε δεξαμενή θεωρούμε μια δυναμικότητα του συστήματος ανάμιξης  $\Delta$  W/m<sup>3</sup>. Άρα η συνολική κατανάλωση ενέργειας λόγω ανάμιξης θα είναι:

$$E_{BA, \text{ανάμιξης}} = \left( \sum_{i=1}^v \Delta \cdot V_i \right) \cdot \frac{24}{1000}$$

Ο δείκτης  $\Delta$  θεωρήθηκε ίσος με 5 W/m<sup>3</sup>.



- **Σύστημα Αερισμού**

Έχοντας υπολογίσει την απαίτηση οξυγόνου σε τυπικές συνθήκες SOTR σε kg O<sub>2</sub>/h και θεωρώντας μια απόδοση ε kg O<sub>2</sub>/kWh υπολογίζουμε την κατανάλωση ενέργειας από την σχέση:

$$E_{BA,αερισμού} = \frac{SOTR}{\varepsilon}$$

Η απόδοση του συστήματος αερισμού εκτιμήθηκε ίση με 3.5 kg O<sub>2</sub>/kWh.

#### 4) Παχυντής βαρύτητας

Όπως και στις δεξαμενές καθίζησης η κατανάλωση ενέργειας προέρχεται από τη κίνηση των ξέστρων της. Θεωρώντας ότι τα ξέστρα έχουν ισχύ P kW, έχουμε για την κατανάλωση ενέργειας:

$$E_{παχυντή} = P \cdot 24 \text{ (kWh/d)}$$

Η ισχύς των ξέστρων θεωρήθηκε ίση με 2 kW.

#### 5) Μηχανική Πάχυνση

Υποθέτουμε ότι η πάχυνση της βιολογικής ιλύος γίνεται σε τράπεζες πάχυνσης με δυναμικότητα Δ kg SS/m/h και απορροφόμενη ισχύ P kW. Η σχέση από την οποία προκύπτει η κατανάλωση ενέργειας είναι:

$$E_{ΠΒΙ} = \frac{M_{TSS}}{n \cdot l \cdot \Delta} \cdot P \quad \left(\frac{kWh}{d}\right)$$

όπου M<sub>TSS</sub> : η μάζα των στερεών που πάει στη μηχανική πάχυνση (kg SS/d)

n : ο αριθμός των τραπεζών πάχυνσης

l : το πλάτος των τραπεζών πάχυνσης (m)

Δ : η δυναμικότητα κάθε τράπεζας πάχυνσης (kg SS/m/h)

P : η απορροφόμενη ισχύς (kW)

Θεωρήθηκε ότι χρησιμοποιούνται 3 τράπεζες πάχυνσης πλάτους 2 m, με δυναμικότητα 150 kg SS/m/h και απορροφόμενη ισχύ 2 kW.

## 6) Χωνευτής Ιλύος

Στον Χωνευτή Ιλύος έχουμε κατανάλωση ενέργειας λόγω ανάμιξης. Έστω το σύστημα ανάμιξης έχει δυναμικότητα  $\Delta \text{ W/m}^3$ , η κατανάλωση ενέργειας θα είναι:

$$E_{XI} = \frac{24}{1000} \cdot \Delta \cdot V_{X\Omega N} \quad \left( \frac{kWh}{d} \right)$$

Και για αυτό το σύστημα ανάμιξης θεωρήθηκε δυναμικότητα ίση με  $5 \text{ W/m}^3$ .

## 7) Αφυδάτωση Ιλύος

Η αφυδάτωση μοιάζει με την μηχανική πάχυνση θεωρούμε ότι γίνεται μηχανικά με ταινιοφιλτρόπρεσσες δυναμικότητας  $\Delta \text{ kg SS/m/h}$  και απορροφόμενης ισχύς  $P \text{ kW}$ . Για την λειτουργία των πρέσων, χρησιμοποιείται ένας κινητήρας με ισχύ  $P_{κιν} \text{ kW}$ , που λειτουργεί  $t$  ώρες την ημέρα

$$E_{αφυδάτωση} = \frac{M_{TSS}}{n \cdot l \cdot \Delta} \cdot P + P_{κιν} \cdot t \quad \left( \frac{kWh}{d} \right)$$

όπου  $M_{TSS}$  : η μάζα των στερεών που πάει στην αφυδάτωση (kg SS/d)  $n$

: ο αριθμός των ταινιοφιλτροπρεσσών

$l$  : το πλάτος των ταινιοφιλτροπρεσσών (m)

$\Delta$  : η δυναμικότητα κάθε ταινιοφιλτρόπρεσσας (kg

SS/m/h)  $P$  : η απορροφόμενη ισχύς (kW)

$P_{κιν}$  : η απορροφόμενη ισχύς του κινητήρα

(kW)  $t$  : οι ώρες λειτουργίας του κινητήρα

Για την προσομοιούμενη εγκατάσταση θεωρήθηκε ότι χρησιμοποιούνται 3 ταινιοφιλτρόπρεσσες πλάτους 2 m, δυναμικότητας 150 kg SS/m/h και απορροφόμενης ισχύος 2,5 kW. Επίσης επιλέχθηκε κινητήρας με ισχύ 5 kW, ο οποίος λειτουργεί για 8 ώρες την ημέρα.

## 8) Ενέργεια άντλησης

Η ενέργεια άντλησης υπολογίζεται από το άθροισμα των καταναλώσεων ενέργειας που εμφανίζονται στις παρακάτω θέσεις της εγκατάστασης:

- Ανακυκλοφορία ιλύος
- Εσωτερική Ανακυκλοφορία Ιλύος
- Αντληση Πρωτοβάθμιας Ιλύος
- Αντληση Περίσσειας Ιλύος
- Αντληση Παχυμένης Ιλύος
- Δοσομετρικές Αντλίες Πολυηλεκτρολύτη

Στις τέσσερις πρώτες περιπτώσεις η κατανάλωση ενέργειας δίνεται από την σχέση:

$$E_{αντ} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q(i) \cdot H_{\mu}(i)}{\varepsilon_{αποδ}} \cdot \frac{24}{1000}$$

όπου  $\rho$  : η πυκνότητα των λυμάτων, ίση με  $1000 \text{ kg/m}^3$

$g$  : η επιτάχυνση της βαρύτητας, ίση με  $9,81 \text{ m/s}^2$

$Q$  : η παροχή που αντλείται σε κάθε περίπτωση, σε  $\text{m}^3/\text{s}$

$\varepsilon$  : η απόδοση του αντλιοστασίου, που θεωρήθηκε ίση με 0,65

$H_{\mu}$  : το μανομετρικό ύψος κάθε αντλίας, σε m, και

ειδικότερα:

- για την ανακυκλοφορία ιλύος θεωρούμε  $H_{\mu}=4 \text{ m}$
- για την εσωτερική ανακυκλοφορία ιλύος θεωρούμε  $H_{\mu}=1 \text{ m}$
- για την άντληση πρωτοβάθμιας ιλύος θεωρούμε  $H_{\mu}=7 \text{ m}$
- για την άντληση περίσσειας ιλύος θεωρούμε  $H_{\mu}=7 \text{ m}$

Τα αντλιοστάσια παχυμένης ιλύος χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της ιλύος από τις παχύνσεις στην χώνευση και στη συνέχεια στην αφυδάτωση. Συνεπώς, θεωρούμε ότι χρησιμοποιούνται τρία αντλιοστάσια παχυμένης ιλύος, σε καθένα από τα οποία περιέχονται n αντλίες θετικής εκτόπισης με απορροφόμενη ισχύ P kW.

Αν οι αντλίες αυτές λειτουργούν t ώρες την ημέρα, η συνολική κατανάλωση ενέργειας στα αντλιοστάσια Παχυμένης Ιλύος θα είναι:

$$E_{αντ,ΠΙ} = 3 \cdot n \cdot P \cdot t \quad \left( \frac{kWh}{d} \right)$$

Για την παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκε ότι σε κάθε αντλιοστάσιο παχυμένης ιλύος περιέχονται 3 αντλίες με απορροφόμενη ισχύ 5 kW, οι οποίες λειτουργούν 8 ώρες ανά ημέρα.

Για την δοσομέτρηση του πολυηλεκτρολύτη, που προστίθεται στη μηχανική πάχυνση και την αφυδάτωση, χρησιμοποιείται μια αντλία σε κάθε βαθμίδα με ισχύ P kW. Για t ώρες λειτουργίας η ενέργεια άντλησης του πολυηλεκτρολύτη θα είναι:

$$E_{αντ,ΠΙ} = 2 \cdot P \cdot t \quad \left( \frac{kWh}{d} \right)$$

Στην παρούσα προσομοίωση επιλέχθηκαν αντλίες με απορροφόμενη ισχύ 3 kW, ενώ ο χρόνος λειτουργίας τους εκτιμήθηκε ίσος με 8 ώρες ανά ημέρα. Η συνολική ενέργεια άντλησης είναι το άθροισμα όλων των παραπάνω περιπτώσεων.

Η συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια (E<sub>κατ</sub>) ισούται με το άθροισμα όλων των καταναλώσεων ενέργειας σε κάθε στάδιο. Όπως έγινε με τα στραγγίδια θα γίνει μια σύγκριση της καταναλισκόμενης ενέργειας με την παροχή εισόδου, την απομάκρυνση του αζώτου και του COD.

- **Καταναλισκόμενη Ενέργεια προς παροχή εισόδου**

$$\frac{\text{Ολική καταναλισκόμενη ενέργεια}}{\text{Παροχή εισόδου}} = \frac{E_{TOT}}{Q_{in}} \quad kWh/m^3$$

- **Καταναλισκόμενη Ενέργεια προς την ποσότητα διασπώμενου COD**

$$\frac{\text{Ολική καταναλισκόμενη ενέργεια}}{\text{Ποσότητα διασπάσιμου COD}} = \frac{E_{\text{TOT}}}{Q_{\text{in}} \cdot \text{COD}_{\text{in}} - Q_{\text{εξ}} \cdot \text{COD}_{\text{εξ}}} \text{ kWh/m}^3$$

- **Καταναλισκόμενη Ενέργεια προς την ποσότητα απομάκρυνσης αζώτου**

$$\frac{\text{Ολική καταναλισκόμενη ενέργεια}}{\text{Ποσότητα διασπάσιμου COD}} = \frac{E_{\text{TOT}}}{Q_{\text{in}} \cdot \text{TN}_{\text{in}} - Q_{\text{εξ}} \cdot \text{TN}_{\text{εξ}}} \text{ kWh/m}^3$$

### 3.11 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου

#### 3.11.1 Εισαγωγή

Κατά τη λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων εκπέμπονται αέρια θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions – GHG) εξαιτίας διάφορων διεργασιών. Στο παρόν μοντέλο θεωρούμε ότι υπάρχουν άμεσες και έμμεσες εκπομπές στην εγκατάσταση. Συγκεκριμένα, οι άμεσες εκπομπές οφείλονται στη βιολογική βαθμίδα στην κατανάλωση βιοαερίου και πολυηλεκτρολύτη και οι έμμεσες στην κατανάλωση ενέργειας και της διάθεσης της ιλύος

#### 3.11.2 Άμεσες εκπομπές

##### α) Βιολογική Βαθμίδα

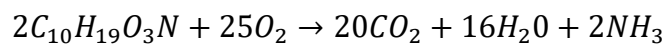
Οι εκπομπές αερίων κατά τη διάρκεια της βιολογικής επεξεργασίας εκτιμήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις παρακάτω διαδικασίες:

- Παραγωγή CO<sub>2</sub> λόγω παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας
- Παραγωγή CO<sub>2</sub> λόγω απονιτροποίησης
- Κατανάλωση CO<sub>2</sub> λόγω της παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας
- Παραγωγή N<sub>2</sub>O (σε ισοδύναμο CO<sub>2</sub>) λόγω ανοξικής ανάπτυξης των ετεροτροφικών καθώς και νιτροποίησης και απονιτροποίησης των νιτροποιητών

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι συγκεντρώσεις των συστατικών εισέρχονται σε όρους gr VSS/m<sup>3</sup> και όχι σε όρους gr COD/m<sup>3</sup> όπου ισχύει η σχέση 1 gr VSS = 1,42 gr COD.

##### • Παραγωγή CO<sub>2</sub> λόγω παραγωγής βιομάζας

Η παραγωγή CO<sub>2</sub> λόγω παραγωγής βιομάζας και κατανάλωσης τροφής φαίνεται στην πιο κάτω χημική αντίδραση, όπου η χημική σύνθεση της βιομάζας εκτιμάται ως C<sub>10</sub>H<sub>19</sub>O<sub>3</sub>N:



Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι καταναλώνονται 25 moles O<sub>2</sub> που παράγουν 20 moles CO<sub>2</sub> είναι (25·32) : (20·44) = 1:1,1. Επομένως, για 1 kg O<sub>2</sub> που

καταναλώνεται παράγονται 1,1 kg CO<sub>2</sub>.

Από τον στοιχειομετρικό πίνακα έχουμε ότι το οξυγόνο που καταναλώνεται κατά την αερόβια ανάπτυξης ετεροτροφικής βιομάζας είναι  $((1-Y_H)/Y_H) \cdot \rho_5 \cdot V$ .

Άρα, η παραγωγή CO<sub>2</sub> λόγω παραγωγής βιομάζας σε μια δεξαμενή I σε χρονικό διάστημα dt θα ισούται με:

$$CO_{2,biomass} = 1,1 \frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot \rho_5(I) \cdot V(I)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την παραγωγή CO<sub>2</sub> σε kg ανά χρονικό βήμα ολοκλήρωσης. Ολοκληρώνοντας για κλίμακα ημέρας και προσθέτοντας για όλες τις αερόβιες δεξαμενές, έχουμε την παραγωγή CO<sub>2</sub> σε kg/d.

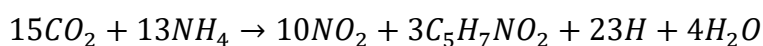
#### • Παραγωγή CO<sub>2</sub> λόγω απονιτροποίησης ανάπτυξη ετεροτροφικής βιομάζας

Ισχύει η αντίδραση όπως πιο πάνω με τη διαφορά ότι θα ενταχθούν οι εξισώσεις που αφορούν την ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας σε ανοξικές συνθήκες

$$CO_{2,biomass} = 1,1 \frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot (\rho_6(I) + \rho_7(I) + \rho_8(I) + \rho_9(I)) \cdot V(I)$$

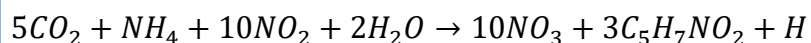
#### • Κατανάλωση CO<sub>2</sub> λόγω παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας

Η κατανάλωση CO<sub>2</sub> χωρίζεται σε 2 αντιδράσεις μια που αφορά τους αυτοτροφικούς και μια τους νιτροποιητές οργανισμούς. Συγκεκριμένα η χημική αντίδραση σε αυτοτροφικούς οργανισμούς είναι η εξής:



Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι καταναλώνονται 15 moles CO<sub>2</sub> ανά 13 moles NH<sub>4</sub> - N ο λόγος τους είναι  $(15 \cdot 44) : (13 \cdot 14) = 3.63:1$ . Επομένως, για 3.63 kg CO<sub>2</sub> που καταναλώνεται 1 kg NH<sub>4</sub> - N .

Η χημική αντίδραση για τους νιτροποιητές είναι η εξής:



Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι καταναλώνονται 5 moles CO<sub>2</sub> ανά 10 moles NO<sub>2</sub> - N και 1 mole NH<sub>4</sub> - N ο λόγος τους είναι  $(5 \cdot 44) : (11 \cdot 14) = 1.43:1$ . Επομένως

για 1.43 kg CO<sub>2</sub> που καταναλώνεται 1 kg N .

Επομένως, η κατανάλωση CO<sub>2</sub> λόγω παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας σε μια δεξαμενή I σε χρονικό διάστημα dt θα ισούται με:

$$CO_{2,biomass} = \left( -\frac{3.63}{Y_{AOB}} \cdot \rho_{12}(I) - \frac{1.43}{Y_{NOB}} \cdot \rho_{16}(I) \right) \cdot V(I)$$

#### • Παραγωγή N<sub>2</sub>O σε ισοδύναμο CO<sub>2</sub>

Η παραγωγή N<sub>2</sub>O όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια υπολογίζεται αναλυτικά συγκεκριμένα παράγεται στις δεξαμενές αερισμού αφού μια ογκομετρική μάζα του υποξειδίου του αζώτου μεταδίδεται από το νερό στον αέρα :

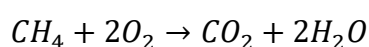
$$CO_{2,N_2O} = 0.91 * KLA(K) * S_{N_2O} * dt * \frac{296}{1000} \left( \frac{kgCO_2}{d} \right)$$

#### β) Κατανάλωση Βιοαερίου

Η συνολική παραγωγή εκπομπών από το βιοαέριο οφείλονται στην χρήση του βιοαερίου για παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, στην παραγωγή CO<sub>2</sub> από χρήση βιοαερίου για παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας καθώς απώλειες τους χωνευτή.

Για το βιοαέριο αυτό θεωρήθηκε ότι περιέχει 62,5% CH<sub>4</sub> και 37,5% CO<sub>2</sub>. Επομένως, σε 1m<sup>3</sup> βιοαερίου περιέχονται 0,625 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> και 0,375 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι 1 m<sup>3</sup> περιέχει 0,625/(22,4·16)=0,446 kg CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> και 0,375/(22,4·44)=0,737 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

Το βιοαέριο καίγεται είτε για τη θέρμανση του χωνευτή είτε για την κάλυψη άλλων θερμικών και ηλεκτρικών απαιτήσεων. Η χημική αντίδραση που περιγράφει την καύση του είναι:



Θεωρώντας ότι το 1% του βιοαερίου διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, η σχέση με



την οποία δίνονται οι συνολικές εκπομπές αερίων σε ισοδύναμο CO<sub>2</sub> από την καύση του βιοαερίου θα είναι:

$$CO_{2,bio\text{gas}} = 0.99 \cdot (0.737 \cdot Q_{bio\text{gas}} + 0.446 \cdot \frac{44}{16} \cdot Q_{bio\text{gas}}) \left( \frac{kgCO_2}{d} \right)$$

#### • Διαφυγές βιοαερίου στην ατμόσφαιρα

Οι διαφυγές εκτιμώνται ως ένα ποσοστό της τάξης του 1%. Οι εκπομπές λόγω διαφυγών δίνονται από την σχέση:

$$CO_{2,bio\text{gas}} = 0.01 \cdot (0.737 \cdot Q_{bio\text{gas}} + 0.446 \cdot 23 \cdot Q_{bio\text{gas}}) \left( \frac{kgCO_2}{d} \right)$$

#### γ) Κατανάλωση Πολυηλεκτρολύτη

Η μάζα του πολυηλεκτρολύτη χρησιμοποιείται σε μηχανική πάχυνση και αφυδάτωση, άρα μπορούμε να υπολογίσουμε τις εκπομπές CO<sub>2</sub> θεωρώντας μια αναλογία 1,7 kg CO<sub>2</sub>/kg πολυηλ. Άρα η παραγωγή CO<sub>2</sub> από την χρήση χημικών θα ισούται με:

$$CO_{2,πολυηλ} = 1.7 \cdot (M_{ΠΟΛ,ΠΑΧ} + M_{ΠΟΛ,ΑΦΥΔ}) \text{ ( kg CO}_2\text{/kg πολυηλ)}$$

### 3.11.3 Έμμεσες εκπομπές

#### α) Κατανάλωση Ενέργειας

Οι εκπομπές που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας εξαρτώνται τόσο από το ποσοστό που χρησιμοποιείται το κάθε καύσιμο στην χώρα που αναφερόμαστε όσο και από τον συντελεστή εκπομπών κάθε καυσίμου. Για την Ελλάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10. Η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια υπολογίζεται αφαιρώντας την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το βιοαέριο, που έχουν υπολογιστεί πιο κάτω φαίνεται η εξίσωση:

$$CO_{2,ηλεκτρ,ενέργεια} = (E_{κατ} - E_{βιοαερ}) \cdot \left( \sum (F_I \cdot EF_I) \right) \cdot \frac{1}{1000} \text{ (kgCO}_2\text{/d)}$$

όπου E<sub>κατ</sub> : η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh/d)

Εβιοαερ : η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το βιοαέριο (kWh/d).

$F_i$  : ποσοστιαία συνεισφορά κάθε καυσίμου για να ικανοποιηθεί η απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα.

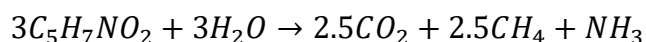
$EF_i$  : συντελεστής εκπομπών GHG του κάθε καυσίμου κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (gr CO<sub>2</sub>/kWh).

Πίνακας 3. 14: Συνεισφορά καυσίμων για ικανοποίηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης στην Ελλάδα και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου για κάθε καύσιμο

| Τύπος καυσίμου                                | Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε καυσίμου στην Ελλάδα (%) | Συντελεστής εκπομπών GHG (gr CO <sub>2</sub> /kWh) |
|---|---|--|
| Λιγνίτης                                      | 53.0  | 87   |
| Πετρέλαιο                                     | 9.85  | 60   |
| Φυσικό Αέριο                                  | 18.4  | 35   |
| Υδροηλεκτρικά και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας | 18.6<br>0   | 0  |

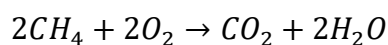
## β) Διάθεση Ιλύος

Στην παρούσα διπλωματική θεωρήθηκε ότι θεωρήθηκε ότι η παραγόμενη ιλύς διατίθεται σε ΧΥΤΑ. Η ιλύς αντιπροσωπεύεται από τη χημική σύνθεση C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>O<sub>2</sub>N, ενώ η οξείδωση του οργανικού φορτίου στον ΧΥΤΑ δίνεται από την πιο κάτω χημική αντίδραση:



Όπως φαίνεται πιο πάνω για 1 kg VS/d που διατίθεται σε ΧΥΤΑ παράγονται 110/113 kg CO<sub>2</sub>/d και 40/113 kg CH<sub>4</sub>/d.

Η χημική αντίδραση μετατροπής του μεθανίου σε διοξείδιο του άνθρακα είναι η εξής:



Επομένως, το συνολικό CO<sub>2</sub> που παράγεται κατά τη διάθεση της ιλύος στον ΧΥΤΑ δίνεται από την σχέση:

$$CO_{2,ΧΥΤΑ} = \frac{110}{113} \cdot M_{VSS} + \frac{40}{113} \cdot \frac{44}{16} \cdot M_{VSS} \left( \frac{kgCO_2}{d} \right)$$

όπου M<sub>VSS</sub> : η ποσότητα του οργανικού φορτιού της ιλύος που διατίθεται (kg VS/d)

Οι συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε ισοδύναμο CO<sub>2</sub> (CO<sub>2,ολ</sub>) είναι το άθροισμα όλων των επιμέρους εκπομπών.

