



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ BSM2 ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ  
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία της  
Λυδίας Αποστολάκη**

**Επιβλέπων:**

**Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος  
Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2022**



## **Ευχαριστίες**

*Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής σηματοδοτεί το τέλος ενός πολυετούς κεφαλαίου της ζωής μου, αλλά και την αρχή του επόμενου. Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην κατάκτηση αυτού του σημείου – ορόσημου, ξεκινώντας φυσικά με τον κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, στον οποίο οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ για την ανάθεση της εργασίας αυτής και τη συνεχή καθοδήγηση μέχρι την ολοκλήρωσή της.*

*Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον υποψήφιο διδάκτορα Χρήστο Ιωαννίδη για την αμέριστη βοήθεια, υποστήριξη αλλά και υπομονή που υπέδειξε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.*

*Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους φίλους μου για τις υπέροχες αναμνήσεις που μου χάρισαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μας, αλλά και για την ηθική υποστήριξη καθόλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας.*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα αδέρφια μου, Μηνά, Ερμιόνη και Στέλλα, και φυσικά τους γονείς μου, Γιάννη και Μαρία, στους οποίους αφιερώνω την παρούσα εργασία.*

*Αθήνα, Οκτώβριος 2022*



## Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της επίδρασης των μεταβολών ορισμένων λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Για την προσομοίωση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων χρησιμοποιήθηκε το Benchmark Simulation Model no. 2 (BSM2), όπως υλοποιήθηκε σε Matlab/ Simulink από το Πανεπιστήμιο Lund της Σουηδίας. Η λειτουργία του βιολογικού αντιδραστήρα προσομοιώνεται με το Activated Sludge Model no. 1 (ASM1), και η λειτουργία της μονάδας αναερόβιας χώνευσης με το Anaerobic Digestion Model no. 1 (ADM1). Για τη λειτουργία της δεξαμενής τελικής καθίζησης χρησιμοποιείται ένα μονοδιάστατο μοντέλο οριζόντιων στρώσεων, ενώ για τη λειτουργία των υπόλοιπων μονάδων χρησιμοποιούνται ισοζύγια μάζας βάσει του βαθμού απόδοσής τους.

Προσομοιώθηκε πλήθος σεναρίων στα οποία μεταβάλλονταν λειτουργικές παράμετροι της εγκατάστασης. Ανάλογα με τις μεταβολές που εξετάστηκαν, τα σενάρια μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής:

- A) Μεταβολές στο διαλυμένο οξυγόνο των αεριζόμενων διαμερισμάτων του βιολογικού αντιδραστήρα
- B) Μεταβολές της αποτελεσματικότητας της μονάδας πρωτοβάθμιας καθίζησης
- Γ) Μεταβολές της αποτελεσματικότητας των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης
- Δ) Μεταβολές στο χρόνο παραμονής στερεών της μονάδας αναερόβιας χώνευσης
- E) Μεταβολές στη θερμοκρασία της μονάδας αναερόβιας υδρόλυσης, σε μια εναλλακτική διάταξη της εγκατάστασης που περιλαμβάνει έργα αναερόβιας υδρόλυσης και πάχυνσης πριν η πρωτοβάθμια ιλύς οδηγηθεί στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων περιλαμβάνουν ένα δείκτη ποιότητας στην εκροή, δείκτες με τα επιμέρους λειτουργικά κόστη των εγκαταστάσεων καθώς και τον αριθμό των ημερών που οι συγκεντρώσεις στην εκροή παραβίασαν τα όρια ολικού αζώτου, COD, αμμωνιακού αζώτου, ολικών αιωρούμενων στερεών και BOD5.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι τα εξής:

- Μείωση του ολικού αζώτου στην εκροή μπορεί να επιτευχθεί με μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στα αεριζόμενα διαμερίσματα του βιολογικού αντιδραστήρα μέχρι ενός σημείου, με μείωση της απόδοσης της μονάδας πρωτοβάθμιας καθίζησης, με μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής της αναερόβιας χώνευσης.
- Μείωση του αμμωνιακού αζώτου στην εκροή μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο βιολογικό αντιδραστήρα.
- Αύξηση της αποτελεσματικότητας της μονάδας πρωτοβάθμιας καθίζησης μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργία ολόκληρης της εγκατάστασης, καθώς περισσότερο φορτίο παρακάμπτει τη βιολογική βαθμίδα.
- Μείωση της απόδοσης των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης έχει μικρή επίδραση στην απόκριση της εγκατάστασης.