#### 3.11.4 Δείκτες εκπομπών αερίων θερμοκηπίου

Για να υπάρχει μια εποπτεία στην εγκατάσταση τοποθετούνται δείκτες. Οι δείκτες αυτοί είναι παρόμοιοι με αυτούς της κατανάλωσης ενέργειας. Επομένως, θα έχουμε:

- **Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου προς παροχή εισόδου**

$$\frac{\text{Εκπομπές Αερίου Θερμοκηπίου}}{\text{Παροχή εισόδου}} = \frac{CO_{2,ολ}}{Q_{εισ}}$$

- **Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου προς ποσότητα διασπώμενου COD**

$$\frac{\text{Εκπομπές Αερίου Θερμοκηπίου}}{\text{Διασπώμενο COD}} = \frac{CO_{2,ολ}}{Q_{εισ} * COD_{εισ} - Q_{εξ} * COD_{εξ}}$$

- **Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου προς ποσότητα απομακρυνόμενου αζώτου**

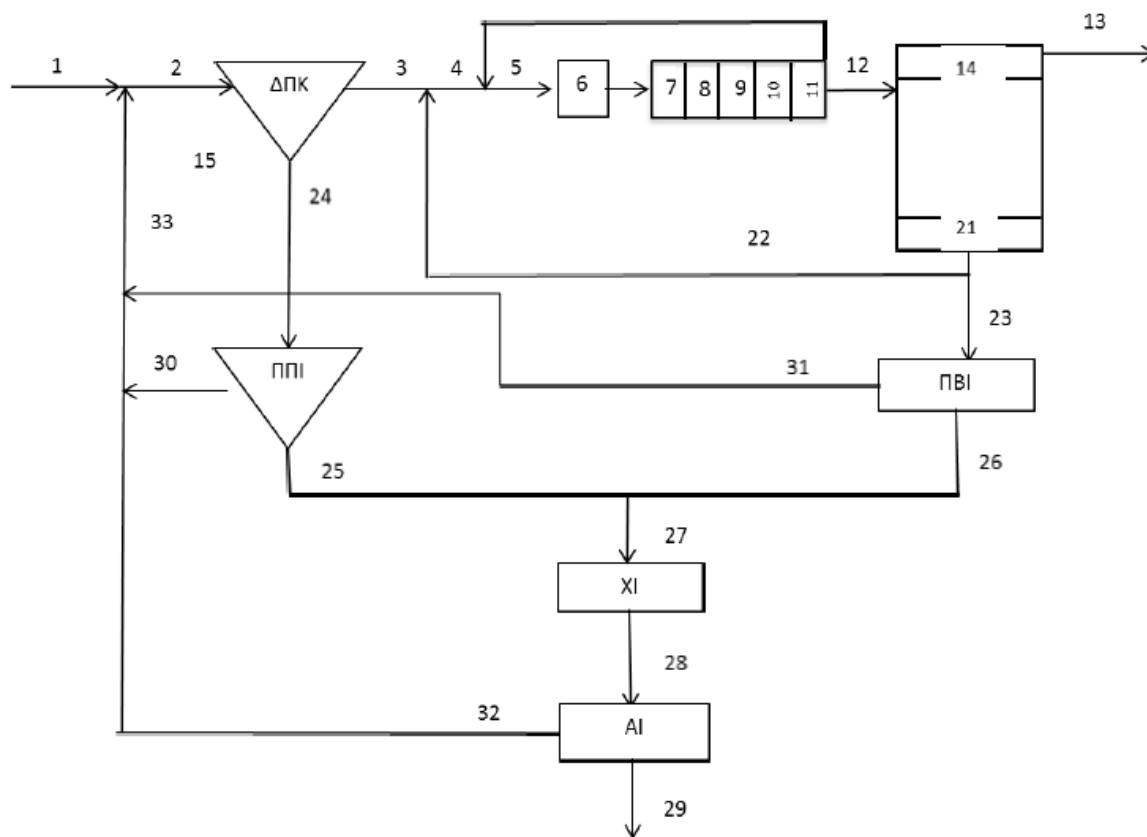
$$\frac{\text{Εκπομπές Αερίου Θερμοκηπίου}}{\text{Ποσότητα απομακρυνόμενου Αζώτου}} = \frac{CO_{2,ολ}}{Q_{εισ} * TN_{εισ} - Q_{εξ} * TN_{εξ}}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 4.1 Προσομοιούμενο σύστημα:

Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε για μία τυπική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων η οποία αποτελείται από μονάδα προεπεξεργασίας, μονάδα πρωτοβάθμιας καθίζησης, σύστημα ενεργού ιλύος, μονάδες πάχυνσης πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος μονάδα αναερόβιας χώνευσης και μηχανικής αφυδάτωσης (Σχήμα 4.1):

Το σύστημα ενεργού ιλύος αποτελείται από έναν βιολογικό αντιδραστήρα ο οποίος περιλαμβάνει μία σειρά από διαμερίσματα ως εξής: ανοξικό διαμέρισμα 7880 m<sup>3</sup>, τέσσερα αεριζόμενα διαμερίσματα όγκου 4585 m<sup>3</sup>, 4585 m<sup>3</sup>, 2847 m<sup>3</sup>, 2847 m<sup>3</sup> και μία ζώνη απαερίωσης όγκου 695 m<sup>3</sup>. Η καθίζηση και διαύγαση των στερεών πραγματοποιείται σε δεξαμενή καθίζησης επιφάνειας 6000 m<sup>2</sup> και βάθους 4,5m



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Προσομοιωμένης Εγκατάστασης( Σαραντόπουλος 2015)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αρχικές συγκεντρώσεις του λυμάτων στην είσοδο της εγκατάστασης καθώς και σε διάφορες άλλες θέσεις (Πίνακας 4.1). Οι αρχικές συγκεντρώσεις σε άλλες θέσεις χρησιμοποιήθηκαν ουσιαστικά για την γρηγορότερη σύγκλιση του συστήματος (Πίνακας 4.2)

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά λυμάτων που εισέρχονται στην εγκατάσταση

| Παράμετρος                        | Ερμηνεία                          | Τιμή  | Μονάδες           |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------|-------------------|
| Q(1)                              | Παροχή                            | 62000 | m <sup>3</sup> /d |
| S <sub>i</sub> (1)                | Αδρανής Διαλυμένη Οργανική Ύλη    | 30.0  | mg/l              |
| X <sub>i</sub> (1)                | Αδρανής Αιωρούμενη Οργανική Ύλη   | 30.0  | mg/l              |
| S <sub>s</sub> (1)                | Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη | 140.0 | mg/l              |
| X <sub>s</sub> (1)                | Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη   | 250.0 | mg/l              |
| X <sub>BH</sub> (1)               | Ετεροτροφική Βιομάζα              | 28.8  | mg/l              |
| X <sub>ΑΟΒ</sub> (1)              | Αυτοτροφική Βιομάζα               | 0.1   | mg/l              |
| X <sub>ΝΟΒ</sub> (1)              | Νιτροποιητική Βιομάζα             | 0.1   | mg/l              |
| S <sub>Ο</sub> (1)                | Διαλυμένο Οξυγόνο                 | 0.1   | mg/l              |
| S <sub>ΝΟ</sub> (1)               | Μονοξειδίο του αζώτου             | 0.0   | mg/l              |
| S <sub>ΝΗ</sub> (1)               | Αμμωνιακό Άζωτο                   | 36.0  | mg/l              |
| S <sub>ΝΟ<sub>2</sub></sub> (1)   | Νιτρώδη                           | 0.0   | mg/l              |
| S <sub>ΝΟ<sub>3</sub></sub> (1)   | Νιτρικά                           | 0.0   | mg/l              |
| S <sub>Ν<sub>2</sub></sub> (1)    | Αέριο Άζωτο                       | 0.0   | mg/l              |
| S <sub>Ν<sub>2</sub>Ο</sub> (1)   | Αέριο υποξειδίου του αζώτου       | 0.0   | mg/l              |
| S <sub>ΝΗ<sub>2</sub>ΟΗ</sub> (1) | Υδροξυλαμίνη                      | 0.0   | mg/l              |
| S <sub>ΡΟ<sub>4</sub></sub> (1)   | Φωσφορικά                         | 9.0   | mg/l              |
| X <sub>ΝV</sub> (1)               | Ανόργανη σωματιδιακή ύλη          | 75.0  | mg/l              |
| S <sub>ΑLK</sub> (1)              | Αλκαλικότητα                      | 500.0 | mg/l              |

Πίνακας 4.2: Αρχικές συγκεντρώσεις συστατικών

| Παράμετρος         | Θέση 6 | Θέσεις 7-12 και 15-20 | Θέσεις 13-14 | Θέσεις 21-23 |
|--------------------|--------|-----------------------|--------------|--------------|
| S <sub>I</sub>     | 30.0   | 30.0                  | 30.0         | 30.0         |
| X <sub>i</sub>     | 500.0  | 500.0                 | 2.0          | 2000.0       |
| S <sub>S</sub>     | 80.0   | 80.0                  | 5.0          | 5.0          |
| X <sub>S</sub>     | 45.0   | 45.0                  | 3.0          | 100.0        |
| X <sub>BH</sub>    | 1500.0 | 1500.0                | 10.0         | 5000.0       |
| X <sub>AOB</sub>   | 20     | 20.0                  | 3.0          | 150.0        |
| X <sub>NOB</sub>   | 25     | 20.0                  | 3.0          | 150.0        |
| S <sub>O</sub>     | 0.01   | 2.0                   | 2.0          | 2.0          |
| S <sub>NO</sub>    | 1.0    | 1.0                   | 0.1          | 0.1          |
| S <sub>NH</sub>    | 28.0   | 28.0                  | 10.0         | 10.0         |
| S <sub>NO2</sub>   | 0.01   | 0.01                  | 0.01         | 0.01         |
| S <sub>NO3</sub>   | 0.01   | 0.01                  | 0.01         | 0.01         |
| S <sub>N2</sub>    | 0.0    | 0.0                   | 0.0          | 0.0          |
| S <sub>N2O</sub>   | 0.0    | 0.0                   | 0.0          | 0.0          |
| S <sub>NH2OH</sub> | 0.0    | 0.0                   | 0.0          | 0.0          |
| S <sub>PO4</sub>   | 0.01   | 0.01                  | 0.01         | 0.01         |
| X <sub>NV</sub>    | 10.0   | 10.0                  | 1.0          | 100.0        |
| S <sub>ALK</sub>   | 0.0    | 0.0                   | 0.0          | 0.0          |

## 4.2 Σενάρια Προσομοίωσης

Στόχος της εφαρμογής του μοντέλου ήταν η διερεύνηση της επίδρασης αφενός στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων και αφετέρου λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοση της εγκατάστασης, στην κατανάλωση και παραγωγή ενέργειας καθώς και στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων κάθε σεναρίου γίνεται ως εξής: Αρχικά, αναφέρεται ο στόχος του σεναρίου καθώς και το εύρος τιμών που έλαβε η κάθε παράμετρος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με την μορφή πινάκων και σχημάτων και ακολουθεί ο σχολιασμός τους. Σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζεται ο λόγος των εκπομπών αερίου υποξειδίου του αζώτου προς το ολικό άζωτο. Οι άλλοι πίνακες που παρουσιάζονται σε κάθε σενάριο διαφέρουν για να παρουσιάζονται οι πληροφορίες που είναι κρίσιμες για κάθε σενάριο.

Επισημαίνεται ότι εκτός των τιμών του Πίνακα 3.3 σε κάθε σενάριο χρησιμοποιήθηκαν και οι ακόλουθες συνθήκες:

- Ο χρόνος παραμονής των στερεών είναι 10 μέρες
- Το pH έχει τιμή 7.0
- Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή 20°C
- Ο βαθμός απόδοσης της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι 50%
- Οι τέσσερις αεριζόμενες δεξαμενές έχουν ρυθμισμένο το επίπεδο του διαλυμένου οξυγόνου στα 2 gr COD/m<sup>3</sup>
- Ο δείκτης καθιζησιμότητας SVI εκτιμάται ίσος με 125
- Ο συντελεστής ανακυκλοφορίας r θεωρείται ίσος με 0.8 και ο δείκτης εσωτερικής ανακυκλοφορίας 2.5
- Τέλος το ποσοστό συγκράτηση των στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης είναι 95%

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα σενάρια που θα αναλυθούν.

Πίνακας 4.3: Εξεταζόμενα σενάρια

| Σενάρια  | Περιγραφή σεναρίων  |
|----------|---|
| <b>1</b> | <b><i>Διερεύνηση της επίδρασης των στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων στην απόδοση της εγκατάστασης</i></b>                                      |
| 1.1      | Επίδραση του συντελεστή απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας $Y_H$ στην απόδοση της εγκατάστασης   |
| 1.2      | Επίδραση του συντελεστή απόδοσης των AOB $Y_{AOB}$ στην απόδοση της εγκατάστασης  |
| 1.3      | Επίδραση του συντελεστή απόδοσης των NOB $Y_{NOB}$ στην απόδοση της εγκατάστασης  |
| 1.4      | Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών μη στην απόδοση της εγκατάστασης   |
| 1.5      | Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των AOB $\mu_{AOB}$ στην απόδοση της εγκατάστασης  |
| 1.6      | Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των NOB $\mu_{NOB}$ στην απόδοση της εγκατάστασης  |
| 1.7      | Επίδραση του συντελεστή ημι-κορεσμού της αμμωνίας $k_{NH}$ στην απόδοση της εγκατάστασης  |
| 1.8      | Επίδραση του συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας $k_s$ στην απόδοση της εγκατάστασης   |
| 1.9      | Επίδραση του μέγιστου ρυθμού της αντίδραση με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση (AMO) $q_{AOBAMO}$ στην απόδοση της εγκατάστασης                     |
| 1.10     | Επίδραση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας της νιτροποίησης των νιτροποιητών $q_{AOBN_2O_{NN}}$ στην απόδοση της εγκατάστασης    |
| 1.11     | Επίδραση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής $N_2O$ μέσω της διεργασίας της απονιτροποίησης των νιτροποιητών $q_{AOBN_2O_{ND}}$ στην απόδοση της εγκατάστασης |
| 1.12     | Επίδραση του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγή (HAO) $q_{AOBHAO}$ στην απόδοση της εγκατάστασης               |



|      |  |
|------|--|
| 1.13 | Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή νιτρώδων σε νιτρικό οξείδιο $n_{g3}$ στην απόδοση της εγκατάστασης                                |
| 1.14 | Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε αέριου υποξειδίου του αζώτου $n_{g4}$ στην απόδοση της εγκατάστασης |
| 1.15 | Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του υποξειδίου αζώτου σε αέριο άζωτο $n_{g5}$ στην απόδοση της εγκατάστασης                       |
| 2    | <b><i>Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας στην απόδοση της εγκατάστασης</i></b>  |
| 2.1  | Επίδραση του χρόνου παραμονής στερεών $\Theta_c$ στην απόδοση της εγκατάστασης   |
| 2.2  | Επίδραση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης στην απόδοση της εγκατάστασης   |
| 2.3  | Επίδραση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης   |
| 2.4  | Επίδραση των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα στην απόδοση της εγκατάστασης                                 |

### 4.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.3.1 Διερεύνηση της επίδρασης των στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων στην απόδοση της εγκατάστασης

4.3.1.1 Σενάριο 1.1 Επίδραση του συντελεστή απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας  $Y_H$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

#### Στόχος σεναρίου:

Ο προσδιορισμός της επίδρασης της τιμής του συντελεστή απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας  $Y_H$  στη λειτουργία της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής της  $Y_H$  που κυμαίνεται μεταξύ 0.5 μέχρι 0.67. Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα σεναρίου, σχολιασμός:

Ο συντελεστής απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας λογικό είναι όσο αυξάνεται να αυξάνει και η ετεροτροφική βιομάζα. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται η παραγόμενη ενέργεια από την καύση του βιοαερίου και η ενέργεια που παράγεται. Όπως παρατηρούμε λόγω της

αύξησης της απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας παράγονται περισσότεροι μικροοργανισμοί άρα αυξάνεται και η βιομάζα και συνεπώς και η ιλύ που οδηγείται στην αναερόβια χώνευση.

Πίνακας 4.4: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| $Y_H$ | Παραγωγή Βιοαερίου ( $10^6$ kcal/d) | Θερμική Ενέργεια ( $10^6$ kcal/d) | Ηλεκτρική ενέργεια ( $10^6$ kcal/d) | Απώλειες Ενέργειας ( $10^6$ kcal/d) | Περίσσια θερμικής ενέργειας ( $10^6$ kcal/d) |
|-------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 0.5   | 19.17                               | 9.59                              | 6.71                                | 2.88                                | 5.44   |
| 0.55  | 19.56                               | 9.78                              | 6.85                                | 2.93                                | 5.58   |
| 0.6   | 20.07                               | 10.03                             | 7.02                                | 3.01                                | 5.73   |
| 0.67  | 20.81                               | 10.41                             | 7.28                                | 3.12                                | 5.96   |

Εν συνεχεία της πιο πάνω διαπίστωσης, παρατηρούμε ότι ναι μεν η κατανάλωση ενέργειας παραμένει σχεδόν σταθερή αλλά υπάρχει αύξηση της παραγωγής βιοαερίου. Επομένως, υπάρχει μείωση του κόστους ενέργειας. Για παράδειγμα για βαθμό απόδοσης 0.67 το βιοαέριο καλύπτει το 37% της καταναλισκόμενης ενέργειας (Πίνακας 4.5).

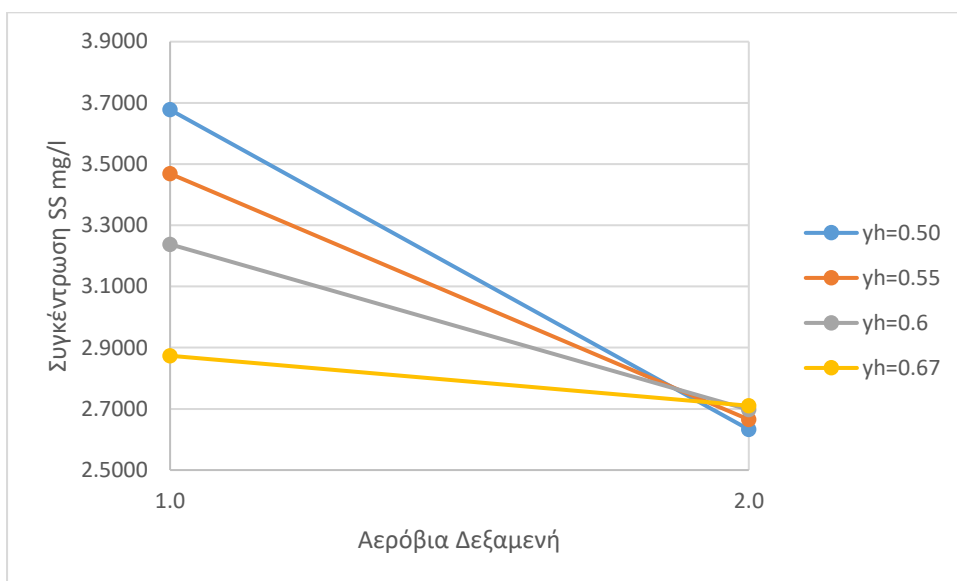
Πίνακας 4.5: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| $Y_H$ | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|-------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.5   | 23592.25                        | 33.08%                        | 0.38               | 0.88      | 13.27   |
| 0.55  | 23442.86                        | 33.96%                        | 0.38               | 0.88      | 13.26   |
| 0.6   | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.67  | 22887.69                        | 37.01%                        | 0.37               | 0.87      | 13.22   |

Στον πιο κάτω πίνακα αναγράφεται η ζήτηση οξυγόνου σε τυπικές συνθήκες SOTR για κάθε αερόβιο διαμέρισμα (Πίνακας 4.6). Η κατανάλωση οξυγόνου συνδέεται άμεσα με την κατανάλωση της οργανικής τροφής, η οποία μειώνεται με την αύξηση της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας ενώ παράλληλα παρατηρείται μείωση της οργανικής τροφής καθώς αυξάνεται η απόδοση της βιομάζας(Σχήμα 4.2). Όπως αναμενόταν υπάρχει μείωση της ζήτησης του οξυγόνου όσο η  $Y_H$  αυξάνεται.

Πίνακας 4. 6 :Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| $Y_H$ | Ημερήσιο $O_2$ (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|-------|-----------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.5   | 18724.75              | 43739.30    | 22059.14     | 13308.53     | 4788.58      | 3546.78      |
| 0.55  | 18352.80              | 42745.91    | 21249.48     | 13058.27     | 4809.68      | 3626.04      |
| 0.6   | 17858.88              | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 0.67  | 17028.01              | 39558.51    | 18901.61     | 12195.13     | 4754.19      | 3701.40      |



Σχήμα 4. 2:Μεταβολή της συγκέντρωσης της Εύκολα Βιοδιασπάσιμης Ύλης στις 2 πρώτες αεριζόμενες δεξαμενές συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

Στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται οι συγκεντρώσεις αζώτου, στερεών και COD στην εκροή της εγκατάστασης (Πίνακας 4.7). Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου παραμένει σταθερή καθώς δεν επηρεάζεται από την τιμή του  $Y_H$ . Η συγκέντρωση του ολικού αζώτου αυξάνεται λόγω της μικρότερης απόδοσης της απονιτροποίησης άρα στην παραμονή περισσότερων νιτρικών. Η παραγωγή περισσότερων ετεροτροφικών μικροοργανισμών οδηγεί σε αύξηση των στερεών και του COD στην έξοδο λόγω της αύξησης της φόρτισης στερεών στην δεξαμενή τελικής καθίζησης. Η ποιότητα εκροής της εγκατάστασης επιβαρύνεται λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης των νιτρικών και του COD.

Πίνακας 4. 7: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| $Y_H$ | $S_{nh,e}$<br>(mg/l) | $N_{tot,e}$<br>(mg/l) | $TSS_e$<br>(mgSS/l) | $COD_e$<br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|-------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| 0.5   | 0.023                | 10.127                | 14.007              | 46.443               | 6054.064         |
| 0.55  | 0.026                | 10.287                | 15.417              | 48.262               | 6558.693         |
| 0.6   | 0.027                | 10.474                | 16.991              | 50.321               | 7134.271         |
| 0.67  | 0.030                | 10.883                | 19.681              | 53.771               | 8122.313         |

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των οργανικών στερεών και των ολικών στερεών σε όρους COD και SS στο τελευταίο αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η αύξηση του  $Y_H$  δείχνει ότι μεγαλύτερο τμήμα της τροφής καταναλώνεται για σύνθεση βιομάζας άρα οι μικροοργανισμοί αυξάνονται.

Πίνακας 4.8: Συγκεντρώσεις οργανικών και ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| $Y_H$ | MLVSS(grVSS/m <sup>3</sup> ) | MLSS(grCOD/m <sup>3</sup> ) | MLSS(grSS/m <sup>3</sup> ) |
|-------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 0.5   | 1453.53                      | 2064.01                     | 2478.63                    |
| 0.55  | 1644.57                      | 2335.28                     | 2669.19                    |
| 0.6   | 1847.45                      | 2623.38                     | 2871.31                    |
| 0.67  | 2168.02                      | 3078.59                     | 3191.87                    |

Επίσης, όπως παρατηρείται στον Πίνακα 4.9 οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζουν αμελητέες μεταβολές καθώς το  $Y_H$  αυξάνεται από 0.5 σε 0.67( Πίνακας 4.9).

Πίνακας 4. 9: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ανηγμένοι συντελεστές συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| $Y_H$ | kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> | kgCO <sub>2</sub> /kgCOD | kgCO <sub>2</sub> /kgN | CO <sub>2</sub> ,total(kg/d) |
|-------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| 0.5   | 0.490                             | 1.133                    | 17.089                 | 30379.180                    |
| 0.55  | 0.492                             | 1.142                    | 17.250                 | 30496.050                    |
| 0.6   | 0.493                             | 1.150                    | 17.411                 | 30579.130                    |
| 0.67  | 0.493                             | 1.160                    | 17.671                 | 30587.970                    |

Τέλος, στον πιο κάτω πίνακα φαίνεται το ποσοστό του ολικού αζώτου των ανεπεξέργαστων λυμάτων το οποίο μετατρέπεται σε αέριο αέριο υποξείδιου του αζώτου (Πίνακας 4.10). Όπως θα αναμέναμε η ποσότητα του ρύπου αυξάνεται λόγω του γεγονότος ότι μικρότερη ποσότητα υποξείδιου του άνθρακα μετατρέπεται σε αέριο άζωτο.

Πίνακας 4. 10: Ποσοστό εκπομπών  $SN_2O$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| $Y_H$ | Ποσοστό Εκπομπών $SN_2O/SN_{TOTAL}$ (%) |
|-------|---|
| 0.5   | 1.283                                   |
| 0.55  | 1.221                                   |
| 0.6   | 1.344                                   |
| 0.67  | 1.412                                   |

4.3.1.2 Σενάριο 1.2: Επίδραση του συντελεστή απόδοσης των AOB  $Y_{AOB}$  στην απόδοση της εγκατάστασης

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός της επίδρασης του συντελεστή απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας  $Y_{AOB}$  στη λειτουργία της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής της  $Y_{AOB}$  που κυμαίνεται μεταξύ 0.08 μέχρι 0.23. Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες

#### Αποτελέσματα σεναρίου, σχολιασμός

Αναμένουμε ότι με την αύξηση του συντελεστή απόδοσης των AOB θα αυξηθεί και η παραγωγή όπως φαίνεται άλλωστε και από τους πιο κάτω πίνακες. Παράλληλα η αύξηση οδηγεί και στην παραγωγή περισσότερου βιοαερίου (Πίνακας 4.11).