*Λέξεις κλειδιά*

Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης, ASM1, ADM1, BSM2, αναερόβια υδρόλυση

## **Abstract**

The purpose of this thesis is to study the effect of several functionality parameters on the performance of wastewater treatment plants. The treatment plants are simulated with the Benchmark Simulation Model no. 2 (BSM2), as it was implemented in Matlab/Simulink from Lund University, Sweden. For the simulation of the bioreactor the Activated Sludge Model no. 1 (ASM1) is selected, and the Anaerobic Digestion Model no. 1 (ADM1) is selected for the anaerobic digestion unit. For the secondary clarifier a ten layer one-dimensional model is used, and as for the remaining units of the treatment plant, mass equilibrium equations are used based on their efficiency.

Various scenarios were simulated, during which the plant's functionality parameters were modified. Depending on the changes made each time, the aforementioned scenarios can be categorized as follows:

- A) Changes regarding the dissolved oxygen in the aerated compartments of the bioreactor
- B) Changes regarding the efficiency of the primary clarifier
- C) Changes regarding the efficiency of the thickener and dewatering unit
- D) Changes regarding the solids retention time of the anaerobic digester
- E) Changes regarding the temperature of hydrolysis, in an alternative layout of the plant where an anaerobic hydrolysis unit and a thickener have been added for the primary sludge, before it makes its way to the anaerobic digester.

The results of the simulations include an effluent quality index, indices with the plant's operational costs, as well as the number of days the effluent quality limits were crossed. The limits include total nitrogen, COD, ammonia nitrate, total suspended solids and BOD5.

The following are the main conclusions drawn:

- The effluent total nitrogen can be lowered by decreasing the dissolved oxygen concentration in the aerated compartments of the bioreactor (to a certain point), by lowering the efficiency of the primary clarifier and by decreasing the hydraulic retention time of the anaerobic digestion unit.
- The effluent ammonia nitrate can be lowered by increasing the dissolved oxygen concentration in the bioreactor.
- Increased efficiency of the primary clarifier can have quite an impact on the whole treatment plant, as greater load bypasses the activated sludge system.
- Decreased efficiency of the thickener and dewatering units has an insignificant impact on the treatment plant's response.

*Keywords*

Wastewater treatment plants, mathematical simulation models, ASM1, ADM1, BSM2, anaerobic hydrolysis



# Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή .....	1
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	2
2.1	Ιστορική αναδρομή.....	2
2.2	Activated Sludge Model No. 1 (ASM1) .....	3
2.2.1	Μεταβλητές μοντέλου .....	3
2.2.2	Διεργασίες μοντέλου .....	5
2.2.3	Περιορισμοί μοντέλου .....	8
2.3	Activated Sludge Model No. 2 (ASM2) .....	9
2.3.1	Μεταβλητές μοντέλου .....	9
2.3.2	Διεργασίες μοντέλου .....	11
2.3.3	Περιορισμοί μοντέλου .....	17
2.4	Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1) .....	19
2.4.1	Διάταξη Μοντέλου .....	19
2.4.2	Αξιολόγηση Απόδοσης Εγκατάστασης .....	20
2.5	Benchmark Simulation Model No. 2(BSM2) .....	22
2.5.1	Διάταξη Μοντέλου .....	22
2.5.2	Αξιολόγηση Απόδοσης Εγκατάστασης .....	22
3	Μοντέλο Ολοκληρωμένης Προσομοίωσης No.2 (BSM2).....	24
3.1	Εισαγωγή.....	24
3.2	Πρωτοβάθμια Καθίζηση .....	25
3.3	Βιολογικός Αντιδραστήρας.....	27
3.4	Δευτεροβάθμια Καθίζηση .....	29
3.5	Μονάδα Πάχυνσης .....	33

3.6	Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης.....	35
3.7	Μονάδα Αφυδάτωσης.....	50
4	Αποτελέσματα.....	52
4.1	Εισαγωγή.....	52
4.2	Σενάρια προσομοίωσης.....	54
4.3	Σειρά σεναρίων Α: Έλεγχος διαλυμένου οξυγόνου στο βιολογικό αντιδραστήρα.....	56
4.3.1	Περιγραφή προσομοιώσεων.....	56
4.3.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	57
4.4	Σειρά σεναρίων Β: Έλεγχος αποτελεσματικότητας της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	64
4.4.1	Περιγραφή προσομοιώσεων.....	64
4.4.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	64
4.5	Σειρά σεναρίων Γ: Έλεγχος αποτελεσματικότητας των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης.....	69
4.5.1	Περιγραφή προσομοιώσεων.....	69
4.5.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	69
4.6	Σειρά σεναρίων Δ: Έλεγχος αποτελεσματικότητας της αναερόβιας χώνευσης 74	
4.6.1	Περιγραφή προσομοιώσεων.....	74
4.6.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	74
4.7	Σειρά σεναρίων Ε: Προσθήκη μονάδας αναερόβιας υδρόλυσης για επεξεργασία της πρωτοβάθμιας λύσος και στη συνέχεια μονάδας πάχυνσης πριν την αναερόβια χώνευση.....	80
4.7.1	Περιγραφή προσομοιώσεων.....	80

4.7.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	81
5	Συμπεράσματα .....	87
	Βιβλιογραφία .....	89

## Κατάλογος Πινάκων

---

Πίνακας 2.2.1: Συστατικά του ASM1 .....	3
Πίνακας 2.2.2: Διεργασίες και στοιχειομετρία μοντέλου ASM1 (International Water Association, 2000) .....	6
Πίνακας 2.3.1: Συστατικά του ASM2 .....	9
Πίνακας 2.3.2: Ρυθμοί διεργασιών μοντέλου ASM2 (International Water Association, 2000) .....	12
Πίνακας 2.3.3: Στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης (IWA, 2000).....	14
Πίνακας 2.3.4: Στοιχειομετρία των διεργασιών της ετεροτροφικής βιομάζας (IWA, 2000) .....	15
Πίνακας 2.3.5: Στοιχειομετρία των διεργασιών πολυφωσφορικής βιομάζας (IWA, 2000) .....	16
Πίνακας 2.3.6: Στοιχειομετρία των διεργασιών αυτοτροφικής βιομάζας (IWA,2000)....	16
Πίνακας 2.3.7: Στοιχειομετρία των διεργασιών χημικής κατακρήμνισης φωσφόρου (IWA, 2000) .....	17
Πίνακας 2.4.1: Τιμές παραμέτρων συνάρτησης ταχύτητας (Alex et al., 2008).....	20
Πίνακας 2.4.2: Όρια στην έξοδο της εγκατάστασης (Alex et al., 2008) .....	20
Πίνακας 4.1.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά ανεπεξέργαστων λυμάτων (Alex et al., 2008)	53
Πίνακας 4.3.1: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροή της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων Α.....	59
Πίνακας 4.4.1: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροή της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων Β.....	65
Πίνακας 4.5.1: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροής της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων Γ .....	70
Πίνακας 4.6.1: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροή της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων Δ.....	75
Πίνακας 4.7.1: Συγκεντρώσεις στραγγιδίων μονάδας πάχυνσης .....	81
Πίνακας 4.7.2: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροή της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων Ε.....	82

## Κατάλογος Σχημάτων

---

Σχήμα 2.2.1: Συστατικά της οργανικής ύλης στο ASM1 (Jeppsson, 1997).....	4
Σχήμα 2.4.1: Διάταξη εγκατάστασης στο BSM1 (Alex et al., 2008).....	19
Σχήμα 2.5.1: Διάταξη εγκατάστασης στο BSM2 (Jeppsson, Ulf, et al., 2007) .....	22
Σχήμα 3.1.1: Παροχές μονάδων BSM2 (Alex et al., 2008).....	24
Σχήμα 3.2.1: Συγκεντρώσεις και Παροχές Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (Alex et al., 2008) .....	25
Σχήμα 3.5.1: Συγκεντρώσεις και Παροχές μονάδας Πάχυνσης (Alex et al., 2008) .....	34
Σχήμα 3.7.1: Συγκεντρώσεις και Παροχές μονάδας Αφυδάτωσης (Alex et al., 2008).....	50
Σχήμα 4.1.1: Διάταξη Μονάδων BSM2 .....	52
Σχήμα 4.3.1: Σενάριο αναφοράς και σενάρια A1, A2, A3 και A4 .....	57
Σχήμα 4.3.2: Σενάριο αναφοράς και σενάρια A5 και A6.....	57
Σχήμα 4.3.3: Δείκτες Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων A.....	60
Σχήμα 4.3.4: Μέση Συγκέντρωση Ολικού Αζώτου Εκροής.....	60
Σχήμα 4.3.5: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων A .....	61
Σχήμα 4.3.6: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων A.....	61
Σχήμα 4.3.7: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων A .....	62
Σχήμα 4.4.1: Δείκτες Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων B.....	66
Σχήμα 4.4.2: Μέση Συγκέντρωση Νιτρικού Αζώτου Εκροής.....	66
Σχήμα 4.4.3: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων B .....	67
Σχήμα 4.4.4: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων B .....	67
Σχήμα 4.4.5: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων B .....	68
Σχήμα 4.5.1: Δείκτες Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων Γ .....	69
Σχήμα 4.5.2: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων Γ.....	71
Σχήμα 4.5.3: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων Γ .....	71
Σχήμα 4.5.4: Μέση Ημερήσια Παραγωγή Ιλύος.....	72
Σχήμα 4.5.5: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων Γ.....	73
Σχήμα 4.6.1: Δείκτες Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων Δ.....	76
Σχήμα 4.6.2: Μέση Συγκέντρωση Νιτρικού Αζώτου Εκροής.....	76