Πίνακας 4. 11: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει της απόδοσης των AOB

| $Y_{AOB}$ | Παραγωγή Βιοαερίου ( $10^6$ kcal/d) | Θερμική Ενέργεια ( $10^6$ kcal/d) | Ηλεκτρική ενέργεια ( $10^6$ kcal/d) | Απώλειες Ενέργειας ( $10^6$ kcal/d) | Περίσσια θερμικής ενέργειας ( $10^6$ kcal/d) |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 0.08      | 19.89                               | 9.95                              | 6.96                                | 2.98                                | 5.69   |
| 0.13      | 19.99                               | 10.00                             | 7.00                                | 3.00                                | 5.71   |
| 0.18      | 20.07                               | 10.03                             | 7.02                                | 3.01                                | 5.73   |
| 0.23      | 20.11                               | 10.05                             | 7.04                                | 3.02                                | 5.74   |

Η ενεργειακή κατανάλωση (Πίνακας 4.12) είναι ανάλογη των απαιτήσεων οξυγόνου στην εγκατάσταση. Η αύξηση που παρατηρείται στην απαίτηση οξυγόνου (Πίνακας 4.13)

οφείλεται στην αύξηση της παραγωγής βιομάζας ενώ η μείωση οφείλεται στην μείωση του ρυθμού που οξειδώνεται η υδροξυλαμίνη και συνεπώς των απαιτήσεων σε οξυγόνο.

Πίνακας 4. 12: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της απόδοσης των AOB

| $Y_{AOB}$ | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|-----------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.08      | 22108.71                        | 36.63%                        | 0.35               | 0.82      | 17.06   |
| 0.13      | 23305.61                        | 34.91%                        | 0.38               | 0.87      | 13      |
| 0.18      | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.23      | 23133.09                        | 35.37%                        | 0.37               | 0.87      | 13.80   |

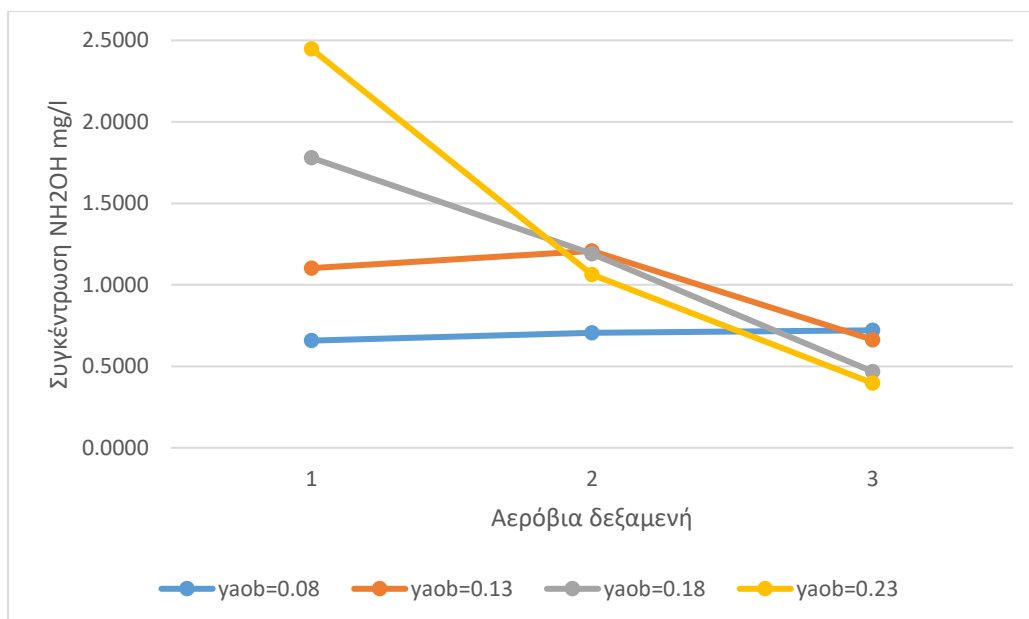
Πίνακας 4. 13: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της απόδοσης των AOB

| $Y_{AOB}$ | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|-----------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.08      | 16404.37                       | 37720.27    | 16854.45     | 10478.71     | 5503.39      | 4856.76      |
| 0.13      | 18057.58                       | 41819.65    | 18706.70     | 13603.80     | 5792.72      | 3734.28      |
| 0.18      | 17858.88                       | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 0.23      | 17648.51                       | 41123.06    | 20991.45     | 11505.41     | 4731.41      | 3862.95      |

Λόγω της μικρής συγκέντρωσης των AOB δεν μπορεί να γίνει η οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου σε υδροξυλαμίνη. Στον Σχήμα 4.3 φαίνεται ότι η συγκέντρωση της υδροξυλαμίνης είναι πολύ μικρή και για αυτό το λόγο παρατηρείται η μεγάλη συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο (Πίνακας 4.14). Από την άλλη, λόγω της αύξησης της απόδοσης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών παρατηρείται αύξηση σε όλες τις άλλες παραμέτρους.

Πίνακας 4. 14: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της απόδοσης των AOB

| $Y_{AOB}$ | Snh,e (mg/l) | Ntot,e (mg/l) | TSS,e (mgSS/l) | COD,e (mgCOD/L) | EQI (kgpol/d) |
|-----------|--------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|
| 0.08      | 10.47        | 17.90         | 16.57          | 46.48           | 26064.78      |
| 0.13      | 0.45         | 9.98          | 16.85          | 48.63           | 6966.98       |
| 0.18      | 0.027        | 10.474        | 16.991         | 50.321          | 7134.27       |
| 0.23      | 0.021        | 11.77         | 17.16          | 51.71           | 7301.93       |



Σχήμα 4. 3: Μεταβολή της συγκέντρωσης NH<sub>2</sub>OH στις 3 πρώτες αερόβιες δεξαμενές συναρτήσει της απόδοσης των AOB

Όπως ήταν λογικό παρατηρείται μια αύξηση της βιομάζας αλλά σε πολύ μικρό βαθμό αφού αποτελεί ένα μικρό ποσοστό της οργανικής ύλης του συστήματος (Πίνακας 4.15)

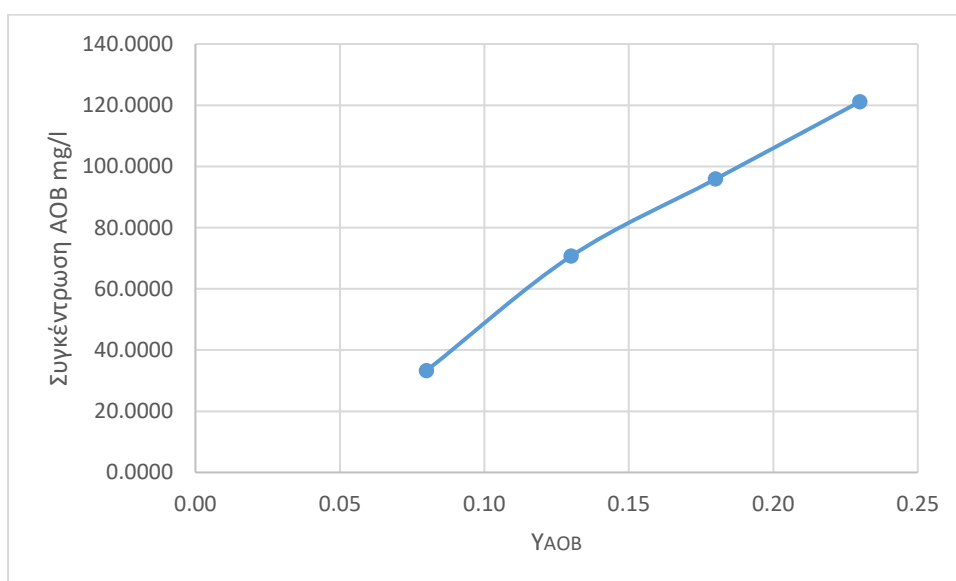
Πίνακας 4. 15: Συγκεντρώσεις οργανικών και ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα συναρτήσει της απόδοσης των AOB

| Y <sub>AOB</sub> | MLVSS(grVSS/m <sup>3</sup> ) | MLSS(grCOD/m <sup>3</sup> ) | MLSS(grSS/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 0.08             | 1795.23                      | 2545.23                     | 2819.28                    |
| 0.13             | 1830.19                      | 2598.87                     | 2854.04                    |
| 0.18             | 1847.45                      | 2623.38                     | 2871.31                    |
| 0.23             | 1868.67                      | 2653.51                     | 2892.52                    |

Η παραγωγή εκπομπών αερίου υποξειδίου του αζώτου έχει μια σημαντική αύξηση με την αύξηση του συντελεστή απόδοσης των AOB. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρατηρείται αύξηση της αυτοτροφικής βιομάζας όπως φαίνεται στο πιο κάτω (Σχήμα 4.4). Επιπροσθέτως, η κατανάλωση της υδροξυλαμίνης όσο περνά από τις αεριζόμενες δεξαμενές δείχνει ότι αυξάνεται η απονιτροποίηση και η νιτροποίηση των νιτροποιητών που οδηγεί στην παραγωγή ρύπου αερίου υποξειδίου του αζώτου (Πίνακας 4.16)

Πίνακας 4.16: Ποσοστό εκπομπών  $\text{SN}_2\text{O}$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της απόδοσης των AOB

| $Y_{\text{AOB}}$ | Ποσοστό Εκπομπών $\text{SN}_2\text{O}/\text{SN}_{\text{TOTAL}}$ (%) |
|------------------|---|
| 0.08             | 0.923   |
| 0.13             | 0.966   |
| 0.18             | 1.344   |
| 0.23             | 1.737   |



Σχήμα 4. 4: Μεταβολή της συγκέντρωσης των AOB συναρτήσει της απόδοσης των AOB

4.3.1.3 Σενάριο 1.3: Επίδραση του συντελεστή απόδοσης των NOB  $Y_{\text{NOB}}$  στην απόδοση της εγκατάστασης

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός της επίδρασης του συντελεστή απόδοσης των NOB μικροοργανισμών  $Y_{\text{NOB}}$  στη λειτουργία της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής της  $Y_{\text{NOB}}$  που κυμαίνεται μεταξύ 0.04 μέχρι 0.11 . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες

#### Αποτελέσματα σεναρίου, σχολιασμός

Αναμένουμε μια μικρή αύξηση της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών NOB και ίσως μια μείωση των ρύπων του αερίου υποξειδίου του αζώτου λόγω της ετεροτροφικής απονιτροποίησης. Όσο αυξάνεται η απόδοση, το βιοαέριο που παράγεται αυξάνεται ελάχιστα



πλην της πρώτης περίπτωσης που η βιομάζα τόσο των AOB όσο και των NOB είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα (Πίνακας 4.17)

Πίνακας 4. 17: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει της απόδοσης των NOB

| $Y_{NOB}$ | Παραγωγή Βιοαερίου ( $10^6$ kcal/d) | Θερμική Ενέργεια ( $10^6$ kcal/d) | Ηλεκτρική ενέργεια ( $10^6$ kcal/d) | Απώλειες Ενέργειας ( $10^6$ kcal/d) | Περίσσια θερμικής ενέργειας ( $10^6$ kcal/d) |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 0.04      | 19.89                               | 9.95                              | 6.96                                | 2.98                                | 5.69   |
| 0.06      | 20.07                               | 10.03                             | 7.02                                | 3.01                                | 5.72   |
| 0.08      | 20.07                               | 10.03                             | 7.02                                | 3.01                                | 5.73   |
| 0.11      | 20.07                               | 10.04                             | 7.03                                | 3.01                                | 5.74   |

Η ενεργειακή κατανάλωση επηρεάζεται άμεσα από τις απαιτήσεις οξυγόνου στο σύστημα και η μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση στο πρώτο υποσενάριο οφείλεται στην περιορισμένη νιτροποίηση όπως φαίνεται από τον πίνακα. Η μικρή μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης οφείλεται στην μείωση του απαιτούμενου οξυγόνου (Πίνακας 4.18).

Λόγω της μικρής συγκέντρωσης της βιομάζας των NOB και AOB δεν μπορεί να γίνει η οξειδωση του αμμωνιακού αζώτου σε υδροξυλαμίνη, οδηγώντας έτσι σε μεγάλη συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο (Σχήμα 4.5).

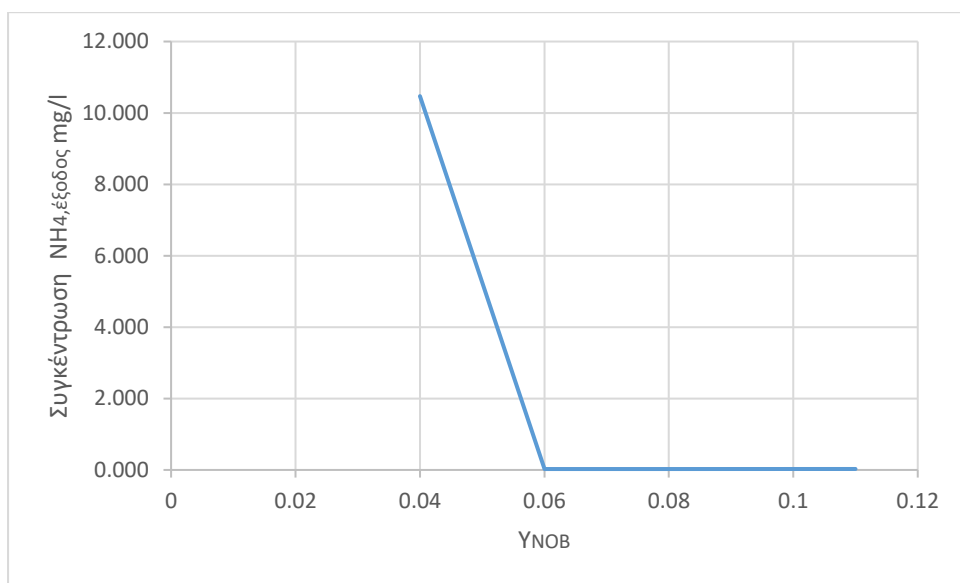
Πίνακας 4.18: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της απόδοσης των NOB

| $Y_{NOB}$ | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|-----------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.04      | 22108.71                        | 36.63%                        | 0.36               | 0.82      | 17.06   |
| 0.06      | 23273.77                        | 35.10%                        | 0.38               | 0.88      | 13.26   |
| 0.08      | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.11      | 23231.63                        | 35.17%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |

Από την άλλη, λόγω της αύξησης του συντελεστή απόδοσης των NOB μικροοργανισμών παρατηρείται μια αμελητέα αύξηση στις υπόλοιπες παραμέτρους (Πίνακας 4.19).

Πίνακας 4. 19: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της απόδοσης των NOB

| $Y_{NOB}$ | $S_{nh,e}$<br>(mg/l) | $N_{tot,e}$<br>(mg/l) | $TSS,e$<br>(mgSS/l) | $COD,e$<br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|-----------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| 0.04      | 10.471               | 17.903                | 16.578              | 46.485               | 26064.880        |
| 0.06      | 0.028                | 10.499                | 16.901              | 50.189               | 7096.423         |
| 0.08      | 0.027                | 10.474                | 16.991              | 50.321               | 7134.271         |
| 0.11      | 0.027                | 10.487                | 17.140              | 50.546               | 7197.555         |

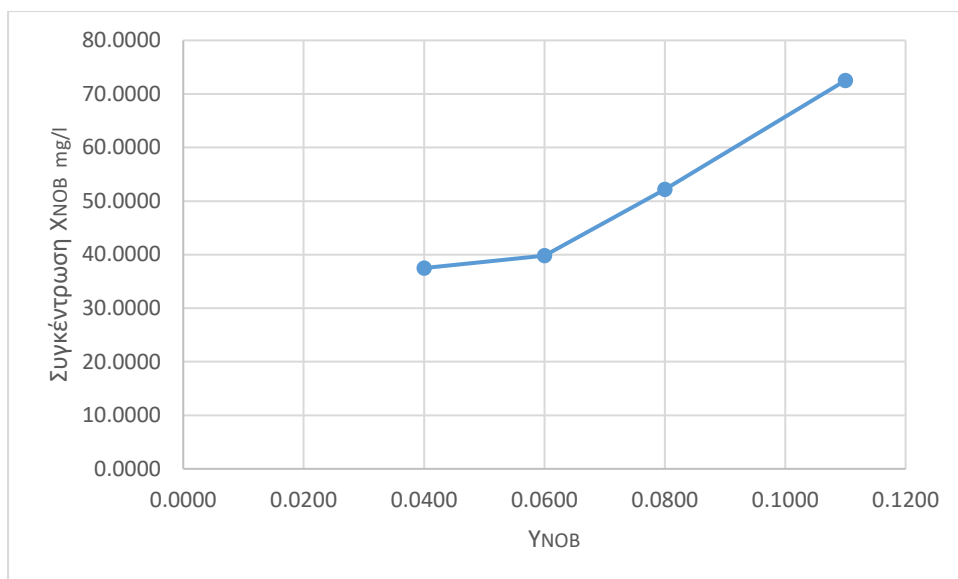


Σχήμα 4. 5 : Μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου συναρτήσει του συντελεστή απόδοσης των NOB

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 4.20, το ποσοστό του αέριου υποξειδίου του αζώτου παρουσιάζει μια αρχική αύξηση που οφείλεται στην αύξηση της βιομάζας των NOB (Σχήμα 4.6). Στο τέλος, η αύξηση των νιτροποιητών είναι τόσο μεγάλη που ευνοεί την κατανάλωση αέριου υποξειδίου του αζώτου από την αντίδραση της νιτροποίησης των ετεροτροφικών (Πίνακας 4.20)

Πίνακας 4. 20: Ποσοστό εκπομπών  $SN_2O$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του συντελεστή απόδοσης των NOB

| $Y_{NOB}$ | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>$SN_2O/SN_{TOTAL}$<br>(%) |
|-----------|--|
| 0.04      | 0.923  |
| 0.06      | 1.305  |
| 0.08      | 1.344  |
| 0.11      | 1.234  |



Σχήμα 4. 6 : Μεταβολή της συγκέντρωσης των NOB συναρτήσει του συντελεστή απόδοσης των NOB

#### 4.3.1.4 Σενάριο 1.4 : Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών $\mu_H$ στην απόδοση της εγκατάστασης

##### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών  $\mu_H$  στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του  $\mu_H$  που κυμαίνεται μεταξύ 4 μέχρι 7  $d^{-1}$ . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

##### Αποτελέσματα σεναρίου, σχολιασμός

Η αύξηση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών,  $\mu_H$  θα οδηγήσει σε αύξηση της ετεροτροφικής βιομάζας και αυτό αναμένεται να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Ωστόσο, όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.21 και 4.22, τόσο η κατανάλωση της ενέργειας όσο και η παραγωγή της βιομάζας παραμένουν σχετικά σταθερές.

Πίνακας 4. 21: Συγκεντρώσεις οργανικών και ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών

| $\mu_H (d^{-1})$ | MLVSS(grVSS/m <sup>3</sup> ) | MLSS(grCOD/m <sup>3</sup> ) | MLSS(grSS/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 4                | 1835.67                      | 2606.66                     | 2859.53                    |
| 5                | 1842.81                      | 2616.79                     | 2866.66                    |
| 6                | 1847.45                      | 2623.38                     | 2871.31                    |
| 7                | 1850.73                      | 2628.04                     | 2874.58                    |

Πίνακας 4. 22: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών

| $\mu_H$ (d <sup>-1</sup> ) | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 4                          | 23219.91                        | 35.08%                        | 0.37               | 0.88      | 13.27   |
| 5                          | 23231.64                        | 35.07%                        | 0.37               | 0.88      | 13.25   |
| 6                          | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 7                          | 23229.17                        | 35.18%                        | 0.37               | 0.87      | 13.21   |

Από τον πιο κάτω πίνακα παρατηρούμε ότι για τιμές του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών μεταξύ 4-7 d<sup>-1</sup>τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων διαφέρουν ελάχιστα ως προς το άζωτο και τα αιωρούμενα στερεά. Ωστόσο με την αύξηση των τιμών της παραμέτρου καταγράφεται μία μείωση της συγκέντρωσης του ολικού COD εξόδου η οποία οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση του δείκτη ποιότητας (Πίνακας 4.23)

Πίνακας 4. 23: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών

| $\mu_H$ (d <sup>-1</sup> ) | Snh,e (mg/l) | Ntot,e (mg/l) | TSS,e (mgSS/l) | COD,e (mgCOD/L) | EQI (kgpol/d) |
|----------------------------|--------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|
| 4                          | 0.029        | 10.581        | 16.897         | 52.843          | 7348.179      |
| 5                          | 0.028        | 10.518        | 16.954         | 51.318          | 7218.950      |
| 6                          | 0.027        | 10.474        | 16.991         | 50.321          | 7134.271      |
| 7                          | 0.027        | 10.443        | 17.018         | 49.614          | 7074.395      |

Όπως παρατηρούμε οι εκπομπές του αερίου του υποξειδίου του αζώτου παραμένουν σταθερές (Πίνακας 4.24)

Πίνακας 4. 24: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών

| $\mu_H$ (d <sup>-1</sup> ) | Ποσοστό Εκπομπών SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub> (%) |
|----------------------------|--|
| 4                          | 1.355  |
| 5                          | 1.336  |
| 6                          | 1.344  |
| 7                          | 1.281  |

4.3.1.5 Σενάριο 1.5 Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των AOB  $\mu_{AOB}$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των AOB  $\mu_{AOB}$  στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του  $\mu_{AOB}$  που κυμαίνεται μεταξύ 0.4 μέχρι 0.85 d<sup>-1</sup>. Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

Αποτελέσματα σεναρίου, σχολιασμός

Η αύξηση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των AOB  $\mu_{AOB}$  αναμένεται να ευνοήσει την αύξηση της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών AOB καθώς και της καταναλισκόμενης ενέργειας. Όπως παρατηρούμε υπάρχει μια αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας (Πίνακας 4.25) η οποία οφείλεται στην αύξηση της βιομάζας και κατ' επέκταση στην αύξηση των απαιτήσεων σε οξυγόνο (Πίνακας 4.26).

Πίνακας 4. 25: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB

| $\mu_{AOB}(d^{-1})$ | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.3                 | 20379.38                        | 39.67%                        | 0.33               | 0.76      | 106.56  |
| 0.4                 | 22535.73                        | 36.10%                        | 0.36               | 0.84      | 16.65   |
| 0.5                 | 23026.56                        | 35.38%                        | 0.37               | 0.87      | 13.02   |
| 0.6                 | 23128.29                        | 35.32%                        | 0.37               | 0.87      | 13.02   |
| 0.78                | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.85                | 23263.15                        | 35.12%                        | 0.38               | 0.88      | 13.32   |

Όπως είναι λογικό η αύξηση της συγκέντρωσης των AOB οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση των απαιτήσεων αερισμού των δεξαμενών. Η πολύ μικρή κατανάλωση οξυγόνου στην αρχή οφείλεται στην μη δυνατότητα πλήρους οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη (Πίνακας 4.27)

Πίνακας 4. 26: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB

| $\mu_{AOB}(d^{-1})$ | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|---------------------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.3                 | 13584.38                       | 31780.36    | 18223.87     | 7467.93      | 3363.42      | 2786.17      |
| 0.4                 | 16929.57                       | 39164.85    | 18601.03     | 11372.43     | 5183.54      | 4019.25      |
| 0.5                 | 17631.85                       | 40827.40    | 19231.83     | 12134.65     | 5179.48      | 4250.09      |
| 0.6                 | 17781.27                       | 41167.11    | 19616.38     | 12487.45     | 5119.88      | 3986.22      |
| 0.78                | 17858.88                       | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 0.85                | 17866.39                       | 41626.65    | 20533.80     | 12778.96     | 4721.58      | 3617.48      |

Λόγω της μικρής συγκέντρωσης της αυτοτροφικής βιομάζας δεν γίνεται οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου σε υδροξυλαμίνη και για αυτό το λόγο παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο. Από την άλλη, λόγω της αύξησης της απόδοσης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών παρατηρείται αύξηση σε όλες τις άλλες παραμέτρους (Πίνακας 4.27)

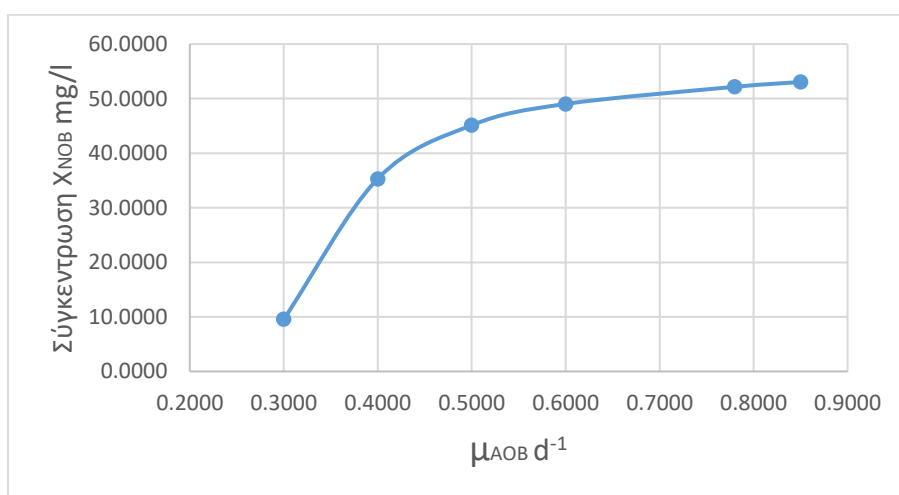
Πίνακας 4. 27: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB

| $\mu_{AOB}(d^{-1})$ | Sn <sub>h,e</sub> (mg/l) | N <sub>tot,e</sub> (mg/l) | TSS <sub>e</sub> (mgSS/l) | COD <sub>e</sub> (mgCOD/L) | EQI (kgpol/d) |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------|
| 0.3                 | 25.383                   | 35.733                    | 16.281                    | 46.253                     | 53675.240     |
| 0.4                 | 0.046                    | 16.972                    | 16.757                    | 48.404                     | 6920.345      |
| 0.5                 | 0.029                    | 10.286                    | 16.919                    | 49.941                     | 7080.930      |
| 0.6                 | 0.028                    | 10.142                    | 16.965                    | 50.245                     | 7120.219      |
| 0.78                | 0.027                    | 10.474                    | 16.991                    | 50.321                     | 7134.271      |
| 0.85                | 0.027                    | 10.626                    | 16.999                    | 50.326                     | 7136.844      |

Το σχεδόν μηδενικό ποσοστό που παρουσιάζεται στην πρώτη περίπτωση στον Πίνακα 4.28 οφείλεται στις μειωμένες εκπομπές υποξειδίων του αζώτου αφού δεν πραγματοποιείται οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου. Στην συνέχεια, παρατηρείται μια αύξηση λόγω της ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας μέχρι τη στιγμή που φθάνει στην μέγιστη τιμή του. Οι μικρές διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται για τις τιμές  $\mu_{AOB}$  μεγαλύτερες του 0.4 d<sup>-1</sup> οφείλονται στην παραγωγή περισσότερου αερίου αζώτου λόγω της αύξησης που παρατηρείται στην μάζα των νιτροποιητών που οδηγούν στην κατανάλωση του αερίου υποξειδίου του αζώτου όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.28 και Σχήμα 4.7.

Πίνακας 4. 28: Ποσοστό εκπομπών  $SN_2O$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB

| $\mu_{AOB}(d^{-1})$ | Ποσοστό Εκπομπών $SN_2O/SN_{TOTAL}$ (%) |
|---------------------|---|
| 0.3                 | 0.15                                    |
| 0.4                 | 1.23                                    |
| 0.5                 | 1.37                                    |
| 0.6                 | 1.44                                    |
| 0.78                | 1.34                                    |
| 0.85                | 1.32                                    |



Σχήμα 4. 7: Μεταβολή τη συγκέντρωσης της βιομάζας των νιτροποιητών συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των AOB

4.3.1.6 Σενάριο 1.6 Επίδραση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των NOB  $\mu_{NOB}$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

Στόχος σεναρίου

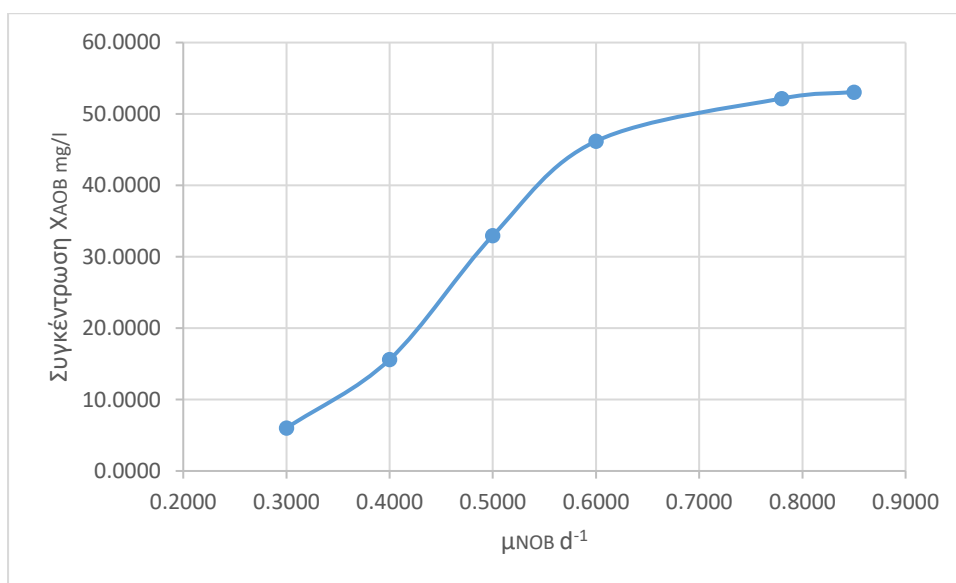
Ο προσδιορισμός του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των NOB  $\mu_{NOB}$  στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του  $\mu_{NOB}$  που κυμαίνεται μεταξύ 0.3 μέχρι 0.85  $d^{-1}$ . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες

### Αποτελέσματα σεναρίου, σχολιασμός

Η αύξηση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των NOB  $\mu_{NOB}$  λογικά θα ευνοήσει μια αύξηση της συγκέντρωσής τους και της καταναλισκόμενης ενέργειας αλλά σε ελάχιστο βαθμό αφού αποτελούν πολύ μικρό μέρος της βιομάζας. Όπως παρατηρούμε υπάρχει μια μικρή αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας (Πίνακας 4.29) στην αρχή λόγω αύξησης της βιομάζας των NOB (Σχήμα 4.8) άρα και της παραγωγής οξυγόνου όπως φαίνεται στους πίνακες πιο κάτω (Πίνακας 4.30) .

Πίνακας 4. 29: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της ανάπτυξης των NOB

| $\mu_{NOB}(d^{-1})$ | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.3                 | 22698.280                       | 35.89%                        | 0.366              | 0.853     | 12.260  |
| 0.4                 | 22754.730                       | 35.80%                        | 0.367              | 0.855     | 12.332  |
| 0.5                 | 22931.590                       | 35.53%                        | 0.370              | 0.862     | 12.577  |
| 0.6                 | 23132.660                       | 35.31%                        | 0.373              | 0.870     | 12.925  |
| 0.78                | 23235.710                       | 35.16%                        | 0.375              | 0.874     | 13.230  |
| 0.85                | 23260.670                       | 35.12%                        | 0.375              | 0.875     | 13.304  |



Σχήμα 4. 8: Μεταβολή τη συγκέντρωσης της βιομάζας των νιτροποιητών συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των NOB



Πίνακας 4. 30: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της ανάπτυξης των NOB

| $\mu_{NOB}(d^{-1})$ | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|---------------------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.3                 | 16980.82                       | 39778.31    | 21600.02     | 11437.42     | 3881.84      | 2870.80      |
| 0.4                 | 17050.42                       | 39949.67    | 21311.10     | 11587.91     | 4039.23      | 3021.95      |
| 0.5                 | 17406.33                       | 40521.53    | 20603.27     | 12062.02     | 4432.18      | 3423.85      |
| 0.6                 | 17702.07                       | 41189.46    | 20250.82     | 12503.64     | 4745.13      | 3689.06      |
| 0.78                | 17858.88                       | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 0.85                | 17894.78                       | 41618.10    | 20358.63     | 12795.04     | 4801.37      | 3672.90      |

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.31, η ποιότητα της εκροής δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Οι μικρές αυξήσεις που παρατηρούνται σε όλα τα συστατικά οφείλονται στη μικρή αύξηση της βιομάζας των νιτροποιητών καθώς και στην παραγωγή περισσότερων αυτοτροφικών μικροοργανισμών (Πίνακας 4.31).

Πίνακας 4. 31: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των νιτροποιητών

| $\mu_{NOB}(d^{-1})$ | Snh,e | Ntot,e | TSS,e  | COD,e  | EQI(kgpol/d) |
|---------------------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 0.3                 | 0.027 | 8.938  | 16.641 | 49.992 | 7001.911     |
| 0.4                 | 0.027 | 9.040  | 16.714 | 49.929 | 7016.247     |
| 0.5                 | 0.027 | 9.393  | 16.844 | 50.005 | 7061.028     |
| 0.6                 | 0.027 | 9.934  | 16.944 | 50.169 | 7106.183     |
| 0.78                | 0.027 | 10.474 | 16.991 | 50.321 | 7134.271     |
| 0.85                | 0.028 | 10.601 | 16.999 | 50.356 | 7139.745     |

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.32 η αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των NOB οδηγεί σε σταδιακή μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα λόγω της αύξησης της ποσότητας των NOB που καταναλώνουν διοξείδιο του άνθρακα (Πίνακας 4.32).

Πίνακας 4. 32: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ανηγμένοι συντελεστές συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των νιτροποιητών

| $\mu_{NOB}(d^{-1})$ | kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> | kgCO <sub>2</sub> /kgCOD | kgCO <sub>2</sub> /kgN | CO <sub>2</sub> ,total(kg/d) |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| 0.3                 | 0.5324                            | 1.2409                   | 17.8288                | 33009.2700                   |
| 0.4                 | 0.5255                            | 1.2246                   | 17.6565                | 32557.2900                   |
| 0.5                 | 0.5113                            | 1.1917                   | 17.3858                | 31698.6600                   |
| 0.6                 | 0.4991                            | 1.1637                   | 17.2891                | 30942.3900                   |
| 0.78                | 0.4932                            | 1.1504                   | 17.4113                | 30579.1300                   |
| 0.85                | 0.4924                            | 1.1486                   | 17.4606                | 30528.1600                   |

Τέλος, παρατηρούμε ότι υπάρχει μείωση της παραγωγής αέριου υποξειδίου του αζώτου. Αυτό γίνεται λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης των NOB τα οποία είναι υπεύθυνα για την οξείδωση των νιτροδών σε νιτρικά τα οποία στη συνέχεια με τη βοήθεια της ετεροτροφικής βιομάζας ανάγονται σε αέριο άζωτο (Πίνακας 4.33).

Πίνακας 4. 33: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης των NOB

| $\mu_{\text{NOB}}(\text{d}^{-1})$ | Ποσοστό Εκπομπών SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub> (%) |
|-----------------------------------|--|
| 0.3                               | 4.257  |
| 0.4                               | 3.989  |
| 0.5                               | 3.351  |
| 0.6                               | 2.335  |
| 0.78                              | 1.344  |
| 0.85                              | 1.184  |

4.3.1.7 Σενάριο 1.7 Επίδραση του συντελεστή ημι-κορεσμού της αμμωνίας k<sub>NH</sub> στην απόδοση της εγκατάστασης.

Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του συντελεστή ημι-κορεσμού της αμμωνίας k<sub>NH</sub> στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του k<sub>NH</sub> που κυμαίνεται μεταξύ 1 μέχρι 0.05 mg/L. Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

Αποτελέσματα σεναρίου,σχολιασμός

Η μείωση του συντελεστή ημι-κορεσμού της αμμωνίας k<sub>NH</sub> αναμένεται να ευνοήσει την αύξηση της βιομάζας και συνεπώς της καταναλισκόμενης ενέργειας λόγω αύξησης των απαιτήσεων σε οξυγόνο. Όπως παρατηρούμε υπάρχει μια μικρή αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας (ΠΠίνακας 4.34) στην αρχή λόγω αύξησης της βιομάζας, και άρα της απαίτησης σε οξυγόνο (Πίνακας 4.35),η οποία όμως αντισταθμίζεται με την παραγωγή βιοαερίου.

Πίνακας 4. 34: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας

| $k_{NH}$<br>(mg/L) | Καταναλισκόμενη<br>Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό<br>Ανακτώμενης<br>Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 1                  | 22497.67                           | 35.79%                              | 0.36               | 0.89      | 12.42   |
| 0.5                | 22751.97                           | 35.56%                              | 0.37               | 0.88      | 12.64   |
| 0.1                | 23163.14                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.88      | 13.07   |
| 0.05               | 23235.71                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |

Πίνακας 4. 35 Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας

| $k_{NH}$ (mg/L) | DAILY O <sub>2</sub> | SOTR     | SOTR1    | SOTR2    | SOTR3   | SOTR4   |
|-----------------|----------------------|----------|----------|----------|---------|---------|
| 1               | 16654.15             | 39230.48 | 22562.90 | 10403.50 | 3635.15 | 2607.91 |
| 0.5             | 17007.57             | 40005.05 | 21937.45 | 11279.37 | 3901.18 | 2866.63 |
| 0.1             | 17546.99             | 41261.31 | 20690.18 | 12537.43 | 4545.82 | 3487.88 |
| 0.05            | 17858.88             | 41533.34 | 20309.63 | 12756.18 | 4807.83 | 3679.03 |

Στον Πίνακα 4.36 φαίνονται οι συγκεντρώσεις αζώτου, στερεών και COD, στην εκροή της εγκατάστασης. Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου παραμένει σταθερή καθώς δεν επηρεάζεται από την τιμή του  $k_{NH}$ . Η συγκέντρωση του ολικού αζώτου αυξάνεται σε μικρότερο βαθμό γιατί το αμμωνιακό άζωτο δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση της συγκέντρωσης του ολικού COD εξόδου η οποία σχετίζεται πιθανότατα με την αύξηση του ρυθμού των διεργασιών κατανάλωσης του οργανικού άνθρακα λόγω της μείωσης του συντελεστή ημι-κορεσμού (Πίνακας 4.36).

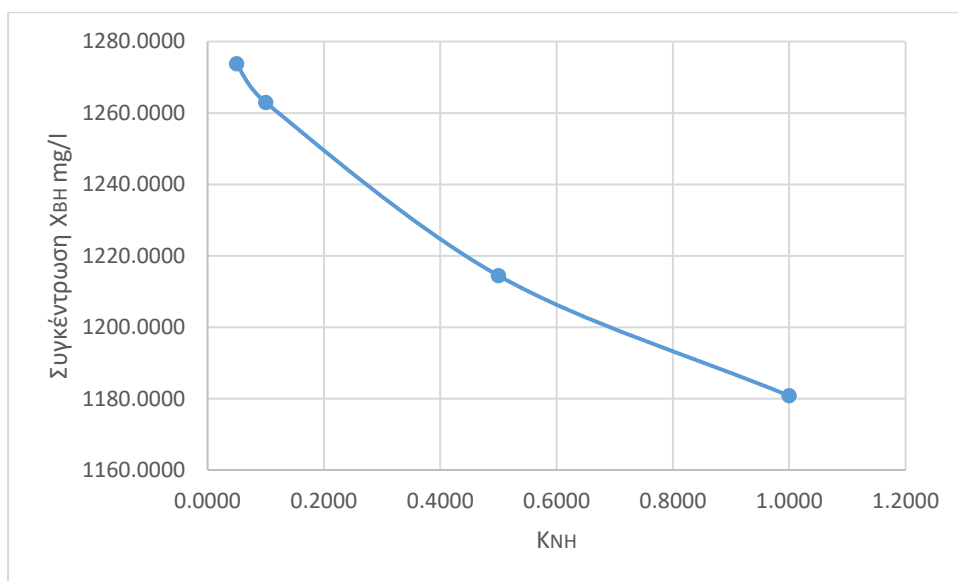
Πίνακας 4. 36: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας

| $k_{NH}$<br>(mg/L) | $S_{nh,e}$<br>(mg/l) | $N_{tot,e}$<br>(mg/l) | $TSS,e$<br>(mgSS/l) | $COD,e$<br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|--------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| 1                  | 0.042                | 9.580                 | 16.026              | 71.486               | 8896.801         |
| 0.5                | 0.038                | 9.761                 | 16.409              | 63.953               | 8276.804         |
| 0.1                | 0.029                | 10.217                | 16.881              | 52.828               | 7343.233         |
| 0.05               | 0.027                | 10.474                | 16.991              | 50.321               | 7134.271         |

Όπως φαίνεται οι εκπομπές του υποξειδίου του αζώτου αυξάνονται σταθερά λόγω της αύξησης της βιομάζας (Πίνακας 4.37, Σχήμα 4.9)

Πίνακας 4. 37: Ποσοστό εκπομπών  $\text{SN}_2\text{O}$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας

| $k_{\text{NH}}$<br>(mg/L) | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>$\text{SN}_2\text{O}/\text{SN}_{\text{TOTAL}}$ (%) |
|---------------------------|---|
| 1                         | 0.684   |
| 0.5                       | 0.840   |
| 0.1                       | 1.230   |
| 0.05                      | 1.344   |



Σχήμα 4. 9: Μεταβολή τη συγκέντρωσης της ετεροτροφικής βιομάζας συναρτήσει του συντελεστή κορεσμού της αμμωνίας

#### 4.3.1.8 Σενάριο 1.8 Επίδραση του συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας $k_s$ στην απόδοση της εγκατάστασης.

##### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός της επίδρασης του συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας  $k_s$  στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του  $k_s$  που κυμαίνεται μεταξύ 20 μέχρι 2 gr COD/  $\text{m}^3$ . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

### Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Η μείωση της τιμής του συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας,  $k_s$ , αναμένεται να οδηγήσει σε μια μικρή αύξηση της ετεροτροφικής βιομάζας η οποία ωστόσο, όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 4.38, δεν μεταβάλει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 4. 38: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας  $k_s$

| $k_s$<br>(gr COD/ m <sup>3</sup> ) | Καταναλισκόμενη<br>Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό<br>Ανακτώμενης<br>Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 20                                 | 23235.7                            | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 10                                 | 23166.5                            | 35.32%                              | 0.37               | 0.86      | 13.10   |
| 5                                  | 23198.7                            | 35.27%                              | 0.37               | 0.87      | 13.14   |
| 2                                  | 23203.3                            | 35.26%                              | 0.37               | 0.86      | 13.64   |

Όπως ήταν αναμενόμενο η συγκέντρωση εξόδου του αμμωνιακού αζώτου είναι πολύ μικρή αφού δεν υπάρχει περιορισμός στη νιτροποίηση. Η μείωση του COD όπως και του δείκτη ποιότητας στερεών οφείλεται στο γεγονός ότι το συστατικό SS δεν αποτελεί πλέον περιοριστικό παράγοντα και ευνοείται η κατανάλωση του (Πίνακας 4.39)

Πίνακας 4. 39: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της απόδοσης του συναρτήσει συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας  $k_s$

| $k_s$<br>(gr COD/ m <sup>3</sup> ) | $S_{nh,e}$<br>(mg/l) | $N_{tot,e}$<br>(mg/l) | $TSS,e$<br>(mgSS/l) | $COD,e$<br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| 20                                 | 0.027                | 10.474                | 16.991              | 50.321               | 7134.271         |
| 10                                 | 0.027                | 10.386                | 17.073              | 48.144               | 6950.393         |
| 5                                  | 0.027                | 10.325                | 17.117              | 46.928               | 6848.582         |
| 2                                  | 0.028                | 10.282                | 17.143              | 46.184               | 6787.854         |

Τέλος, ο λόγος των εκπομπών του αερίου υποξειδίου του αζώτου προς το άζωτο εισόδου είναι σχεδόν σταθερός και δεν παρατηρείται κάποια αξιολογη μεταβολή (Πίνακας 4.40)

Πίνακας 4. 40: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει συντελεστή ημι-κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας k<sub>s</sub>

| k <sub>s</sub><br>(gr COD/ m <sup>3</sup> ) | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub><br>(%) |
|---|---|
| 20  | 1.34  |
| 10  | 1.26  |
| 5   | 1.36  |
| 2   | 1.38  |

4.3.1.9 Σενάριο 1.9 Επίδραση του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης q<sub>AOBAMO</sub> στην απόδοση της εγκατάστασης.

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης q<sub>AOBAMO</sub> στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του q<sub>AOBAMO</sub> που κυμαίνεται μεταξύ 7.2 μέχρι 2.6 mgN/(mgCOD\*d). Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Η μείωση του ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης q<sub>AOBAMO</sub> λογικά θα ευνοήσει μια αύξηση της αυτοτροφικής βιομάζας αλλά θα οδηγήσει και σε μια μικρή μείωση της ετεροτροφικής βιομάζας λόγω της αύξησης της κατανάλωσης της αμμωνίας για τους AOB. Για το λόγο αυτό, παρατηρείται πιο κάτω μια αυξομείωση της ενεργειακής κατανάλωσης όπως και των απαιτήσεων στο οξυγόνο, όπως φαίνεται στους πιο κάτω Πίνακες(4.41,4.42)

Πίνακας 4. 41: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης

| q <sub>AOBAMO</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Καταναλισκόμενη<br>Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό<br>Ανακτώμενης<br>Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 2.6                                  | 22087.78                           | 36.84%                              | 0.36               | 0.82      | 16.75   |
| 5.2                                  | 23235.71                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 7.8                                  | 23160.83                           | 35.17%                              | 0.37               | 0.88      | 13.12   |

Πίνακας 4. 42: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης

| q <sub>AOBAMO</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Ημερήσιο<br>O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR<br>(kg/d) | SOTR1<br>(kg/d) | SOTR2<br>(kg/d) | SOTR3<br>(kg/d) | SOTR4<br>(kg/d) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2.6                                  | 16359.14                          | 37578.27       | 16792.23        | 10463.50        | 5493.35         | 4840.91         |
| 5.2                                  | 17858.88                          | 41533.34       | 20309.63        | 12756.18        | 4807.83         | 3679.03         |
| 7.8                                  | 17646.32                          | 41303.16       | 22661.96        | 10800.63        | 4345.30         | 3501.42         |

Στον Πίνακα 4.43 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις αζώτου, στερεών και COD, στην εκροή της εγκατάστασης. Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου για την πρώτη περίπτωση είναι πολύ μεγάλη καθώς δεν γίνεται η οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου σε υδροξυλαμίνη. Η παραγωγή περισσότερων αυτοτροφικών μικροοργανισμών οδηγεί σε αύξηση των στερεών και του COD. Ο δείκτης ποιότητας εκροής της εγκατάστασης για την μικρότερη τιμή της παραμέτρου λαμβάνει πολύ υψηλή τιμή λόγω της πολύ αυξημένης συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου για το αντίστοιχο σενάριο. Η αυξομείωση των στερεών αναλύθηκε προηγουμένως και η αύξηση του COD ίσως να οφείλεται στην μείωση της ετεροτροφικής βιομάζας άρα και στη μειωμένη κατανάλωση εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (Πίνακας 4.43)

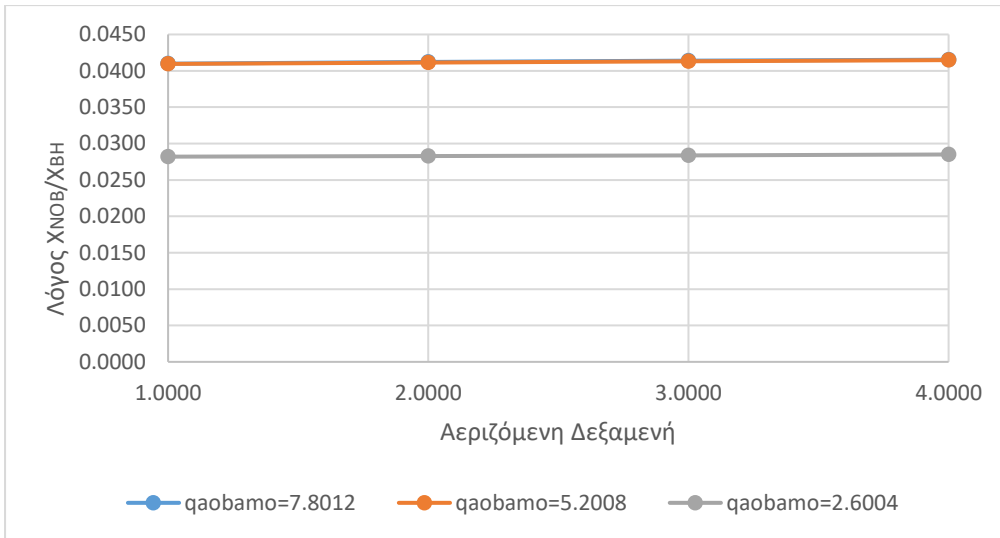
Πίνακας 4. 43: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης

| q <sub>AOBAMO</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Sn <sub>h,e</sub><br>(mg/l) | N <sub>tot,e</sub><br>(mg/l) | TSS <sub>e</sub><br>(mgSS/l) | COD <sub>e</sub><br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 2.6                                  | 9.69                        | 17.54                        | 16.82                        | 46.84                         | 24712.28         |
| 5.2                                  | 0.03                        | 10.47                        | 16.99                        | 50.32                         | 7134.27          |
| 7.8                                  | 0.02                        | 10.32                        | 16.88                        | 53.03                         | 7337.59          |

Το ποσοστό των εκπομπών του υποξειδίου του αζώτου στην αρχή είναι μειωμένο λόγω της περιορισμένης οξείδωσης της αμμωνίας. Στη συνέχεια παρατηρούμε μια σταθερότητα η οποία οφείλεται αρχικά στην πλήρη οξείδωση της αμμωνίας αλλά και στην μείωση της ετεροτροφικής βιομάζας σε σχέση με τους NOB (Πίνακας 4.44 και Σχήμα 4.10)

Πίνακας 4. 44: Ποσοστό εκπομπών  $\text{SN}_2\text{O}$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης

| $q_{\text{AOBAMO}}$<br>mgN/(mgCOD*d) | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>$\text{SN}_2\text{O}/\text{SN}_{\text{TOTAL}}$<br>(%) |
|--------------------------------------|--|
| 2.6                                  | 0.727  |
| 5.2                                  | 1.344  |
| 7.8                                  | 1.344  |



Σχήμα 4. 10 Μεταβολή του λόγου  $X_{\text{NOB}}/X_{\text{BH}}$  συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάσης

4.3.1.10 Σενάριο 1.10 Επίδραση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής  $\text{N}_2\text{O}$  μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών  $q_{\text{AOBN}_2\text{O}_{\text{NN}}}$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του μέγιστου ρυθμού παραγωγής  $\text{N}_2\text{O}$  μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών  $q_{\text{AOBN}_2\text{O}_{\text{NN}}}$  στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του  $q_{\text{AOBN}_2\text{O}_{\text{NN}}}$  που κυμαίνεται μεταξύ 0.0039 μέχρι 0.0117 mgN/(mgCOD\*d) . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός



Αυτό που θέλουμε να παρατηρήσουμε μέσω αυτού του σεναρίου είναι κατά πόσο η μείωση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής N<sub>2</sub>O μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών q<sub>AOBN2ONN</sub> αποτελεί κύριο παράγοντα για παραγωγής εκπομπών υποξειδίου του αζώτου. Πιο κάτω, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει μεταβολή στην ενεργειακή κατανάλωση ούτε και στις απαιτήσεις οξυγόνου (Πίνακες 4.45 4.46).