Σχήμα 4.6.3: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων Δ .....	77
Σχήμα 4.6.4: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων Δ .....	77
Σχήμα 4.6.5: Μέση Ημερήσια Παραγωγή Ιλύος.....	78
Σχήμα 4.6.6: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων Δ .....	79
Σχήμα 4.7.1: Διάταξη Μονάδων Σειράς Σεναρίων Ε .....	80
Σχήμα 4.7.2: Δείκτης Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων Ε .....	83
Σχήμα 4.7.3: Μέσες Συγκεντρώσεις Εκροής.....	83
Σχήμα 4.7.4: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων Ε .....	84
Σχήμα 4.7.5: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων Ε .....	84
Σχήμα 4.7.6: Μέση Ημερήσια Παραγωγή Ιλύος.....	85
Σχήμα 4.7.7: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων Ε.....	86

# 1 Εισαγωγή

---

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων είναι σύνθετα συστήματα που δέχονται ανεπεξέργαστα λύματα των οποίων η παροχή και το φορτίο παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Παρά την ανομοιογένεια των εισερχόμενων λυμάτων, οι εγκαταστάσεις αυτές καλούνται να λειτουργούν σε μόνιμη βάση και να συμμορφώνονται με ολόένα και πιο αυστηρές διατάξεις και κανονισμούς. Είναι έκδηλη, λοιπόν, η ανάγκη για παρακολούθηση αλλά και βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συστημάτων αυτών. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς μαθηματικά μοντέλα για την προσομοίωση των επιμέρους μονάδων αλλά και ολοκληρωμένα συστήματα προσομοίωσης ολόκληρων των εγκαταστάσεων.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη της επίδρασης ορισμένων λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Η λειτουργία των εγκαταστάσεων προσομοιώνεται με την χρήση ενός ολοκληρωμένου συστήματος προσομοίωσης, του Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2), όπως έχει υλοποιηθεί σε Matlab/Simulink από το Πανεπιστήμιο Lund της Σουηδίας. Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των κύριων μοντέλων ενεργού ιλύος και των ολοκληρωμένων μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση λειτουργίας τόσο σε επίπεδο μονάδων, όσο και σε επίπεδο ολόκληρης της εγκατάστασης.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα ολοκληρωμένης προσομοίωσης το οποίο επιλέχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε η λειτουργία κάθε μονάδας, καθώς και οι εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των συστατικών σε κάθε θέση του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται παρουσίαση των σεναρίων λειτουργίας που εξετάστηκαν με το μαθηματικό μοντέλο που επιλέχθηκε, καθώς και των αποτελεσμάτων των σεναρίων αυτών.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα σενάρια που εξετάστηκαν.

## 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

---

### 2.1 Ιστορική αναδρομή

Συστήματα ενεργού ιλύος ξεκίνησαν να εφαρμόζονται για την επεξεργασία των λυμάτων στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Παρόλα αυτά η ανάπτυξη μοντέλων που προσομοιώνουν τέτοια συστήματα, αρχικά σε σταθερές και έπειτα σε δυναμικές συνθήκες, ήρθε δεκαετίες αργότερα.