Πίνακας 4. 45: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής N<sub>2</sub>O μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών

| q <sub>AOBN2ONN</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Καταναλισκόμενη<br>Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό<br>Ανακτώμενης<br>Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.0039                                 | 23235.83                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.0078                                 | 23235.71                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.0117                                 | 23235.25                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |

Πίνακας 4. 46: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής N<sub>2</sub>O μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών

| q <sub>AOBN2ONN</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Ημερήσιο<br>O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR<br>(kg/d) | SOTR1<br>(kg/d) | SOTR2<br>(kg/d) | SOTR3<br>(kg/d) | SOTR4<br>(kg/d) |
|--|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.0039                                 | 17861.79                          | 41554.60       | 20309.9<br>1    | 12756.29        | 4809.3<br>6     | 3679.04         |
| 0.0078                                 | 17858.88                          | 41533.34       | 20309.6<br>3    | 12756.18        | 4807.8<br>3     | 3679.03         |
| 0.0117                                 | 17859.23                          | 41531.78       | 20309.5<br>3    | 12751.35        | 4807.7<br>9     | 3678.76         |

Όπως παρατηρούμε η οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη δεν επηρεάζεται καθόλου από αυτό το ρυθμό και γενικότερα παρατηρείται μια σταθερότητα σε όλες τις παραμέτρους, η οποία υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει καθόλου μεταβολή στην παραγωγή ή κατανάλωση οποιασδήποτε παραμέτρου (Πίνακας 4.47)

Πίνακας 4. 47: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής N<sub>2</sub>O μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών

| q <sub>AOBN2ONN</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Sn <sub>h,e</sub><br>(mg/l) | N <sub>tot,e</sub><br>(mg/l) | TSS <sub>e</sub><br>(mgSS/l) | COD <sub>e</sub><br>(mgCOD/l) | EQI(kgpol/d) |
|--|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------|
| 0.0039                                 | 0.027                       | 10.48                        | 16.99                        | 50.32                         | 7134.43      |
| 0.0078                                 | 0.027                       | 10.47                        | 16.99                        | 50.32                         | 7134.27      |
| 0.0117                                 | 0.027                       | 10.47                        | 16.99                        | 50.32                         | 7134.12      |

Στον Πίνακα 4.48 παρουσιάζεται ο λόγος των παραγόμενων N<sub>2</sub>O προς το άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση, για τις διαφορετικές τιμές του q<sub>AOBN2ONN</sub>. Όπως φαίνεται, η

μεταβολή του  $q_{\text{AOBN}_2\text{ONN}}$  δεν επηρεάζει σημαντικά την παραγωγή αέριου υποξειδίου του αζώτου άρα η διεργασία νιτροποίησης των νιτροποιητών φαίνεται ότι δεν αποτελεί τον κύριο παράγοντα παραγωγής αέριου υποξειδίου του αζώτου τουλάχιστον για τις συνθήκες που έχουν εξετασθεί.

Πίνακας 4. 48: Ποσοστό εκπομπών  $\text{SN}_2\text{O}$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής  $\text{N}_2\text{O}$  μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών

| $q_{\text{AOBN}_2\text{ONN}}$ | Ποσοστό Εκπομπών $\text{SN}_2\text{O}/\text{SN}_{\text{TOTAL}}$ (%) |
|-------------------------------|---|
| 0.0039                        | 1.35  |
| 0.0078                        | 1.34  |
| 0.0117                        | 1.37  |

4.3.1.11 Σενάριο 1.11 Επίδραση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής  $\text{N}_2\text{O}$  μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών  $q_{\text{AOBN}_2\text{OND}}$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του μέγιστου ρυθμού παραγωγής  $\text{N}_2\text{O}$  μέσω της διεργασίας νιτροποίησης των νιτροποιητών  $q_{\text{AOBN}_2\text{ONN}}$  στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του  $q_{\text{AOBN}_2\text{ONN}}$  που κυμαίνεται μεταξύ 0.6504 μέχρι 1.9512  $\text{mgN}/(\text{mgCOD}\cdot\text{d})$ . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Αυτό που θέλουμε να προσδιορίσουμε μέσω αυτού του σεναρίου είναι κατά πόσο η μείωση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής  $\text{N}_2\text{O}$  μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών  $q_{\text{AOBN}_2\text{OND}}$  αποτελεί κύριο παράγοντα για παραγωγή εκπομπών αέριου υποξειδίου του αζώτου. Πιο κάτω παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει μεταβολή στην ενεργειακή κατανάλωση (Πίνακας 4.49) ούτε και στις απαιτήσεις οξυγόνου (Πίνακας 4.50). Αυτό είναι λογικό γιατί αυτή η παράμετρος δεν συμμετέχει στην παραγωγή βιομάζας αλλά στην παραγωγή αέριου υποξειδίου του αζώτου.

Πίνακας 4. 49: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής N<sub>2</sub>O μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών

| q <sub>AOBN2OND</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Καταναλισκόμενη<br>Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό<br>Ανακτώμενης<br>Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.6504                                 | 23285.60                           | 35.08%                              | 0.38               | 0.88      | 13.38   |
| 1.3008                                 | 23235.71                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 1.9512                                 | 23221.45                           | 35.18%                              | 0.37               | 0.87      | 13.11   |

Πίνακας 4. 50: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής N<sub>2</sub>O μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών

| q <sub>AOBN2OND</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Ημερήσιο<br>O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR<br>(kg/d) | SOTR1<br>(kg/d) | SOTR2<br>(kg/d) | SOTR3<br>(kg/d) | SOTR4<br>(kg/d) |
|--|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.6504                                 | 17907.22                          | 41703.55       | 20354.09        | 12796.74        | 4830.11         | 3696.36         |
| 1.3008                                 | 17858.88                          | 41533.34       | 20309.63        | 12756.18        | 4807.83         | 3679.03         |
| 1.9512                                 | 17828.82                          | 41487.64       | 20283.65        | 12716.80        | 4789.08         | 3659.64         |

Όπως παρατηρούμε η οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη δεν επηρεάζεται καθόλου από αυτό το ρυθμό ενώ γενικότερα παρατηρείται μια στασιμότητα σε όλες τις παραμέτρους που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή στην παραγωγή ή κατανάλωση οποιουδήποτε στοιχείου (Πίνακας 4.50)

Πίνακας 4. 51: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής N<sub>2</sub>O μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών

| q <sub>AOBN2OND</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Sn <sub>h,e</sub><br>(mg/l) | N <sub>tot,e</sub><br>(mg/l) | TSS <sub>e</sub><br>(mgSS/l) | COD <sub>e</sub><br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|--|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 0.6504                                 | 0.027                       | 10.74                        | 17.00                        | 50.37                         | 7142.94          |
| 1.3008                                 | 0.027                       | 10.47                        | 16.99                        | 50.32                         | 7134.27          |
| 1.9512                                 | 0.028                       | 10.23                        | 16.98                        | 50.26                         | 7125.66          |

Στο προηγούμενο σενάριο οι εκπομπές του υποξειδίου του αζώτου είχαν αμελητέες διαφοροποιήσεις, και συνεπώς αναμένεται ότι οι εκπομπές κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών σε αυτή την περίπτωση θα αυξάνονταν με την αύξηση του συντελεστή q<sub>AOBN2OND</sub>. Όπως παρατηρείται η αύξηση του συντελεστή δείχνει μια αξιόλογη αύξηση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου (Πίνακας 4.52). Κατά συνέπεια φαίνεται ότι οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου προέρχονται κατά κανόνα από την απονιτροποίηση των νιτροποιητών.

Πίνακας 4. 52: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παραγωγής N<sub>2</sub>O μέσω της διεργασίας απονιτροποίησης των νιτροποιητών

| $q_{\text{AOBN}_2\text{OND}}$<br>mgN/(mgCOD*d) | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub><br>(%) |
|--|---|
| 0.6504   | 0.707   |
| 1.3008   | 1.344   |
| 1.9512   | 1.967   |

4.3.1.12 Σενάριο 1.12 Επίδραση του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης (HAO)  $q_{\text{AOBHAO}}$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης (HAO) στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του  $q_{\text{AOBHAO}}$  που κυμαίνεται μεταξύ 2.6004 μέχρι 7.8012 mgN/(mgCOD\*d). Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα σεναρίου, σχολιασμός

Με την αύξηση της απόδοσης του ενζύμου αναμένεται αύξηση της αυτοτροφικής βιομάζας καθώς και αύξηση των εκπομπών του υποξειδίου του αζώτου. Στο Πίνακα 4.53 παρατηρείται μια μικρή αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και των απαιτήσεων αερισμού (Πίνακες 4.53-4.54) η οποία σχετίζεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των NOB όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.55.

Πίνακας 4. 53: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης

| $q_{\text{AOBHAO}}$<br>mgN/(mgCOD*d) | Καταναλισκόμενη<br>Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό<br>Ανακτώμενης<br>Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 2.6004                               | 23215.720                          | 35.19%                              | 0.374              | 0.874     | 12.509  |
| 5.2008                               | 23235.710                          | 35.16%                              | 0.375              | 0.874     | 13.230  |
| 7.8012                               | 23253.450                          | 35.13%                              | 0.375              | 0.874     | 15.710  |

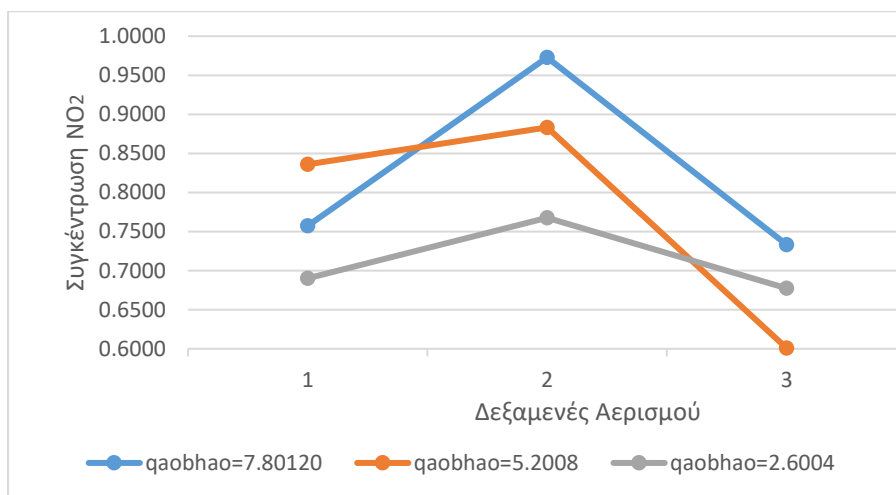
Πίνακας 4. 54: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| q <sub>ΑΟΒ</sub> ΗΑΟ<br>mgN/(mgCOD*d) | Ημερήσιο<br>O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR<br>(kg/d) | SOTR1<br>(kg/d) | SOTR2<br>(kg/d) | SOTR3<br>(kg/d) | SOTR4<br>(kg/d) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2.6004                                | 17776.34                          | 41478.93       | 20822.57        | 12635.28        | 4750.07         | 3288.28         |
| 5.2008                                | 17858.88                          | 41533.34       | 20309.63        | 12756.18        | 4807.83         | 3679.03         |
| 7.8012                                | 17942.87                          | 41555.32       | 18997.75        | 12916.86        | 5364.24         | 4261.38         |

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου καταγράφεται αντίστοιχη αύξηση της συγκέντρωσης των NOB., πράγμα που οφείλεται στη συσσώρευση στο σύστημα οξειδίου του αζώτου λόγω του μειωμένου ρυθμού αντίδρασης με το ένζυμο (ΗΑΟ). Αυτό οδηγεί στην αδυναμία παραγωγής νιτροδών (Σχήμα4.10) που αποτελούν και περιοριστικό παράγοντα στην παραγωγή μικροοργανισμών NOB (Πίνακας 4.55).

Πίνακας 4. 55: Συγκέντρωση της βιομάζας των νιτροποιητών,αυτοτροφικών και ετεροτροφικών μικροοργανισμών συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης

| q <sub>ΑΟΒ</sub> ΗΑΟ<br>mgN/(mgCOD*d) | X <sub>NOB</sub> (mg/l) | X <sub>ΑΟΒ</sub> (mg/l) | X <sub>ΒΗ</sub> (mg/l) |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 2.60040                               | 45.6389                 | 95.7639                 | 1273.5930              |
| 5.20080                               | 52.1651                 | 95.8564                 | 1273.7670              |
| 7.80120                               | 67.8623                 | 95.9496                 | 1279.2790              |



Σχήμα 4.10: Συγκέντρωση νιτροδών στις αεριζόμενες δεξαμενές συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης

Επιπλέον με την αύξηση του ρυθμού αντίδρασης με το ένζυμο καταγράφεται αύξηση της συγκέντρωσης του ολικού άζωτου στην έξοδο της εγκατάστασης η οποία οφείλεται στους

λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω. Αντιθέτως οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού άνθρακα είναι πρακτικά αμετάβλητες (Πίνακας 4.56)

Πίνακας 4.56: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης

| q <sub>ΑΟΒΗΑΟ</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Sn <sub>h,e</sub><br>(mg/l) | N <sub>tot,e</sub><br>(mg/l) | TSS <sub>e</sub><br>(mgSS/l) | COD <sub>e</sub><br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 2.6004                               | 0.027                       | 8.865                        | 16.954                       | 50.383                        | 7128.104         |
| 5.2008                               | 0.027                       | 10.474                       | 16.991                       | 50.321                        | 7134.271         |
| 7.8012                               | 0.031                       | 14.930                       | 17.119                       | 49.806                        | 7127.955         |

Συνεχίζοντας παρατηρούμε μια αυξομείωση στο ποσοστό των εκπομπών αερίου αζώτου υποξειδίου του αζώτου. Η μεγάλη αύξηση στην αρχή οφείλεται στο ότι η συγκέντρωση των NOB είναι πολύ χαμηλή με συνέπεια να μην γίνεται κατανάλωση του αερίου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο. Η απονιτροποίηση των νιτροποιητών δεν μπορεί να γίνει λόγω της μη παραγωγής νιτροδών από το οξείδιο του αζώτου. Άρα φαίνεται πιθανόν η μεγάλη αύξηση να οφείλεται στη νιτροποίηση των νιτροποιητών οι οποίοι στην περίπτωση αυτή η αντίδραση που παράγει τις περισσότερες εκπομπές αερίου υποξειδίου του αζώτου.

Στη συνέχεια καταγράφεται μια πολύ μεγάλη μείωση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου. Το αποτέλεσμα αυτό μοιάζει λογικό αφού αυξάνεται η συγκέντρωση των NOB απότομα με συνέπεια η απονιτροποίηση που δημιουργείται από τους νιτροποιητές έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αερίου αζώτου από την κατανάλωση αερίου υποξειδίου του αζώτου.

Στο τέλος παρατηρείται μια αύξηση των εκπομπών η οποία μπορεί να αιτιολογηθεί ως ακολούθως: η παραγωγή αερίου αζώτου ναι μεν αυξάνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 αλλά η αύξηση των νιτροδών οδηγεί στην παραγωγή αερίου υποξειδίου του αζώτου από την απονιτροποίηση των νιτροποιητών και στην αύξηση των ρύπων (Πίνακας 4.57)

Πίνακας 4. 57: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της υδροξυλαμίνης οξειδοαναγωγάσης

| q <sub>ΑΟΒΗΑΟ</sub><br>mgN/(mgCOD*d) | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub><br>(%) |
|--------------------------------------|---|
| 2.6004                               | 8.58  |
| 5.2008                               | 1.34  |
| 7.8012                               | 2.95  |

4.3.1.13 Σενάριο 1.13 Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή των νιτροδών σε νιτρικό οξείδιο  $n_{g3}$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός της επίδρασης του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή των νιτροδών σε νιτρικό οξείδιο  $n_{g3}$  με μεταβολή της τιμής του που κυμαίνεται μεταξύ 0.3 μέχρι 0.6 . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Με βάση τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού διαπιστώνεται ότι η μεταβολή του συντελεστή  $n_{g3}$  δεν συντελεί σε καμία ουσιαστική μεταβολή τόσο της συγκέντρωσης των MLSS όσο και της ζήτησης οξυγόνου και της ενεργειακής κατανάλωσης. (Πίνακες 4.58-4.59).

Πίνακας 4. 58: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή των νιτροδών σε νιτρικό οξείδιο

| $n_{g3}$ | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.6      | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.5      | 23238.02                        | 35.15%                        | 0.37               | 0.87      | 13.29   |
| 0.3      | 23201.29                        | 35.21%                        | 0.37               | 0.87      | 13.40   |

Πίνακας 4. 59: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή των νιτροδών σε νιτρικό οξείδιο

| $n_{g3}$ | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|----------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.6      | 17858.88                       | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 0.5      | 17867.41                       | 41556.88    | 20267.49     | 12756.90     | 4830.47      | 3702.03      |
| 0.3      | 17812.05                       | 41410.79    | 20186.47     | 12663.25     | 4860.46      | 3741.94      |

Για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια η νιτροποίηση είναι πλήρης και η απόδοση της βιολογικής βαθμίδας ως προς την απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα, των αιωρούμενων στερεών και του αζώτου δεν παρουσιάζει ουσιαστικές διαφοροποιήσεις (Πίνακας 4.60).

Πίνακας 4. 60: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικό οξείδιο

| $n_{g3}$ | Snh,e<br>(mg/l) | Ntot,e<br>(mg/l) | TSS,e<br>(mgSS/l) | COD,e<br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|----------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 0.6      | 0.027           | 10.47            | 16.99             | 50.32              | 7134.27          |
| 0.5      | 0.028           | 10.61            | 16.99             | 50.36              | 7138.93          |
| 0.3      | 0.029           | 10.88            | 17.00             | 50.38              | 7145.30          |

Αντίστοιχα μικρή είναι η επίδραση της τιμής του συντελεστή  $n_{g3}$  στην παραγωγή εκπομπών υποξειδίου του αζώτου (Πίνακας 4.61).αέριου υποξειδίου του αζώτουαέριου υποξειδίου του αζώτου.

Πίνακας 4. 61: Ποσοστό εκπομπών  $SN_2O$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικό οξείδιο

| $n_{g3}$ | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>$SN_2O/SN_{TOTAL}$<br>(%) |
|----------|--|
| 0.6      | 1.34   |
| 0.5      | 1.27   |
| 0.3      | 1.33   |

4.3.1.14 Σενάριο 1.14 Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή του νιτρικό οξείδιο σε αέριο υποξειδίου του αζώτου  $n_{g4}$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός της επίδρασης του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή του νιτρικό οξείδιο σε αέριο υποξειδίου του αζώτου  $n_{g4}$  με μεταβολή της τιμής του που κυμαίνεται μεταξύ 0.4 μέχρι 0.6 . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Με βάση τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού διαπιστώνεται ότι η μεταβολή του συντελεστή  $n_{g3}$  δεν συντελεί σε καμία ουσιαστική μεταβολή τόσο της συγκέντρωσης των MLSS όσο και της ζήτησης οξυγόνου και της ενεργειακής κατανάλωσης (Πίνακας 4.62-4.63).



Πίνακας 4. 62: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε αέριο υποξείδιου του αζώτου

| ng4 | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|-----|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.6 | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.5 | 23245.45                        | 35.14%                        | 0.37               | 0.87      | 13.24   |
| 0.4 | 23245.52                        | 35.14%                        | 0.37               | 0.87      | 13.24   |

Πίνακας 4. 63: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε αέριο υποξείδιου του αζώτου

| ng4 | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|-----|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.6 | 17858.88                       | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 0.5 | 17869.90                       | 41567.07    | 20326.27     | 12756.41     | 4809.43      | 3679.21      |
| 0.4 | 17869.59                       | 41566.89    | 20313.65     | 12766.67     | 4812.70      | 3679.31      |

Αντίστοιχα, η μεταβολή του συντελεστή δεν επιφέρει καμία ουσιαστική μεταβολή στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων (Πίνακας 4.64)

Πίνακας 4. 64: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του νιτρικού οξειδίου σε αέριο υποξείδιου του αζώτου

| ng4 | Snh,e (mg/l) | Ntot,e (mg/l) | TSS,e (mgSS/l) | COD,e (mgCOD/L) | EQI (kgpol/d) |
|-----|--------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|
| 0.6 | 0.027        | 10.47         | 16.99          | 50.32           | 7134.27       |
| 0.5 | 0.027        | 10.48         | 16.99          | 50.32           | 7134.77       |
| 0.4 | 0.028        | 10.48         | 16.99          | 50.32           | 7135.29       |

Τέλος αμελητέα είναι η επίδραση της τιμής του συντελεστή ng4 στην παραγωγή εκπομπών υποξείδιου του αζώτου (Πίνακας 4.65).

Πίνακας 4. 65: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| $n_{g4}$ | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub><br>(%) |
|----------|---|
| 0.6      | 1.34  |
| 0.5      | 1.36  |
| 0.4      | 1.35  |

4.3.1.15 Σενάριο 1.15 Επίδραση του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή του αέριο υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο  $n_{g5}$  στην απόδοση της εγκατάστασης.

#### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για τη μετατροπή του αέριο υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο  $n_{g5}$  με μεταβολή της τιμής του που κυμαίνεται μεταξύ 0.4 μέχρι 0.6 . Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Αναμένεται ότι με τη μείωση του μειωτικού συντελεστή το αέριο άζωτο θα μειωθεί και ο ρύπος του αέριου υποξειδίου του αζώτου θα αυξηθεί. Ακόμη βάσει των προηγούμενων σεναρίων δεν αναμένεται καμία μεταβολή στα υπόλοιπα συστατικά του μοντέλου. Με βάση τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού διαπιστώνεται ότι η μεταβολή του συντελεστή  $n_{g5}$  δεν συντελεί σε καμία ουσιαστική μεταβολή τόσο της συγκέντρωσης των MLSS όσο και της ζήτησης οξυγόνου και της ενεργειακής κατανάλωσης (Πίνακας 4.66-4.67)

Πίνακας 4. 66: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του αέριου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο

| $n_{g5}$ | Καταναλισκόμενη<br>Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό<br>Ανακτώμενης<br>Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|----------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.6      | 23235.71                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.5      | 23235.99                           | 35.16%                              | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 0.4      | 23248.79                           | 35.14%                              | 0.37               | 0.87      | 13.24   |

Πίνακας 4. 67: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του αέριου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο

| $n_{g5}$ | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|----------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.6      | 17858.88                       | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 0.5      | 17864.17                       | 41534.34    | 20311.10     | 12756.52     | 4809.36      | 3679.03      |
| 0.4      | 17864.38                       | 41579.14    | 20327.97     | 12777.24     | 4809.42      | 3678.66      |

Όπως καταγράφηκε και προηγουμένως η μεταβολή του συντελεστή δεν επιφέρει καμία ουσιαστική μεταβολή στην ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων (Πίνακας 4.68).