Το πρώτο μοντέλο που έγινε αποδεκτό όχι μόνο για ερευνητικούς σκοπούς, αλλά και για πρακτική εφαρμογή, παρουσιάστηκε το 1987 από ερευνητική ομάδα της IAWQ (*International Association on Water Quality*). Πρόκειται για το Activated Sludge Model No.1 (*ASM1*), και η αποδοχή που γνώρισε αδιαμφισβήτητα ευνοήθηκε από την ευρεία διαθεσιμότητα πιο ισχυρών υπολογιστών (Van Loosdrecht, M.C.M., et al. 2015).

Μέσα στην επόμενη δεκαετία, η ευρεία εφαρμογή της βιοχημικής απομάκρυνσης φωσφόρου στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων συνέβαλε στην καλύτερη κατανόησή της. Έτσι το 1995 δημοσιεύτηκε από τους Henze et al. το Activated Sludge Model No.2 (*ASM2*), μία εξέλιξη του *ASM1* που περιγράφει και τη βιοχημική απομάκρυνση φωσφόρου.

Παρά τις όποιες αδυναμίες, το *ASM1* παραμένει ακόμη και σήμερα πρότυπο για τα μοντέλα προσομοίωσης των συστημάτων ενεργού ιλύος. Η προσομοίωση του βιοαντιδραστήρα σαν αυτόνομη μονάδα όμως δεν επαρκούσε για να εδραιωθεί η χρήση τέτοιων μοντέλων. Ήταν εμφανής η ανάγκη για μοντέλα που αντιμετωπίζουν μια εγκατάσταση ως ένα σύνολο μονάδων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτά είναι τα Μοντέλα Ολοκληρωμένης Προσομοίωσης – Benchmark Simulation Models (*BSM*).

Το 2008 οι Alex et al. παρουσίασαν το Benchmark Simulation Model No. 1 (*BSM1*). Το πρώτο μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης απαρτίζεται από ένα βιοαντιδραστήρα και μια δεξαμενή τελικής καθίζησης. Για την προσομοίωση της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα χρησιμοποιείται το *ASM1*.

Επέκταση του *BSM1* αποτελεί το Benchmark Simulation Model No.2 (*BSM2*), το οποίο εισάγει μια δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, και έργα για την επεξεργασία των ρευμάτων της παραγόμενης λάσπης (μονάδες πάχυνσης, αναερόβιας χώνευσης και αφυδάτωσης). Για τη μοντελοποίηση της μονάδας αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιείται το μοντέλο Anaerobic Digestion Model (*ADM*) της IWA.

Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων ενεργού ιλύος *ASM1* και *ASM2*, και των μοντέλων ολοκληρωμένης προσομοίωσης *BSM1* και *BSM2*.



## 2.2 Activated Sludge Model No. 1 (ASM1)

Η προσομοίωση του συστήματος ενεργού ιλύος επιτυγχάνεται μέσω οκτώ διεργασιών, εκ των οποίων

- οι τρεις σχετίζονται με την ανάπτυξη της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας,
- οι δύο σχετίζονται με την αποσύνθεση αυτής και
- οι τρεις σχετίζονται με την υδρόλυση.