Πίνακας 4. 68: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του αέριου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο

| $n_{g5}$ | S <sub>nh,e</sub> (mg/l) | N <sub>tot,e</sub> (mg/l) | TSS <sub>e</sub> (mgSS/l) | COD <sub>e</sub> (mgCOD/L) | EQI (kgpol/d) |
|----------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------|
| 0.6      | 0.027                    | 10.47                     | 16.99                     | 50.32                      | 7134.27       |
| 0.5      | 0.027                    | 10.47                     | 16.99                     | 50.32                      | 7134.28       |
| 0.4      | 0.027                    | 10.47                     | 16.99                     | 50.32                      | 7134.32       |

Όπως ήταν αναμενόμενο η παραγωγή αέριου υποξειδίου του αζώτου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ορισμό της τιμής του συντελεστή  $n_{g5}$  (Πίνακας 4.69). Τα αποτελέσματα είναι τελείως λογικά καθώς η αντίδραση που εξετάζεται είναι υπεύθυνη για την κατανάλωση του αέριου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο.

Πίνακας 4. 69: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει του ανοξικού μειωτικού συντελεστή για μετατροπή του αέριου υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο

| $n_{g5}$ | Ποσοστό Εκπομπών SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub> (%) |
|----------|--|
| 0.6      | 1.344  |
| 0.5      | 1.582  |
| 0.4      | 1.941  |

#### 4.3.1.16 Επίδραση της μεταβολής των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων στο ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O

Πιο πάνω υπολογίστηκαν αναλυτικά για όλες τις παραμέτρους το ποσοστό εκπομπών του υποξειδίου του αζώτου. Κρίθηκε αναγκαίο να αναλυθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα και να ελεγχθεί η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων στο σύστημα. Συγκεκριμένα υπολογίζεται η ποσοστιαία μεταβολή του ποσοστού των εκπομπών σε κάθε μεταβολή της παραμέτρου. Η επίδραση θεωρείται μικρή όταν είναι λιγότερη από ±20% ,μέτρια για 20-40% και μεγάλη για μεγαλύτερη από 40%.

Πίνακας 4. 70: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο και η επίδραση της μεταβολής των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων

| Παράμετρος       | Τιμές παραμέτρου | Ποσοστό Εκπομπών SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub> (%) | Ποσοστιαία Μεταβολή (%) | Επίδραση |
|------------------|------------------|--|-------------------------|----------|
| Y <sub>H</sub>   | 0.5              | 1.283  | 0.00                    | -----    |
|                  | 0.55             | 1.221  | -4.91                   | Μικρή    |
|                  | 0.6              | 1.344  | 9.53                    | Μικρή    |
|                  | 0.67             | 1.412  | 4.96                    | Μικρή    |
| Y <sub>AOB</sub> | 0.08             | 0.923  | 0.00                    | -----    |
|                  | 0.13             | 0.966  | 4.55                    | Μικρή    |
|                  | 0.18             | 1.344  | 32.73                   | Μεσαία   |
|                  | 0.23             | 1.737  | 25.51                   | Μεσαία   |
| Y <sub>NOB</sub> | 0.04             | 0.923  | 0.00                    | -----    |
|                  | 0.06             | 1.305  | 34.32                   | Μεσαία   |
|                  | 0.08             | 1.344  | 2.92                    | Μικρή    |
|                  | 0.11             | 1.234  | -8.47                   | Μικρή    |
| μ <sub>H</sub>   | 4                | 1.355  | 0.00                    | -----    |
|                  | 5                | 1.336  | -1.38                   | Μικρή    |
|                  | 6                | 1.344  | 0.56                    | Μικρή    |
|                  | 7                | 1.281  | -4.77                   | Μικρή    |
| μ <sub>AOB</sub> | 0.3              | 0.15   | 0.00                    | -----    |
|                  | 0.4              | 1.23   | 156.09                  | Μεγάλη   |
|                  | 0.5              | 1.37   | 10.45                   | Μικρή    |
|                  | 0.6              | 1.44   | 5.16                    | Μικρή    |
|                  | 0.78             | 1.34   | -6.77                   | Μικρή    |
|                  | 0.85             | 1.32   | -2.01                   | Μικρή    |
| μ <sub>NOB</sub> | 0.3              | 4.257  | 0.00                    | -----    |
|                  | 0.4              | 3.989  | -6.50                   | Μικρή    |
|                  | 0.5              | 3.351  | -17.38                  | Μικρή    |
|                  | 0.6              | 2.335  | -35.76                  | Μεσαία   |
|                  | 0.78             | 1.344  | -53.88                  | Μεγάλη   |
|                  | 0.85             | 1.184  | -12.61                  | Μικρή    |

|                        |        |       |         |        |
|------------------------|--------|-------|---------|--------|
| k <sub>NH</sub>        | 0.05   | 1.344 | 0.00    | -----  |
|                        | 0.1    | 1.230 | -8.82   | Μικρή  |
|                        | 0.5    | 0.840 | -37.65  | Μεσαία |
|                        | 1      | 0.684 | -20.49  | Μεσαία |
| k <sub>s</sub>         | 2      | 1.384 | 0.00    | -----  |
|                        | 5      | 1.356 | -2.03   | Μικρή  |
|                        | 10     | 1.262 | -7.15   | Μικρή  |
|                        | 20     | 1.344 | 6.24    | Μικρή  |
| q <sub>AOBN2ONN</sub>  | 0.6504 | 0.707 | 0.00    | -----  |
|                        | 1.3008 | 1.344 | 62.10   | Μεγάλη |
|                        | 1.9512 | 1.967 | 37.65   | Μεσαία |
| q <sub>AOBAMO</sub>    | 2.6004 | 0.727 | 0.00    | -----  |
|                        | 5.2008 | 1.344 | 59.62   | Μεγάλη |
|                        | 7.8012 | 1.344 | 0.04    | Μικρή  |
| q <sub>AOBN2ONN</sub>  | 0.0039 | 1.353 | 0.00    | -----  |
|                        | 0.0078 | 1.344 | -0.66   | Μικρή  |
|                        | 0.0117 | 1.375 | 2.30    | Μικρή  |
| q <sub>AOBN2OND</sub>  | 0.6504 | 0.707 | 0.00    | -----  |
|                        | 1.3008 | 1.344 | 62.10   | Μεγάλη |
|                        | 1.9512 | 1.967 | 37.65   | Μεσαία |
| q <sub>AOBN2OHAO</sub> | 2.6004 | 8.58  | 0.00    | -----  |
|                        | 5.2008 | 1.34  | -145.85 | Μεγάλη |
|                        | 7.8012 | 2.95  | 74.75   | Μεγάλη |
| n <sub>g3</sub>        | 0.6    | 1.344 | 0.00    | -----  |
|                        | 0.5    | 1.268 | -5.75   | Μικρή  |
|                        | 0.3    | 1.333 | 4.99    | Μικρή  |
| n <sub>g4</sub>        | 0.6    | 1.344 | 0.00    | -----  |
|                        | 0.5    | 1.359 | 1.11    | Μικρή  |
|                        | 0.4    | 1.351 | -0.53   | Μικρή  |
| n <sub>g5</sub>        | 0.6    | 1.344 | 0.00    | -----  |
|                        | 0.5    | 1.582 | 16.29   | Μικρή  |
|                        | 0.4    | 1.941 | 20.42   | Μεσαία |

Οι παράμετροι που παρουσιάζουν μεγάλη επίδραση στο σύστημα είναι οι εξής:

- α) μ<sub>ΑΟΒ</sub> από 0.3-0.4 d<sup>-1</sup>
- β) μ<sub>ΝΟΒ</sub> από 0.5-0.78 d<sup>-1</sup>
- γ) k<sub>ΝΗ</sub> από 0.1-1 g NH<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup>
- δ) q<sub>ΑΟΒΝ2ΟΝΝ</sub> για όλες τις τιμές του
- ε) q<sub>ΑΟΒΑΜΟ</sub> 2.6-5.2 mgN/(mgCOD·d)
- στ) q<sub>ΑΟΒΝ2ΟΝΔ</sub> για όλες τις τιμές του
- ζ) q<sub>ΑΟΒΝ2ΟΗΑΟ</sub> για όλες τις τιμές του

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα αιτιολογηθούν οι λόγοι που παρουσιάζουν μεγάλη επίδραση οι πιο πάνω παράμετροι.

#### 4.3.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας της απόδοσης της εγκατάστασης

##### 4.3.2.1 Σενάριο 2.1 : Επίδραση του χρόνου παραμονής των στερεών, θc στην απόδοση της εγκατάστασης

###### Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός του χρόνου παραμονής των στερεών θc στην απόδοση της εγκατάστασης με μεταβολή της τιμής του που κυμαίνεται μεταξύ 3 μέχρι 20 d. Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

###### Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής των στερεών στο σύστημα, τόσο η συγκέντρωση της βιομάζας θα αυξάνεται (Πίνακας 4.71), εκτός αν είναι τόσο μεγάλος ο χρόνος παραμονής των στερεών που λόγω έλλειψης τροφής θα διασπώνται για κατανάλωση ενέργειας.

Η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται όσο αυξάνονται και τα στερεά μέχρι που φθάνει ένα μέγιστο σε χρόνο παραμονής 10 d όπου η παραγωγή των στερεών σταθεροποιείται. Επίσης, παράλληλα με την αύξηση του χρόνου παραμονής, μεγαλύτερη μάζα στερεών εισέρχεται στο χωνευτή οδηγώντας σε μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου.

Πίνακας 4. 71: Συγκεντρώσεις οργανικών και ολικών στερεών στο βιοαντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών

| Θc (d) | MLVSS(grVSS/m <sup>3</sup> ) | MLSS(grCOD/m <sup>3</sup> ) | MLSS(grSS/m <sup>3</sup> ) |
|--------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 3      | 741.5118                     | 1052.947                    | 1065.687                   |
| 4      | 934.7349                     | 1327.323                    | 1364.107                   |
| 5      | 1108.707                     | 1574.365                    | 1636.766                   |
| 7      | 1419.144                     | 2015.185                    | 2150.01                    |
| 10     | 1847.452                     | 2623.382                    | 2871.306                   |
| 12     | 2096.493                     | 2977.02                     | 3278.027                   |
| 15     | 2470.514                     | 3508.129                    | 3917.544                   |
| 17     | 2694.696                     | 3826.469                    | 4235.721                   |
| 20     | 2836.575                     | 4027.936                    | 4532.763                   |

Πίνακας 4. 72: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών

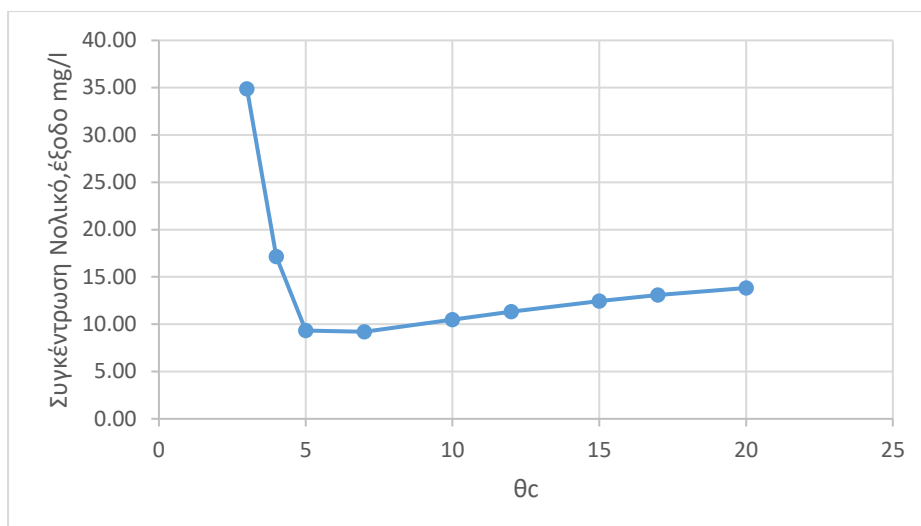
| Θc (d) | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN  |
|--------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|----------|
| 3      | 19241.0500                      | 51.68%                        | 0.3103             | 0.7034    | 78.4741  |
| 4      | 21315.3500                      | 44.82%                        | 0.3438             | 0.7813    | 15.8628  |
| 5      | 22310.0400                      | 41.32%                        | 0.3598             | 0.8217    | 12.2117  |
| 7      | 22932.5800                      | 37.92%                        | 0.3699             | 0.8530    | 12.4974  |
| 10     | 23235.7100                      | 35.16%                        | 0.3748             | 0.8742    | 13.2301  |
| 12     | 23316.36                        | 33.93%                        | 0.37607            | 0.883121  | 13.68215 |
| 15     | 23357.49                        | 32.68%                        | 0.376734           | 0.894284  | 14.30056 |
| 17     | 23314.57                        | 32.13%                        | 0.376042           | 0.898746  | 14.62955 |
| 20     | 23207.13                        | 31.58%                        | 0.374309           | 0.8987    | 14.99605 |

Επιπροσθέτως, όπως αποτυπώνεται στον Πίνακα 4.73, όσο παραμένει η βιομάζα στο σύστημα τόσο αυξάνονται οι ανάγκες σε οξυγόνο .

Πίνακας 4. 73: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών

| Θc (d) | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|--------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 3      | 10387.3700                     | 24523.41    | 14530.53     | 5990.85      | 2322.67      | 1697.22      |
| 4      | 13933.9700                     | 36399.27    | 16638.72     | 10547.92     | 5273.50      | 3896.49      |
| 5      | 15802.2400                     | 36399.27    | 16638.72     | 10547.92     | 5273.50      | 3896.49      |
| 7      | 16955.7700                     | 39454.25    | 18153.35     | 12404.78     | 5165.33      | 3625.13      |
| 10     | 17858.8800                     | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 12     | 18217.77                       | 42514.88    | 21354.94     | 12545.41     | 4774.401     | 3796.742     |
| 15     | 18657.8                        | 43475.08    | 22586.17     | 12124.47     | 4809.771     | 3986.687     |
| 17     | 18849.77                       | 43975.38    | 22965.96     | 12035.85     | 4870.105     | 4083.6       |
| 20     | 19108.4                        | 44575.25    | 23395.29     | 11971.14     | 4944.283     | 4201.226     |

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11, για μικρό χρόνο παραμονής στερεών, μέχρι 4 d, δε γίνεται ικανοποιητική οξειδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη ενώ μετά τις 5 d η οξειδωση είναι πρακτικά πλήρης. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά και το COD αυξάνονται με την αύξηση του θ<sub>c</sub>. Ο δείκτης ποιότητας της εκροής για μικρές τιμές θ<sub>c</sub> παρουσιάζει μέγιστο λόγω της υψηλής συγκέντρωσης αμμωνίας ενώ στην συνέχεια μειώνεται απότομα και αυξάνει με μικρούς ρυθμούς πλέον, λόγω αύξησης της βιομάζας, αυτό αντανakλάται και στο ολικό άζωτο (Πίνακας 4.74) .



Σχήμα 4. 11 : Συγκέντρωση του ολικού αζώτου εξόδου συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών

Πίνακας 4. 74: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών

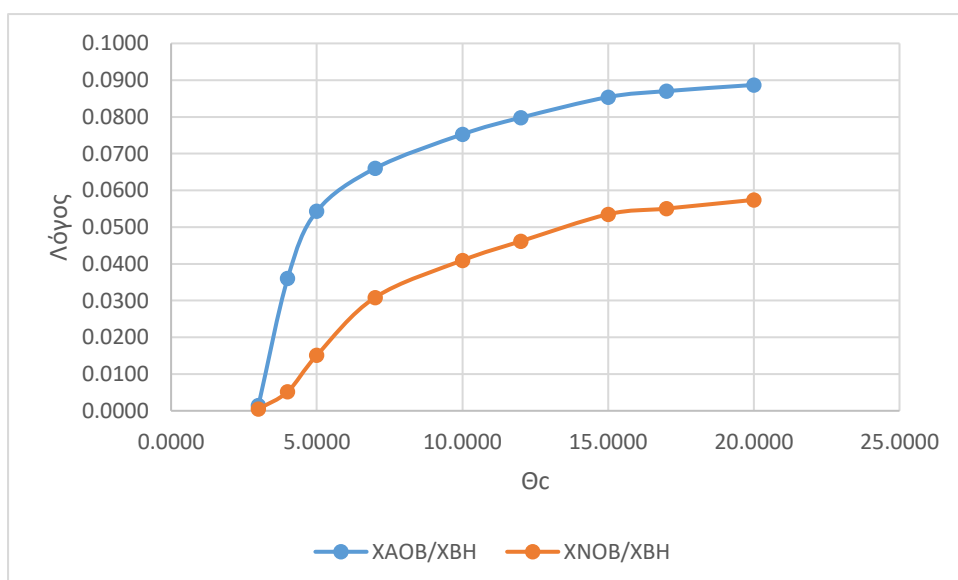
| θc (d) | Snh,e (mg/l) | Ntot,e (mg/l) | TSS,e (mgSS/l) | COD,e (mgCOD/L) | EQI (kgpol/d) |
|--------|--------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|
| 3      | 33.83        | 34.87         | 5.71           | 37.83           | 66818.99      |
| 4      | 7.87         | 17.13         | 7.39           | 38.98           | 19030.51      |
| 5      | 0.0745       | 9.33          | 9.00           | 41.10           | 5036.16       |
| 7      | 0.0324       | 9.20          | 12.15          | 45.42           | 5916.11       |
| 10     | 0.0275       | 10.47         | 16.99          | 50.32           | 7134.27       |
| 12     | 0.026        | 11.32         | 19.99          | 53.19           | 7861.179      |
| 15     | 0.025        | 12.46         | 25.11          | 57.77           | 9042.64       |
| 17     | 0.025        | 13.10         | 28.06          | 60.63           | 9743.43       |
| 20     | 0.025        | 13.84         | 30.68          | 62.53           | 10320.34      |

Η αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Πρακτικά με την αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών αυξάνονται οι άμεσες εκπομπές που οφείλονται στην ανάπτυξη της βιομάζας και οι έμμεσες εκπομπές λόγω της ενεργειακής κατανάλωσης. Παράλληλα όμως μειώνεται η παραγωγή ιλύος με αποτέλεσμα την μείωση των αντίστοιχων εκπομπών (άμεσων και έμμεσων) που σχετίζονται με την επεξεργασία της (Πίνακας 4.75).



Πίνακας 4. 75: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ανηγμένοι συντελεστές συναρτήσεσι του χρόνου παραμονής των στερεών

| Θc (d) | kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> | kgCO <sub>2</sub> /kgCOD | kgCO <sub>2</sub> /kgN | CO <sub>2</sub> ,total(kg/d) |
|--------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| 3      | 0.60                              | 1.37                     | 152.58                 | 37409.85                     |
| 4      | 0.56                              | 1.28                     | 25.95                  | 34876.34                     |
| 5      | 0.53                              | 1.21                     | 18.04                  | 32975.36                     |
| 7      | 0.49                              | 1.15                     | 17.41                  | 31484.07                     |
| 10     | 0.49                              | 1.15                     | 17.41                  | 30579.13                     |
| 12     | 0.48                              | 1.14                     | 17.61                  | 30011.56                     |
| 15     | 0.47                              | 1.12                     | 17.93                  | 29295.82                     |
| 17     | 0.46                              | 1.11                     | 18.08                  | 28816.58                     |
| 20     | 0.45                              | 1.08                     | 18.03                  | 27915.36                     |



Σχήμα 4. 12 : Λόγοι  $X_{AOB}/X_{BH}$  και  $X_{NOB}/X_{BH}$  συναρτήσεσι του χρόνου παραμονής των στερεών

Η παραγωγή αερίου υποξειδίου του αζώτου παρουσιάζει μεταβολή με την αύξηση του χρόνου παραμονής. Αρχικά, υπάρχουν μηδενικές εκπομπές για χρόνο παραμονής ίσο με 3 d λόγω της μη οξείδωσης της υδροξυλαμίνης, ενώ στη συνέχεια, παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση στις 4 και 5 d λόγω της αύξησης των AOB σε σχέση με την ετεροτροφική βιομάζα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Για  $\theta_c$  μεγαλύτερο των 5 ημερών παρατηρείται μείωση στην παραγωγή υποξειδίου του αζώτου η οποία σχετίζεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των NOB αερίου υποξειδίου του αζώτου. Μετά τις 15 μέρες οι εκπομπές σταθεροποιούνται (Πίνακας 4.76)

Πίνακας 4. 76: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσσει του χρόνου παραμονής των στερεών

| Θc (d) | Ποσοστό Εκπομπών SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub> (%) |
|--------|--|
| 3      | 0.05   |
| 4      | 1.96   |
| 5      | 3.16   |
| 7      | 1.79   |
| 10     | 1.34   |
| 12     | 1.23   |
| 15     | 1.14   |
| 17     | 1.17   |
| 20     | 1.20   |

4.3.2.2. Σενάριο 2.2 : Επίδραση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης στην απόδοση της εγκατάστασης

Στόχος σεναρίου

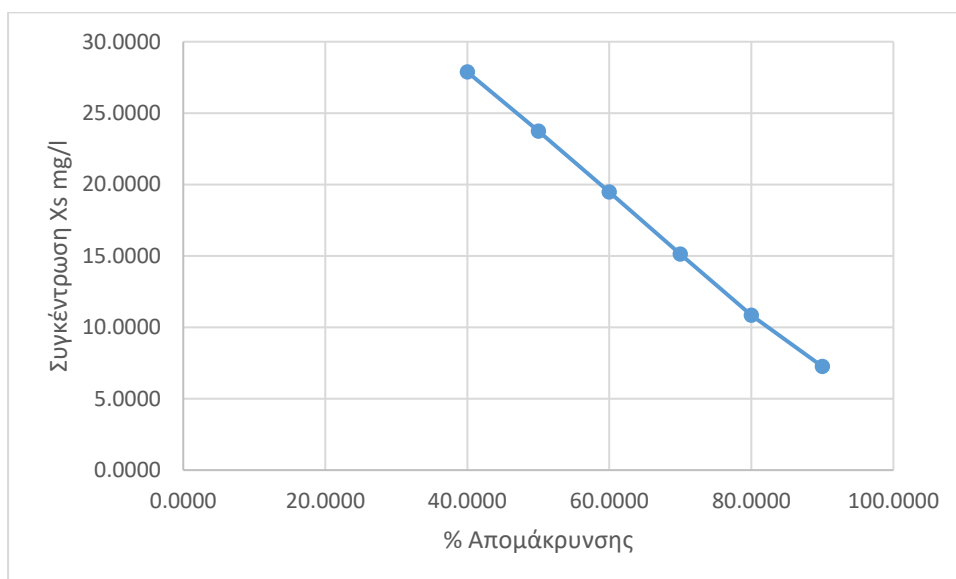
Ο προσδιορισμός του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης κυμαίνεται μεταξύ 40%-90%. Οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές που φαίνονται στον πίνακα 3.3 όπως και οι υπόλοιπες συνθήκες.

Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Αναμένεται ότι όσο μεγαλώνει ο βαθμός απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης τόσο η βιομάζα θα μειώνεται λόγω της έλλειψης τροφής . Όσο αυξάνεται ο βαθμός απομάκρυνσης παρατηρούμε ότι η παραγωγή βιοαερίου αυξάνεται (Πίνακας 4.77) καθώς περισσότερα συστατικά οδηγούνται κατευθείαν στον χωνευτή. Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αργά βιοδιασπάσιμης τροφής όπως δείχνει το Σχήμα 4.13.

Πίνακας 4. 77: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης

| ΔΠΚ | Παραγωγή Βιοαερίου (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Θερμική Ενέργεια (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Ηλεκτρική ενέργεια (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Απώλειες Ενέργειας (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Περίσσια θερμικής ενέργειας (10 <sup>6</sup> kcal/d) |
|-----|---|---|---|---|--|
| 0.4 | 16.99                                       | 8.49                                      | 5.95  | 2.55  | 5.27   |
| 0.5 | 20.07                                       | 10.03                                     | 7.02  | 3.01  | 5.73   |
| 0.6 | 23.18                                       | 11.59                                     | 8.11  | 3.48  | 6.15   |
| 0.7 | 26.28                                       | 13.14                                     | 9.20  | 3.94  | 6.60   |
| 0.8 | 29.48                                       | 14.74                                     | 10.32                                       | 4.42  | 7.05   |
| 0.9 | 32.70                                       | 16.35                                     | 11.44                                       | 4.90  | 7.52   |



Σχήμα 4. 13:Μεταβολή της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής βιομάζας συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης

Συνεχίζοντας παρατηρούμε ότι η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται και ανακτάται σε υψηλό βαθμό. Για παράδειγμα για βαθμό απομάκρυνσης 90% το ποσοστό ενέργειας που ανακτάται πλησιάζει το 60% (Πίνακας 4.78)

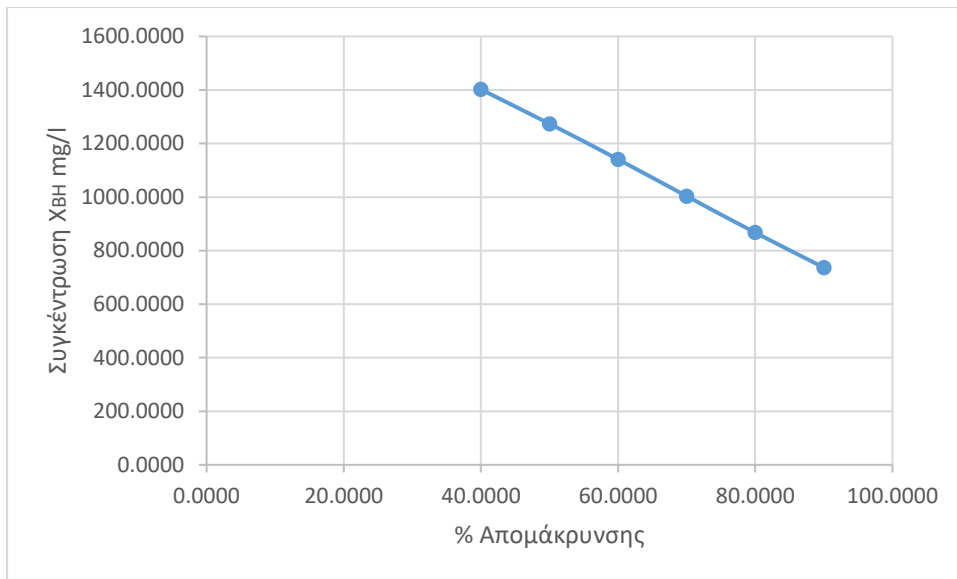
Πίνακας 4. 78: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| ΔΠΚ | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|-----|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.4 | 24002.0900                      | 28.81%                        | 0.3871             | 0.9076    | 13.7156 |
| 0.5 | 23235.7100                      | 35.16%                        | 0.3748             | 0.8742    | 13.2301 |
| 0.6 | 22398.4300                      | 42.12%                        | 0.3613             | 0.8379    | 12.7242 |
| 0.7 | 21550.3800                      | 49.65%                        | 0.3476             | 0.8025    | 12.2633 |
| 0.8 | 20714.4300                      | 57.94%                        | 0.3341             | 0.7676    | 11.9430 |
| 0.9 | 20043.7300                      | 66.40%                        | 0.3233             | 0.7393    | 12.0556 |

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η ποσότητα των στερεών που οδηγείται στο στάδιο της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας μειώνεται. Η διαθέσιμη τροφή είναι αρκετά μειωμένη και αυτό έχει αντίκτυπο στην ετεροτροφική βιομάζα που μειώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Επιπλέον η μείωση της ετεροτροφικής βιομάζας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απαιτήσεων σε οξυγόνο(Πίνακας 4.79)

Πίνακας 4. 79: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης

| %ΔΠΚ | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.4  | 19048.1400                     | 44240.27    | 21765.7100   | 13484.98     | 5115.9290    | 3957.2490    |
| 0.5  | 17858.8800                     | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 0.6  | 16634.8000                     | 38741.86    | 18823.1100   | 12001.83     | 4495.1520    | 3392.9200    |
| 0.7  | 15377.8700                     | 35852.6     | 17309.6000   | 11211.24     | 4169.7420    | 3093.6830    |
| 0.8  | 14189.9500                     | 32976.42    | 15893.8000   | 10436.52     | 3863.0590    | 2810.0380    |
| 0.9  | 13199.6000                     | 30703.91    | 14789.5200   | 9780.72      | 3592.3140    | 2542.3930    |

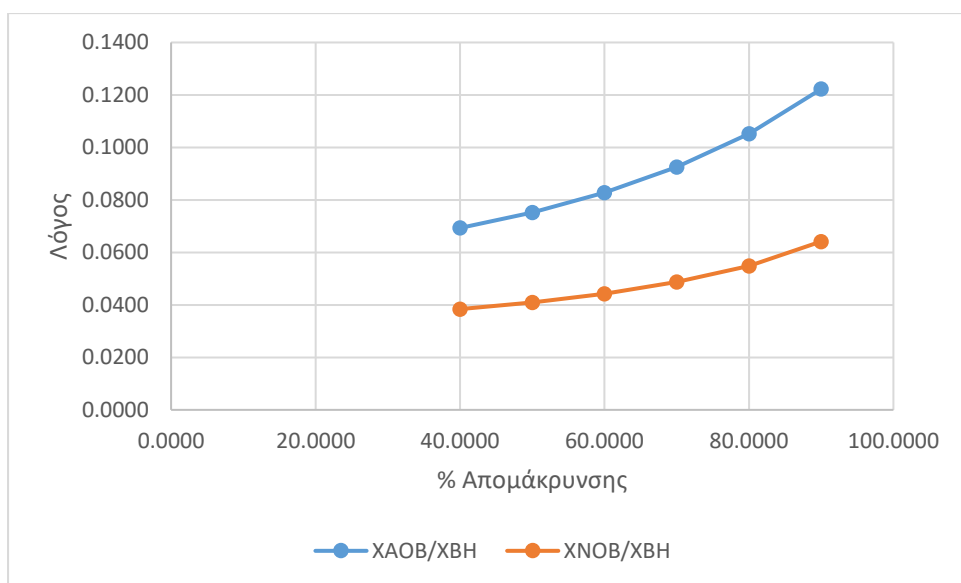


Σχήμα 4. 14: Μεταβολή της συγκέντρωσης της ετεροτροφικής βιομάζας συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης

Με βάση τα αποτελέσματα του παρόντος σεναρίου διαπιστώνεται ότι η αύξηση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της ποιότητας εκροή ως προς τα αιωρούμενα στερεά και τον οργανικό άνθρακα, η οποία ασφαλώς σχετίζεται με την μείωση των προς επεξεργασία ρύπων στα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα, αλλά και μία μικρή αύξηση στη συγκέντρωση του ολικού αζώτου (Πίνακας 4.80). Η αύξηση αυτή καταγράφεται μόνο στα σενάρια πολύ υψηλής απόδοσης στην πρωτοβάθμια καθίζηση (μεγαλύτερης από 80%) και σχετίζεται με την αύξηση των νιτρικών της εξόδου (η νιτροποίηση είναι πρακτικά πλήρης σε όλα τα σενάρια). Η αύξηση των νιτρικών η οποία μπορεί να μην είναι πολύ υψηλή αλλά είναι αξιόλογη (της τάξης του 1-1.5 mg/L) σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα του οργανικού άνθρακα για απονιτροποίηση και ειδικότερα με την μείωση του λόγου C/N που καταγράφεται στα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα σε περιπτώσεις πολύ υψηλής απόδοσης στο στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας. Αυτή η μείωση στο λόγο C/N έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου των νιτροποιητών προς τα ετεροτροφικά βακτήρια (Σχήμα 4.15). Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε σχήματα επεξεργασίας λυμάτων που περιλαμβάνουν ενισχυμένη πρωτοβάθμια επεξεργασία στην οποία μπορεί να επιτευχθεί απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών της τάξης του 80-90%, το συμβατικό σύστημα βιολογικής επεξεργασίας μέσω νιτροποίησης – απονιτροποίησης ίσως να μην επαρκεί και να πρέπει να αναζητηθούν άλλες διεργασίες πιο κατάλληλες για την επεξεργασία λυμάτων με χαμηλό λόγο C/N (π.χ. νιτροδοποίηση – απονιτροδοποίηση, νιτροδοποίηση – anammox).

Πίνακας 4. 80: Ποιότητα εκροής συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης

| ΔΠΚ | Snh,e<br>(mg/l) | Ntot,e<br>(mg/l) | TSS,e<br>(mgSS/l) | COD,e<br>(mgCOD/L) | EQI<br>(kgpol/d) |
|-----|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 0.4 | 0.0295          | 10.5752          | 19.7571           | 52.48              | 7828.46          |
| 0.5 | 0.0275          | 10.4740          | 16.9913           | 50.32              | 7134.27          |
| 0.6 | 0.0255          | 10.4094          | 13.9943           | 47.90              | 6390.21          |
| 0.7 | 0.0237          | 10.4581          | 11.3535           | 45.88              | 5732.76          |
| 0.8 | 0.0219          | 10.8275          | 8.8842            | 43.78              | 5099.64          |
| 0.9 | 0.0199          | 11.9874          | 6.4862            | 41.75              | 4489.13          |



Σχήμα 4. 15: Λόγοι  $X_{AOB}/X_{BH}$  και  $X_{NOB}/X_{BH}$  συναρτήσει του χρόνου παραμονής των στερεών συναρτήσει του βαθμού απομάκρυνσης στερεών στην δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης

Με την αύξηση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης παρατηρείται καταρχήν μία μικρή αύξηση στην παραγωγή εκπομπών υποξειδίου του αζώτου η οποία σχετίζεται με τη μείωση της συγκέντρωσης της ετεροτροφικής βιομάζας και συνεπώς της απονιτροποιητικής βιομάζας και συνεπώς την ελαχιστοποίηση της μετατροπής του υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο. αέριου υποξειδίου του αζώτου. Η περαιτέρω σημαντική αύξηση των εκπομπών του υποξειδίου του αζώτου σχετίζεται τόσο με την αύξηση του λόγου των νιτροποιητών έναντι της ετεροτροφικής βιομάζας, όσο και με την απότομη μείωση της συγκέντρωσης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών για υψηλές αποδόσεις (Πίνακας 4.81).

Πίνακας 4. 81: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσσει της απόδοσης της ετεροτροφικής βιομάζας

| ΔΠΚ | Ποσοστό<br>Εκπομπών<br>SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub><br>(%) |
|-----|---|
| 0.4 | 1.284545556   |
| 0.5 | 1.343597832   |
| 0.6 | 1.480869912   |
| 0.7 | 1.690107217   |
| 0.8 | 2.312645041   |
| 0.9 | 11.79778573   |

#### 4.3.2.3 Σενάριο 2.3 : Επίδραση της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός της επίδρασης της ποιότητας των ανεπεξέργαστων λυμάτων στην εγκατάσταση. Συγκεκριμένα εξετάζονται τρία σενάρια σε καθένα από τα οποία μεταβάλλεται η συγκέντρωση του εύκολα και του αργά βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα των ανεπεξέργαστων λυμάτων.

#### Αποτελέσματα σεναρίου, σχολιασμός

Με βάση τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων διαπιστώνεται ότι όσο πιο μεγάλη είναι η συγκέντρωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης τόσο πιο πολλή ετεροτροφική βιομάζα παράγεται γιατί οι οργανισμοί καταναλώνουν άμεσα την τροφή χωρίς να περιμένουν την υδρόλυση. Η παραγωγή βιοαερίου όπως θα ανέμενε κάποιος αυξάνεται όσο πιο πολλή αργά βιοδιασπάσιμη τροφή μπαίνει στο σύστημα Πίνακας 4.82. Ο λόγος ίσως είναι ότι δεν προλαβαίνει να υδρολυθεί άρα η ποσότητα που οδηγείται στον χωνευτή είναι μεγαλύτερη.

Πίνακας 4. 82: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης

| SS-XS(mg/l)    | Παραγωγή Βιοαερίου (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Θερμική Ενέργεια (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Ηλεκτρική ενέργεια (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Απώλειες Ενέργειας (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Περίσσια θερμικής ενέργειας (10 <sup>6</sup> kcal/d) |
|----------------|---|---|---|---|--|
| 71.85 - 318.15 | 23.67                                       | 11.83                                     | 8.28  | 3.55  | 6.18   |
| 140-250        | 20.07                                       | 10.03                                     | 7.02  | 3.01  | 5.73   |
| 215.55-174.45  | 16.04                                       | 8.02                                      | 5.61  | 2.41  | 5.21   |

Με την αύξηση του εύκολα βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα καταγράφεται αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης η οποία σχετίζεται με την μεγαλύτερη ενεργότητα της ετεροτροφικής βιομάζας και την συνεπαγόμενη αύξηση της ζήτησης οξυγόνου (Πίνακες 4.83-4.85).

Πίνακας 4. 83: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης

| SS-XS(mg/l)    | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|----------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 71.85 - 318.15 | 22614.09                        | 43.21%                        | 0.36               | 0.85      | 13.34   |
| 140-250        | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 215.55-174.45  | 23956.34                        | 27.54%                        | 0.39               | 0.90      | 13.57   |

Πίνακας 4. 84: Συγκέντρωση ετεροτροφικής βιομάζας στην 1<sup>η</sup> δεξαμενή αερισμού συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης

| SS-XS(mg/l)    | XBH(mg/l) |
|----------------|-----------|
| 71.85 - 318.15 | 1129.6930 |
| 140-250        | 1273.7670 |
| 215.55-174.45  | 1433.4750 |



Πίνακας 4. 85: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης

| SS-XS          | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|----------------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 71.85 - 318.15 | 16855.27                       | 39117.86    | 18749.80     | 12396.70     | 4579.28      | 3427.56      |
| 140-250        | 17858.88                       | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 215.55-174.45  | 19041.73                       | 44357.34    | 22721.30     | 12814.44     | 4971.31      | 3901.71      |

Παρατηρούμε μία μικρή αύξηση στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού άνθρακα οι οποίες σχετίζονται με την αύξηση των MLSS και συνεπώς της φόρτισης στερεών της δεξαμενής καθίζησης η οποία οδηγεί στην διαφυγή περισσότερων αιωρούμενων στερεών στην έξοδο και συνεπώς και στην αύξηση του COD. Αντίθετα η αύξηση του διαθέσιμου εύκολα βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα ευνοεί την απονιτροποίηση με αποτέλεσμα να οδηγεί στην μείωση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην έξοδο του συστήματος ενεργού ιλύος.

Πίνακας 4. 86: Ποιότητα εκροής συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης

| SS-XS(mg/l)    | Sn <sub>h,e</sub> (mg/l) | N <sub>tot,e</sub> (mg/l) | TSS <sub>e</sub> (mgSS/l) | COD <sub>e</sub> (mgCOD/L) | EQI (kgpol/d) |
|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------|
| 71.85 - 318.15 | 0.024                    | 11.463                    | 15.730                    | 49.132                     | 6713.312      |
| 140-250        | 0.027                    | 10.474                    | 16.991                    | 50.321                     | 7134.271      |
| 215.55-174.45  | 0.034                    | 10.325                    | 18.375                    | 51.256                     | 7575.350      |

Ως αποτέλεσμα της αύξησης της απονιτροποίησης με την αύξηση του εύκολα βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα, καταγράφεται και μείωση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου (Πίνακας 4.87)

Πίνακας 4. 87: Ποσοστό εκπομπών SN<sub>2</sub>O προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει της ποιότητας λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης

| SS-XS          | Ποσοστό Εκπομπών SN <sub>2</sub> O/SN <sub>TOTAL</sub> (%) |
|----------------|--|
| 71.85 - 318.15 | 2.134  |
| 140-250        | 1.344  |
| 215.55-174.45  | 1.133  |

4.3.2.4 Σενάριο 2.4 : Επίδραση των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα στην απόδοση της εγκατάστασης

Στόχος σεναρίου

Ο προσδιορισμός της επίδρασης των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα στην απόδοση της εγκατάστασης γίνεται με την μεταβολή της συγκέντρωσης του οξυγόνου στις αερόβιες δεξαμενές. Συγκεκριμένα ο μέγιστος αερισμός αφορά επίπεδα οξυγόνου και στις 4 δεξαμενές της τάξης των 5mg/L και το ελάχιστο σε τιμές της τάξης του 0.2 mg/L .

Αποτελέσματα σεναρίου σχολιασμός

Με βάση τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η αύξηση των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου στα αεριζόμενα διαμερίσματα του βιολογικού αντιδραστήρα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Αντίθετα η ρύθμιση διαφορετικών συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου δεν έχει καμία πρακτική επίπτωση στην παραγωγή βιοαερίου με αποτέλεσμα την μείωση του ποσοστού ανάτησης ενέργειας με την αύξηση των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου (Πίνακας 4.88-4.89).

Πίνακας 4. 88: Παραγόμενη ενέργεια και θερμικές απαιτήσεις συστήματος συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα

| Συγκέντρωση Οξυγόνου(mg/l) | Παραγωγή Βιοαερίου (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Θερμική Ενέργεια (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Ηλεκτρική ενέργεια (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Απώλειες Ενέργειας (10 <sup>6</sup> kcal/d) | Περίσσια θερμικής ενέργειας (10 <sup>6</sup> kcal/d) |
|----------------------------|---|---|---|---|--|
| 0.2,0.2,0.2,0.2            | 19.76                                       | 9.88                                      | 6.92  | 2.96  | 5.63   |
| 0.5,0.5,0.5,0.5            | 19.88                                       | 9.94                                      | 6.96  | 2.98  | 5.66   |
| 1,1,1,1                    | 20.07                                       | 10.03                                     | 7.02  | 3.01  | 5.72   |
| 1.5,1.5,1.5,1.5            | 20.07                                       | 10.04                                     | 7.03  | 3.01  | 5.73   |
| 2,2,2,2                    | 20.07                                       | 10.03                                     | 7.02  | 3.01  | 5.73   |
| 2.5,2,1.5,1                | 20.08                                       | 10.04                                     | 7.03  | 3.01  | 5.73   |
| 3,3,3,3                    | 20.07                                       | 10.03                                     | 7.02  | 3.01  | 5.73   |
| 4,2,1,0.5                  | 20.08                                       | 10.04                                     | 7.03  | 3.01  | 5.73   |
| 4,3,2,1                    | 20.08                                       | 10.04                                     | 7.03  | 3.01  | 5.73   |
| 4,4,4,4                    | 20.02                                       | 10.01                                     | 7.01  | 3.00  | 5.73   |
| 5,5,5,5                    | 20.02                                       | 10.01                                     | 7.01  | 3.00  | 5.73   |

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός για τα σενάρια που δεν έχουν σταθερή συγκέντρωση οξυγόνου ότι ακόμα και αν συνολική ποσότητα τους είναι μικρότερη από άλλα σενάρια, το μόνο που παίζει ρόλο είναι η συγκέντρωση του πρώτου υδατικού διαμερίσματος. Πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τον επόμενο πίνακα στην κατανάλωση οξυγόνου.

Πίνακας 4. 89: Ποσοστό ανακτώμενης και καταναλισκόμενη ενέργεια συστήματος συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα

| Συγκέντρωση Οξυγόνου(mg/l) | Καταναλισκόμενη Ενέργεια(kWh/d) | Ποσοστό Ανακτώμενης Ενέργειας | kWh/m <sup>3</sup> | kWh/kgCOD | kWh/kgN |
|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|---------|
| 0.2,0.2,0.2,0.2            | 17509.62                        | 45.94%                        | 0.28               | 0.66      | -520.84 |
| 0.5,0.5,0.5,0.5            | 18553.23                        | 43.61%                        | 0.30               | 0.69      | 31.15   |
| 1,1,1,1                    | 21233.66                        | 38.47%                        | 0.34               | 0.79      | 11.18   |
| 1.5,1.5,1.5,1.5            | 22268.65                        | 36.69%                        | 0.36               | 0.84      | 12.28   |
| 2,2,2,2                    | 23235.71                        | 35.16%                        | 0.37               | 0.87      | 13.23   |
| 2.5,2,1.5,1                | 23556.74                        | 34.69%                        | 0.38               | 0.88      | 13.00   |
| 3,3,3,3                    | 25598.39                        | 31.91%                        | 0.41               | 0.96      | 15.28   |
| 4,2,1,0.5                  | 26117.61                        | 31.32%                        | 0.42               | 0.98      | 14.23   |
| 4,3,2,1                    | 26851.03                        | 30.43%                        | 0.43               | 1.01      | 15.27   |
| 4,4,4,4                    | 29027.58                        | 28.07%                        | 0.47               | 1.10      | 17.67   |
| 5,5,5,5                    | 34338.18                        | 23.73%                        | 0.55               | 1.30      | 21.37   |

Πίνακας 4. 90: Ζητήσεις οξυγόνου για κάθε αεριζόμενη δεξαμενή σε τυπικές συνθήκες SOTR συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα

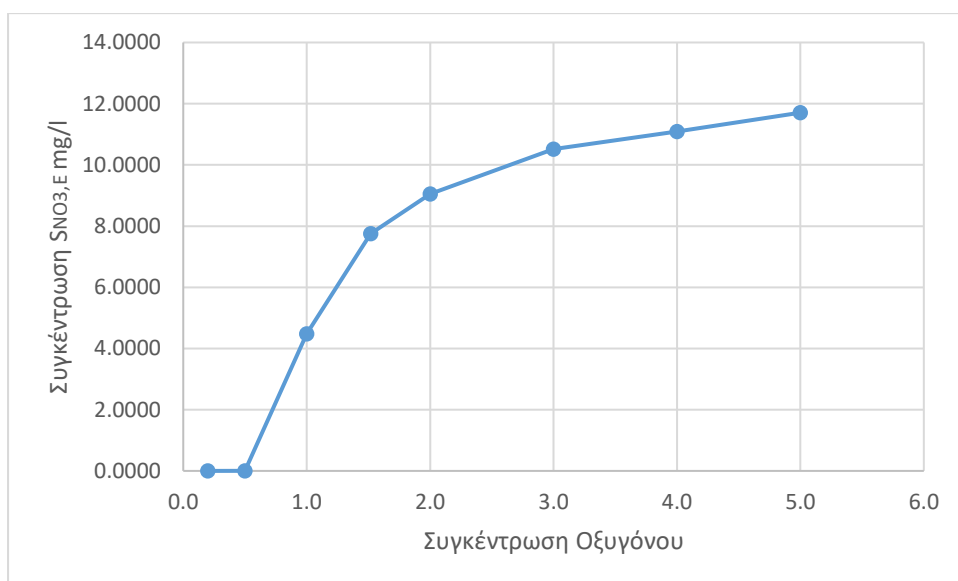
| Συγκέντρωση Οξυγόνου(mg/l) | Ημερήσιο O <sub>2</sub> (kg/d) | SOTR (kg/d) | SOTR1 (kg/d) | SOTR2 (kg/d) | SOTR3 (kg/d) | SOTR4 (kg/d) |
|----------------------------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.2,0.2,0.2,0.2            | 11902.16                       | 21820.31    | 11245.00     | 6060.90      | 2539.62      | 1943.41      |
| 0.5,0.5,0.5,0.5            | 13303.00                       | 25378.28    | 13842.49     | 6331.75      | 2825.34      | 2325.67      |
| 1,1,1,1                    | 17236.46                       | 34553.09    | 15695.06     | 10573.31     | 4890.23      | 3374.40      |
| 1.5,1.5,1.5,1.5            | 17659.94                       | 38149.89    | 17901.98     | 12069.15     | 4716.21      | 3434.98      |
| 2,2,2,2                    | 17858.88                       | 41533.34    | 20309.63     | 12756.18     | 4807.83      | 3679.03      |
| 2.5,2,1.5,1                | 17722.20                       | 42653.14    | 23879.17     | 12253.10     | 3944.07      | 2586.33      |
| 3,3,3,3                    | 18124.29                       | 49800.85    | 25646.45     | 14367.13     | 5498.47      | 4370.19      |
| 4,2,1,0.5                  | 17680.92                       | 51610.35    | 35639.41     | 10763.63     | 3085.26      | 2130.31      |
| 4,3,2,1                    | 17789.55                       | 54177.81    | 34404.77     | 13563.83     | 3868.76      | 2283.97      |
| 4,4,4,4                    | 18379.76                       | 61804.82    | 32981.88     | 16826.66     | 6608.59      | 5353.36      |
| 5,5,5,5                    | 18663.62                       | 80390.06    | 43874.99     | 21190.99     | 8430.47      | 6876.15      |

Η διαφοροποίηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην απόδοση του συστήματος ενεργού ιλύος κυρίως ως προς τη νιτροποίηση (Πίνακας 4.91). Ειδικότερα για συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου μικρότερες από 1 mg/L η νιτροποίηση είναι εξαιρετικά περιορισμένη, ενώ αντιθέτως η μικρή αύξηση που