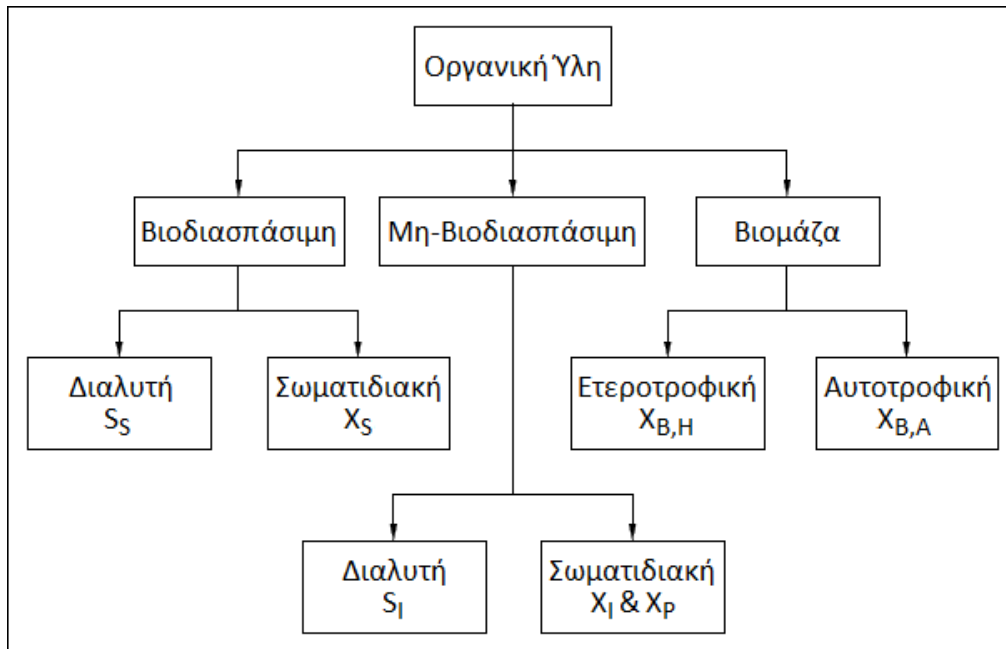
### 2.2.1 Μεταβλητές μοντέλου

Για την περιγραφή των διεργασιών αυτών όμως είναι απαραίτητο να προηγηθεί η παρουσίαση των συστατικών του μοντέλου. Διατηρώντας την ονοματολογία της IAWQ, τα σωματιδιακά στοιχεία συμβολίζονται με  $X$  και τα διαλυτά με  $S$ . Σε συνδυασμό με τρεις δείκτες ( $B$  για τη βιομάζα – biomass,  $S$  για την τροφή – substrate και  $O$  για το οξυγόνο – oxygen) καθορίζονται τα χαρακτηριστικά συστατικά που ακολουθούν στον Πίνακα 2.2.1:

Πίνακας 2.2.1: Συστατικά του ASM1

Συμβολισμός	Περιγραφή
$S_S$	Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
$X_S$	Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
$S_I$	Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη (μη-βιοδιασπάσιμη)
$X_I$	Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη (μη-βιοδιασπάσιμη)
$X_P$	Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης
$X_{B,H}$	Ετεροτροφική βιομάζα
$X_{B,A}$	Αυτοτροφική βιομάζα
$S_{NO}$	Διαλυμένο νιτρικό άζωτο
$X_{ND}$	Σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο
$S_{ND}$	Διαλυμένο οργανικό άζωτο
$S_{NH}$	Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο
$S_O$	Διαλυμένο οξυγόνο
$S_{ALK}$	Συνολική αλκαλικότητα

Η οργανική ύλη εκφράζεται σε μονάδες COD και μπορεί να χωριστεί σε βιοδιασπάσιμη και σε μη-βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη, και σε βιομάζα. Η διάκριση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.1:



Σχήμα 2.2.1: Συστατικά της οργανικής ύλης στο ASM1 (Jeppsson, 1997)

Η βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη διακρίνεται σε:

- Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη ( $S_S$ ): Παράγεται κατά την υδρόλυση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης ( $X_S$ ) και καταναλώνεται κατά την ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας υπό την παρουσία ή μη οξυγόνου ( $S_O$ ).
- Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη ( $X_S$ ): Παράγεται κατά την αποσύνθεση της βιομάζας (ετεροτροφικής και αυτοτροφικής) και απομακρύνεται με την υδρόλυση, κατά την οποία μετατρέπεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή ( $S_S$ ).

Η μη-βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη διακρίνεται σε:

- Αδρανή διαλυμένη οργανική ύλη ( $S_I$ ): Διέρχεται από το σύστημα με τη συγκέντρωση που είχε στην είσοδο και συνεισφέρει στο COD της εκροής.
- Σωματιδιακή αδρανή οργανική ύλη ( $X_I$ ): Εγκλωβίζεται στην ενεργό ιλύ και απομακρύνεται από το σύστημα μέσω της απομακρυνθείσας ιλύος.
- Σωματιδιακά μη-βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας ( $X_P$ ): Είναι αδρανή σε περαιτέρω βιολογικές διεργασίες.

Η βιομάζα, το σύνολο των μικροοργανισμών, διακρίνεται σε ετεροτροφική ( $X_{B,H}$ ) και αυτοτροφική ( $X_{B,A}$ ).

Η αζωτούχα ύλη χωρίζεται σε νιτρικό άζωτο και – όμοια με την οργανική ύλη – σε βιοδιασπάσιμη και μη-βιοδιασπάσιμη.

Το διαλυμένο νιτρικό άζωτο ( $S_{NO}$ ) παράγεται με τη νιτροποίηση (μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό άζωτο) κατά την αερόβια ανάπτυξη της αυτοτροφικής βιομάζας και απομακρύνεται λόγω της απονιτροποίησης κατά την ανοξική ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας.

Η βιοδιασπάσιμη αζωτούχα ύλη διακρίνεται σε:

- Σωματιδιακό οργανικό άζωτο ( $X_{ND}$ ): Απελευθερώνεται κατά την αποσύνθεση της βιομάζας και υδρολύεται σε διαλυμένο οργανικό άζωτο.
- Διαλυμένο οργανικό άζωτο ( $S_{ND}$ ): Παράγεται από την υδρόλυση του παγιδευμένου οργανικού αζώτου και μετατρέπεται σε αμμωνιακό άζωτο ( $S_{NH}$ ) (αμμωνιοποίηση) μέσω της ετεροτροφικής βιομάζας.
- Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο ( $S_{NH}$ ): Αποτελεί πηγή αζώτου για τη κυτταρική σύνθεση βιομάζας και συγκεκριμένα για την αυτοτροφική βιομάζα αποτελεί και πηγή ενέργειας για την ανάπτυξή της. Παράγεται κατά την αμμωνιοποίηση του  $S_{ND}$ .

Για τη μη-βιοδιασπάσιμη αζωτούχα ύλη, το διαλυτό τμήμα είναι αμελητέο και το σωματιδιακό σχετίζεται με το αντίστοιχο μη-βιοδιασπάσιμο σωματιδιακό COD.

Το μοντέλο περιλαμβάνει επίσης το διαλυμένο οξυγόνο ( $S_O$ ) και την αλκαλικότητα ( $S_{ALK}$ ), τα οποία αναγράφονται και στον Πίνακα 2.2.1.

- Διαλυμένο οξυγόνο ( $S_O$ ): Καταναλώνεται κατά την αερόβια ανάπτυξη της ετεροτροφικής και της αυτοτροφικής βιομάζας.
- Αλκαλικότητα ( $S_{ALK}$ ): Η ενσωμάτωση της αλκαλικότητας στο μοντέλο επιτρέπει την ανίχνευση πιθανής υπερβολικής μείωσης του pH. Η διεργασία που συντελεί περισσότερο στη μείωση του pH είναι η νιτροποίηση. Χαμηλό pH δεν είναι επιθυμητό, καθώς μειώνεται ο ρυθμός νιτροποίησης και προκύπτουν προβλήματα όπως διαβρωτική εκροή και διόγκωση της ιλύος. Μια τέτοια μείωση μπορεί να αντισταθμιστεί με την προσθήκη οξειδίου του ασβεστίου.

### 2.2.2 Διεργασίες μοντέλου

Οι οκτώ (8) διεργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω αναλύονται στη συνέχεια, πρώτα όμως παρουσιάζονται εποπτικά στον Πίνακα 2.2.2, η μορφή του οποίου είναι γνωστή ως πίνακας Petersen ή πίνακας Gujer (Petersen (1965), Takács *et al.* (2007)).