παρατηρείται στη συγκέντρωση του ολικού άζωτου οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών (Σχήμα 4.16)

Πίνακας 4. 91: Ποιότητα εκροής συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα

| Συγκέντρωση Οξυγόνου(mg/l) | Snh,e (mg/l) | Ntot,e (mg/l) | TSS,e (mgSS/l) | COD,e (mgCOD/L) | EQI (kgpol/d) |
|----------------------------|--------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|
| 0.2,0.2,0.2,0.2            | 38.397       | 39.362        | 16.046         | 49.764          | 78121.050     |
| 0.5,0.5,0.5,0.5            | 25.996       | 29.206        | 16.345         | 46.594          | 54861.830     |
| 1,1,1,1                    | 0.059        | 8.158         | 16.943         | 47.838          | 6943.583      |
| 1.5,1.5,1.5,1.5            | 0.035        | 9.547         | 16.999         | 49.423          | 7065.934      |
| 2,2,2,2                    | 0.027        | 10.474        | 16.991         | 50.321          | 7134.271      |
| 2.5,2,1.5,1                | 0.035        | 9.581         | 17.018         | 49.113          | 7042.571      |
| 3,3,3,3                    | 0.021        | 11.782        | 16.988         | 51.165          | 7201.872      |
| 4,2,1,0.5                  | 0.046        | 9.205         | 17.048         | 48.118          | 6975.878      |
| 4,3,2,1                    | 0.032        | 10.435        | 17.030         | 49.459          | 7072.895      |
| 4,4,4,4                    | 0.019        | 12.307        | 16.980         | 51.617          | 7237.698      |
| 5,5,5,5                    | 0.018        | 12.881        | 16.984         | 51.849          | 7258.814      |



Σχήμα 4. 16: Συγκέντρωση νιτρικών στην έξοδο συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα

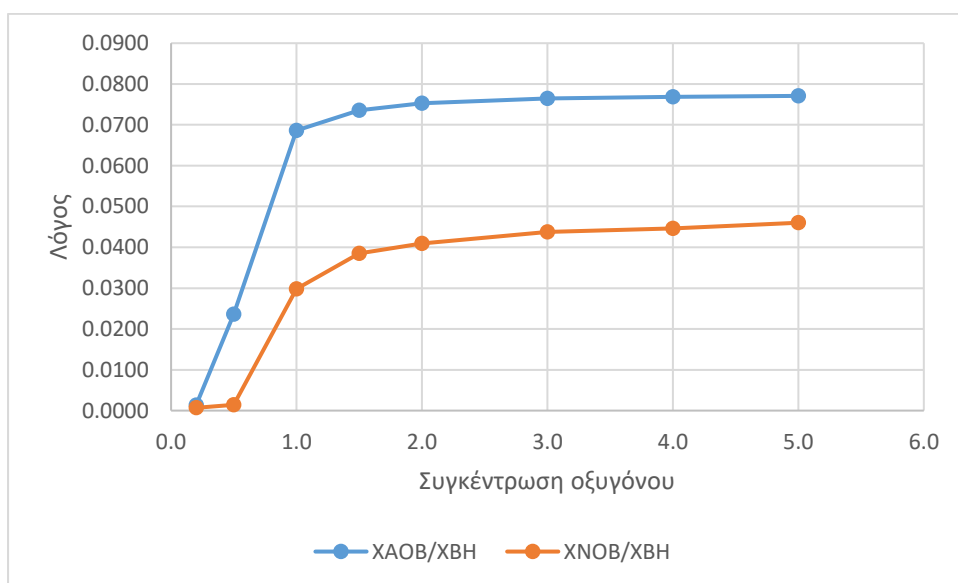
Για καλύτερη εποπτεία της παραγωγής εκπομπών του αέριου υποξειδίου του αζώτου επιλέχθηκαν μόνο τα σενάρια με κοινή συγκέντρωση οξυγόνου στα αεριζόμενα διαμερίσματα. Για το πρώτο υπο-σενάριο η συγκέντρωση οξυγόνου είναι τόσο μικρή που δεν υπάρχει

δυνατότητα ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας που συμβάλει στην παραγωγή υποξειδίου του αζώτου.

Στη συνέχεια, για συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου της τάξης των 0.5-1 mg/L παρατηρούμε αύξηση στις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου η οποία σχετίζεται με την αύξηση της αυτοτροφικής βιομάζας σε σχέση με την ετεροτροφική (Σχήμα 4.17). Για συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου 1.5-3 mg/l η μάζα των NOB αυξάνεται οι εκπομπές μειώνονται. Για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από 3 mg/l οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου σταθεροποιούνται (Πίνακας 4.92).

Πίνακας 4. 92: Ποσοστό εκπομπών  $SN_2O$  προς το ολικό άζωτο που εισέρχεται στην εγκατάσταση συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα

| Συγκέντρωση Οξυγόνου(mg/l) | Ποσοστό Εκπομπών $SN_2O/SN_{TOTAL}$ (%) |
|----------------------------|---|
| 0.2,0.2,0.2,0.2            | 0.002                                   |
| 0.5,0.5,0.5,0.5            | 1.019                                   |
| 1,1,1,1                    | 3.831                                   |
| 1.5,1.5,1.5,1.5            | 1.836                                   |
| 2,2,2,2                    | 1.344                                   |
| 3,3,3,3                    | 0.986                                   |
| 4,4,4,4                    | 0.988                                   |
| 5,5,5,5                    | 1.052                                   |



Σχήμα 4. 17 : Λόγοι  $X_{AOB}/X_{BH}$  και  $X_{NOB}/X_{BH}$  στην πρώτη αεριζόμενη δεξαμενή συναρτήσει των ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου (oxygen set points) στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική αναπτύχθηκε με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία ένα μοντέλο υπολογισμού των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου σε συστήματα ενεργού ιλύος. Το μοντέλο αποτελεί μία ευρύτατη τροποποίηση του βασικού μοντέλου ASM1 της IWA έτσι ώστε να περιγράφουν αναλυτικά οι διεργασίες που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή υποξειδίου του αζώτου κατά την βιολογική επεξεργασία των λυμάτων. Το μοντέλο αυτό ενσωματώθηκε σε ένα υπάρχον ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας.

Το ολοκληρωμένο μοντέλο μετά την επέκτασή του με το υπο-μοντέλο εκτίμησης των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου είναι σε θέση να υπολογίζει α) σε κάθε θέση μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων τις συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα και των κλασμάτων του, του αζώτου και των κλασμάτων του, β) την ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων, γ) τις απαιτήσεις οξυγόνου, δ) την κατανάλωση ενέργειας στην εγκατάσταση, ε) την παραγωγή ενέργειας (στην περίπτωση που η εγκατάσταση διαθέτει μονάδα αναερόβιας χώνευσης και μονάδα συμπαραγωγής ενέργειας) και στ) τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (άμεσες και έμμεσες).

Μετά την ανάπτυξη του υπο-μοντέλου εκπομπών υποξειδίου του αζώτου και την ενσωμάτωσή του στο ολοκληρωμένο μοντέλο ακολούθησε η ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να εξακριβωθεί ποιές στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι επηρεάζουν περισσότερο την παραγωγή υποξειδίου του αζώτου και συνεπώς ο καθορισμός των τιμών τους είναι κρισιμότερος. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ακολούθησε μία σειρά εφαρμογών του μοντέλου για να εκτιμηθεί η επίδραση βασικών λειτουργικών παραμέτρων μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων στην παραγωγή εκπομπών υποξειδίου του αζώτου.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Ο κύκλος του αζώτου όπως μελετήθηκε στην παρούσα εργασία παρουσιάζει τρία κύρια βιοχημικά μονοπάτια. Το πρώτο αφορά στην απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών που αποτελείται από τέσσερα στάδια. Αρχικά τα νιτρικά καταλύονται σε νιτρώδη μέσω της νιτρικής αναγωγής (NaR) . Έπειτα τα νιτρώδη

μετατρέπονται σε μονοξείδιο του αζώτου με την αναγωγή των νιτρωδών (NiR) . Στη συνέχεια το μονοξείδιο του αζώτου με το ένζυμο της νιτρικής οξειδοαναγωγής (NOR) μετατρέπεται σε υποξείδιο του αζώτου και τέλος με τη αναγωγή του υποξειδίου του αζώτου (N<sup>2</sup>OR) σε αέριο αζώτου. Άρα παρατηρούμε ότι η ετεροτροφική βιομάζα παράγει και καταναλώνει υποξείδιο του αζώτου. Συνεχίζουμε με την απονιτροποίηση και την νιτροποίηση των νιτροποιητών. Οι δύο διεργασίες γίνονται με τη βοήθεια των αυτοτροφικών οξειδωτικών βακτηρίων (νιτροποιητές). Αρχικά η αμμωνία οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη με το ένζυμο της μονοοξυγενάσης της αμμωνίας (AMO). Το ένζυμο της οξειδοαναγωγής της υδροξυλαμίνης στη συνέχεια μετατρέπει την υδροξυλαμίνη σε μονοξείδιο του αζώτου. Το μονοξείδιο του αζώτου είτε θα μετατραπεί σε νιτρώδη είτε σε υποξείδιο του αζώτου . Στην περίπτωση που μετατραπεί σε υποξείδιο του αζώτου τότε ακολουθεί το μονοπάτι της νιτροποίησης του αζώτου. Σε αντίθετη περίπτωση θα παραχθούν νιτρώδη. Τα νιτρώδη με τη σειρά τους θα μετατραπούν σε νιτρικά με τη συμβολή των NOB, τα νιτρικά θα χρησιμοποιηθούν στην απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Αν δεν μετατραπούν σε νιτρικά θα ακολουθήσουν το μονοπάτι της απονιτροποίησης των νιτροποιητών. Το μονοπάτι της απονιτροποίησης των νιτροποιητών αποτελείται από το ένζυμο της νιτρικής αναγωγής (Nirk) που μετατρέπει τα νιτρώδη σε οξείδιο του αζώτου και στην συνέχεια ανάγονται σε υποξείδιο του αζώτου. Συμπερασματικά καταλήγουμε ότι οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί είναι υπεύθυνοι για την απονιτροποίηση, παράγουν και καταναλώνουν υποξείδιο του αζώτου. Οι AOB ευθύνονται για τα άλλα 2 μονοπάτια, απονιτροποίηση και νιτροποίηση των νιτροποιητών, δηλαδή την παραγωγή υποξειδίου του αζώτου. Τέλος οι NOB συμβάλουν στην απονιτροποίηση των ετεροτροφικών.

- Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας διαπιστώθηκε ότι οι παράμετροι στοιχειομετρικοί και κινητικοί που επηρεάζουν σημαντικά τις εκπομπές N<sub>2</sub>O είναι οι εξής:

α) Ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της βιομάζας των AOB  $\mu_{AOB}$  . Σε μικρές συγκεντρώσεις του συντελεστή υπάρχει υψηλή συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο με συνέπεια την μη παραγωγή AOB. Αυτό έχει ως συνέπεια, οι αντιδράσεις των μονοπατιών της απονιτροποίησης και νιτροποίησης των νιτροποιητών η παραγωγή του υποξειδίου του αζώτου να είναι μικρή και οφείλεται στην απονιτροποίηση των ετεροτροφικών. Με την αύξηση του συντελεστή αυξάνεται η συγκέντρωση των AOB

άρα και η παραγωγή του υποξειδίου του αζώτου μέσω της απονιτροποίησης και νιτροποίησης των νιτροποιητών.

β) Ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των NOB. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των NOB υπάρχει μείωση των εκπομπών του αερίου του υποξειδίου του αζώτου. Έτσι επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι οι NOB ευνοούν το μονοπάτι της απονιτροποίησης των ετεροτροφικών.

γ) Ο συντελεστής ημι-κορεσμού της αμμωνίας. Με την αύξηση του συντελεστή παρατηρείται αύξηση της ετεροτροφικής βιομάζας. Άρα ευνοείται στο σύστημα το μονοπάτι της απονιτροποίησης των ετεροτροφικών και η μείωση των εκπομπών αερίου υποξειδίου του αζώτου.

δ) Επίδραση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής  $N_2O$  μέσω της διεργασίας της νιτροποίησης των νιτροποιητών  $q_{AOBN_2O_{NN}}$ . Αναμενόταν ότι με τη αύξηση του ρυθμού της διεργασίας θα υπήρχε μεγαλύτερη παραγωγή υποξειδίου του αζώτου. Αντίθετα δεν παρατηρείται καμία μεταβολή. Φαίνεται ότι το μονοπάτι της νιτροποίησης των νιτροποιητών δεν αποτελεί κύρια οδό παραγωγής υποξειδίου του αζώτου.

ε) Επίδραση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής  $N_2O$  μέσω της διεργασίας της απονιτροποίησης των νιτροποιητών  $q_{AOBN_2O_{ND}}$ . Η αύξηση του ρυθμού της διεργασίας συντελεί και στην αύξηση του αερίου αζώτου μέσω του μονοπατιού της απονιτροποίησης των νιτροποιητών.

στ) Επίδραση του μέγιστου ρυθμού της αντίδρασης με το ένζυμο της οξειδοαναγωγής της υδροξυλαμίνης  $q_{AOBHAO}$ . Για μικρό ρυθμό αντίδρασης φαίνεται ότι αναστέλλονται οι αντιδράσεις του μονοπατιού της απονιτροποίησης του αζώτου αφού το μονοξείδιο του αζώτου δεν μπορεί να μετατραπεί σε νιτρώδη. Παρατηρούνται όμως μεγάλες εκπομπές υποξειδίου του αζώτου που οφείλονται εξ' ολοκλήρου στην νιτροποίηση των νιτροποιητών. Με την αύξηση του ρυθμού μειώνονται οι αντιδράσεις μέσω του μονοπατιού της νιτροποίησης των νιτροποιητών και αυξάνονται μέσω της απονιτροποίησης των νιτροποιητών.

ζ) Επίδραση του μέγιστου ρυθμού της αντίδραση με το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση (AMO)  $q_{AOBAMO}$ . Σε μικρές συγκεντρώσεις του συντελεστή υπάρχει υψηλή συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο με συνέπεια την μη παραγωγή AOB. Αυτό έχει ως συνέπεια, οι αντιδράσεις των μονοπατιών της απονιτροποίησης και νιτροποίησης των νιτροποιητών η παραγωγή του υποξειδίου του αζώτου να είναι μικρή και οφείλεται στην απονιτροποίησης των ετεροτροφικών. Με την αύξηση του



συντελεστή αυξάνεται η συγκέντρωση των AOB άρα και η παραγωγή του υποξειδίου του αζώτου μέσω της απονιτροποίησης και νιτροποίησης των νιτροποιητών.

- Ο χρόνος παραμονής στερεών είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος λειτουργίας ενός συστήματος ενεργού ιλύος, η τιμή του οποίου επηρεάζει αποφασιστικά τόσο την απόδοση της εγκατάστασης, την ενεργειακή κατανάλωση και την παραγωγή ιλύος, όσο και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ειδικότερα και υποξειδίου του αζώτου. Για την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων που προσομοιώθηκε διαπιστώθηκε ότι για χρόνους παραμονής στερεών μικρότερους από 4 d, η αδυναμία έστω και μερικούς οξειδωσης του αμμωνιακού αζώτου σε υδροξυλαμίνη αρχικά, έχει ως συνέπεια οι εκπομπές αερίου υποξειδίου του αζώτου να είναι πρακτικά αμελητέες. Η έστω και μερική νιτροποίηση που λαμβάνει μέρος για χρόνους παραμονής στερεών της τάξης των 4 d έχει ως συνέπεια την αύξηση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου, οι οποίες λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους για τιμές του χρόνου παραμονής στερεών της τάξης των 5 d. Η σημαντική αυτή αύξηση των εκπομπών οφείλεται στην αξιόλογη ανάπτυξη των μικροοργανισμών AOB και την περιορισμένη ανάπτυξη των μικροοργανισμών NOB. Με την περαιτέρω αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών εξασφαλίζονται συγκεντρώσεις NOB που επαρκούν για την πλήρη νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου και την μείωση των εκπομπών.
- Η απόδοση της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας έχει επίσης σημαντική επίδραση στις εκπομπές του υποξειδίου του αζώτου. Με την αύξηση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης παρατηρείται καταρχήν μία μικρή αύξηση στην παραγωγή εκπομπών υποξειδίου του αζώτου η οποία σχετίζεται με τη μείωση της συγκέντρωσης της ετεροτροφικής βιομάζας και συνεπώς την αύξηση των AOB και την ελαχιστοποίηση της μετατροπής του υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο. Η περαιτέρω σημαντική αύξηση των εκπομπών του υποξειδίου του αζώτου σχετίζεται τόσο με την αύξηση του λόγου των NOB έναντι της ετεροτροφικής βιομάζας, όσο και με την απότομη μείωση της συγκέντρωσης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών για υψηλές αποδόσεις. Συμπερασματικά διαπιστώνεται ότι η αύξηση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της ποιότητας εκροής ως προς τα αιωρούμενα στερεά και τον οργανικό άνθρακα, η οποία ασφαλώς σχετίζεται με την μείωση των προς επεξεργασία ρύπων στα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα, αλλά και μία μικρή αύξηση στη συγκέντρωση του ολικού αζώτου (στην περίπτωση αποδόσεων μεγαλύτερων από 80% σε όρους αιωρούμενων στερεών), η οποία

οφείλεται στην μείωση του λόγου C/N στην είσοδο της βιολογικής βαθμίδας και συνεπώς την επιδείνωση της απονιτροποίησης. Κατά συνέπεια, αξίζει να σημειωθεί ότι σε σχήματα επεξεργασίας λυμάτων που περιλαμβάνουν ενισχυμένη πρωτοβάθμια επεξεργασία στην οποία μπορεί να επιτευχθεί απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών της τάξης του 80-90%, το συμβατικό σύστημα βιολογικής επεξεργασίας μέσω νιτροποίησης – απονιτροποίησης ίσως να μην επαρκεί και να πρέπει να αναζητηθούν άλλες διεργασίες πιο κατάλληλες για την επεξεργασία λυμάτων με χαμηλό όγκο C/N (π.χ. νιτροδοποίηση – απονιτροδοποίηση, νιτροδοποίηση – αναμμοξ).

- Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των ανεπεξέργαστων λυμάτων έχουν σημαντική επίδραση στην παραγωγή εκπομπών υποξειδίου του αζώτου. Ειδικότερα η αύξηση του εύκολα βιοδιασπάσιμου κλάσματος του οργανικού άνθρακα έχει ως συνέπεια την αύξηση της ετεροτροφικής βιομάζας, την εξασφάλιση αποτελεσματικότερης απονιτροποίησης και παράλληλα την μείωση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου λόγω της πληρέστερης απονιτροποίησης η οποία υποβοηθά και την αναγωγή του υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο.
- Τέλος, η επίδραση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στην παραγωγή εκπομπών υποξειδίου του αζώτου είναι σημαντική. Ειδικότερα για τιμές του διαλυμένου οξυγόνου μικρότερες από 1 mg/L η αδυναμία έστω και μερικής οξείδωσης του αμμωνιακού αζώτου καταρχήν σε υδροξυλαμίνη και στη συνέχεια σε νιτρώδη και νιτρικά, έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία παραγωγής αξιόλογων εκπομπών υποξειδίου του αζώτου. Η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στις αεριζόμενες δεξαμενές σε τιμές μεταξύ 1-1,5 mg/L συντελεί αφενός στην επίτευξη πλήρους νιτροποίησης σε μία εγκατάσταση και συνεπώς στην εξασφάλιση μίας ικανοποιητικής ποιότητας εκροής, ωστόσο οδηγεί στην παραγωγή αρκετά υψηλών εκπομπών αερίου υποξειδίου του αζώτου. Βασική αιτία είναι η ασύμμετρη ανάπτυξη των μικροοργανισμών AOB και NOB, με τους τελευταίους να παρουσιάζουν πολύ μικρότερη ανάπτυξη από τους πρώτους. Αντίθετα με την περαιτέρω αύξηση των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου σε τιμές μεγαλύτερες από 2 mg/L εξασφαλίζονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στους μικροοργανισμούς NOB με συνέπεια την μείωση των εκπομπών αερίου υποξειδίου του αζώτου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εφαρμογών που εξετάστηκαν φαίνεται ότι το υπομοντέλο μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση των εκπομπών

υποξειδίου του αζώτου κατά τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων και για την αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών μείωσης των εκπομπών.

## ***Βιβλιογραφία***

### **Ελληνική**

Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.. Περιγραφή Μοντέλου IAWQ, Σημειώσεις για το μάθημα: Προχωρημένες Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.

Βασίλειος Σαραντόπουλος (2015) Ανάπτυξη και εφαρμογή ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, Διπλωματική Εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.

Λογγινού,2010, Μέθοδοι Επεξεργασίας Λυματολάσπης ,Πτυχιακή Εργασία,Τμήμα Τεχνολογίας Περιβάλλοντος και Οικολογίας ,Τ.Ε.Ι Ιόνιων Νήσων.

Μπουκουβάλας,2015,Σχέδιο και επεξεργασία δημοτικών λυμάτων για 200000 κατοίκους, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Τεχνολογίας Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου, Τ.Ε.Ι Καβάλας.

### ***Αγγλική***

Alex J., Benedetti L., Copp J., Gernaey K.V., Jeppsson U., Nopens I., Pons M.N., Rosen C., Steyer J.P., Vanrolleghem P. (2008). Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1).

Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and van Loosdrecht, M.C.M. (2000) Activated sludge models ASM1, 490 ASM2, ASM2d, and ASM3, IWA Scientific and Technical Report No. 9. IWA Publishing, London, UK.

Baeza, Guisasola, Gabriel, Lafuente , Katsou, Massara, Rodriguez-Caballero, Pijuan, Noutsopoulos, Antoniou, Andreadakis, Mamais, Koumaki, Gioldasi, Prado, Colón, Rosso, Krieg, Malamis, ,2017b, On line monitoring, control and mitigation of greenhouse gases emissions in WWTPs, Conference: 12th IWA Specialized Conference on Instrumentation, Control and Automation.

Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H. and Vavilin V.A. (2002). Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1). IWA Scientific and Technical Report No 13, IWA Publishing, London, UK.

Gernaey, K., Rosen, C. and Jeppsson, U. (2005). BSM2: A model for dynamic influent data generation. Technical report. Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. Lund University, Lund, Sweden.

Gujer, W., Henze, M., Mino, T., van Loosdrecht, M.C.M. (1999). Activated Sludge Model No. 3. *Wat. Sci. Tech.*, 39(1), 183-193.

Gupta D., Singh S.K., (2012), Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants: A case study of Noida, *Journal of Water Sustainability*, 131-139.

Jeppsson U. (1996). Modelling aspects of wastewater treatment processes. Ph.D. thesis: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology, Sweden. pp. 428.

Jeppsson U. and Pons M.-N. (2004) Editorial: The COST benchmark simulation model – current state and future perspective. *Control Engineering Practice*, 12, 299 – 304.

IWA (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA.

Koumaki E., Noutsopoulos C., Sarantopoulos V., Antoniou K., Malamis S., Mamais D., Andreadakis A., Gioldasi M., Rosso D., Baeza J.A., Guisasola A., Gabriel D., Colón J., Lafuente J., Katsou E., Massara T., Prado O. and Krieg G (2017)

C-FOOT CTRL-tool: Development of an integrated tool for the assessment of the greenhouse gas emissions in wastewater treatment plants, CEST 2017

Massara, S. Malamis, A. Guisasola, J.A. Baeza, C. Noutsopoulos, E. Katsou,(2017a), A review on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water , *Science of the Total Environment*, 596–597 , pp. 106–123.

Nopens I., Benedetti L., Jeppsson U., Pons M.-N., Alex J., Copp J.B., Gernaey K.V., Rosen C, Steyer J.-P. and Vanrolleghem P.A. (2010). Benchmark Simulation Model No 2 – Finalisation of plant layout and default control strategy. *Wat. Sci. Tech.*, 62(9), 1967-1974.

Pan, Y., Ni, B.-J., Yuan, Z., (2013). Modeling Electron Competition among Nitrogen Oxides Reduction and N<sub>2</sub>O Accumulation in Denitrification. *Environ. Sci. Technol.* 47, 11083–11091.

Pan, Y., Ni, B.-J., Lu, H., Chandran, K., Richardson, D. & Yuan, Z. (2015). Evaluating two concepts for the modelling of intermediates accumulation during biological denitrification in wastewater treatment. *Water Res.*, 71, 21–31.

Rosen, C. & Jeppsson, U. 2006, Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework. Technical report, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University.