Πίνακας 2.2.2: Διεργασίες και στοιχειομετρία μοντέλου ASM1 (International Water Association, 2000)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Ρυθμός διεργασιών $\rho_i(\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1})$
	$S_i$	$S_s$	$X_i$	$X_s$	$X_{\text{BH}}$	$X_{\text{BA}}$	$X_{\text{P}}$	$S_o$	$S_{\text{NO}}$	$S_{\text{NH}}$	$S_{\text{ND}}$	$X_{\text{ND}}$	$S_{\text{ALK}}$	
1. Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1 - Y_H}{Y_H}$		$-i_{\text{XB}}$			$\frac{i_{\text{XB}}}{14}$	$\mu_H \left( \frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left( \frac{S_o}{K_{\text{OH}} + S_o} \right) X_{\text{BH}}$
2. Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1 - Y_H}{2.86 Y_H}$		$-i_{\text{XB}}$			$\frac{1 - Y_H}{14 \cdot 2.86 Y_H}$ $-\left( \frac{i_{\text{XB}}}{14} \right)$	$\mu_H \left( \frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left( \frac{K_{\text{OH}}}{K_{\text{OH}} + S_o} \right) \left( \frac{S_{\text{NO}}}{K_{\text{NO}} + S_{\text{NO}}} \right) X_{\text{BH}}^n$
3. Αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικών						1		$-\frac{457 - Y_A}{Y_A}$	$1/Y_A$	$-i_{\text{XB}} - (1/Y_A)$				$\mu_H \left( \frac{S_{\text{NH}}}{K_{\text{NH}} + S_{\text{NH}}} \right) \left( \frac{S_o}{K_{\text{OA}} + S_o} \right) X_{\text{BA}}$
4. Αποσύνθεση ετεροτροφικών				$1 - f_p$	$-1$		$f_p$					$i_{\text{XB}} - f_p i_{\text{sp}}$		$b_H X_{\text{BH}}$
5. Αποσύνθεση αυτοτροφικών				$1 - f_p$		$-1$	$f_p$					$i_{\text{XB}} - f_p i_{\text{sp}}$		$b_A X_{\text{BA}}$
6. Αμμωνιοποίηση διαλυμένου οργανικού αζώτου										1	$-1$		$1/14$	$K_s S_{\text{ND}} X_{\text{BH}}$
7. Υδρόλυση παγιδευμένων οργανικών		1		$-1$										$K_h \frac{X_s/X_{\text{BH}}}{K_X + (X_s/X_{\text{BH}})} \left( \frac{S_o}{K_{\text{OH}} + S_o} \right) +$ $n_h \left( \frac{K_{\text{OH}}}{K_{\text{OH}} + S_o} \right) \left( \frac{S_{\text{NO}}}{K_{\text{NO}} + S_{\text{NO}}} \right) X_{\text{BH}}$
8. Υδρόλυση παγιδευμένου οργανικού αζώτου											1	$-1$		$\rho_7 (X_{\text{ND}}/X_s)$
Παρατηρούμενος ρυθμός αντίδρασης	$r_i = \sum V_{ij} \rho_j$													

1) Αερόβια ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας.

Με την κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής ( $S_S \downarrow$ ) αναπτύσσεται η ετεροτροφική βιομάζα ( $X_{B,H} \uparrow$ ) παρουσία οξυγόνου ( $S_O \downarrow$ ). Για την κυτταρική σύνθεση απαιτείται και αμμωνιακό άζωτο ( $S_{NH} \downarrow$ ).

2) Ανοξική ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας.

Αντίστοιχα με την 1), όμως αντί για οξυγόνο (η παρουσία του οποίου δρα ανασταλτικά), η διεργασία λαμβάνει χώρα παρουσία νιτρικού αζώτου ( $S_{NO} \downarrow$ ).

3) Αερόβια ανάπτυξη της αυτοτροφικής βιομάζας.

Με την κατανάλωση αμμωνιακού αζώτου ( $S_{NH} \downarrow$ ) από τους νιτροποιητές, αναπτύσσεται η αυτοτροφική βιομάζα ( $X_{B,A} \uparrow$ ) παρουσία οξυγόνου ( $S_O \downarrow$ ). Το αμμωνιακό άζωτο (όμοια με πριν) απαιτείται και για την κυτταρική σύνθεση.

4) Αποσύνθεση της ετεροτροφικής βιομάζας.

Η φθορά των ετερότροφων βακτηρίων ( $X_{B,H} \downarrow$ ) οδηγεί στην παραγωγή αργά βιοδιασπάσιμης τροφής ( $X_S \uparrow$ ) και σωματιδιακών μη-βιοδιασπάσιμων προϊόντων αποσύνθεσης ( $X_P \uparrow$ ).

5) Αποσύνθεση της αυτοτροφικής βιομάζας.

Όμοια με την 4), η φθορά των αυτότροφων βακτηριδίων ( $X_{B,A} \downarrow$ ) οδηγεί στην παραγωγή αργά βιοδιασπάσιμης τροφής ( $X_S \uparrow$ ) και σωματιδιακών μη-βιοδιασπάσιμων προϊόντων αποσύνθεσης ( $X_P \uparrow$ ).

6) Αμμωνιοποίηση του διαλυμένου οργανικού αζώτου.

Παράλληλα με αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την αποσύνθεση της βιομάζας, το διαλυμένο οργανικό άζωτο ( $S_{ND} \downarrow$ ) μετατρέπεται σε διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο ( $S_{NH} \uparrow$ ).

7) Υδρόλυση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης.

Μετατροπή της αργά βιοδιασπάσιμης τροφής ( $X_S \downarrow$ ) σε εύκολα βιοδιάσπασιμη τροφή ( $S_S \uparrow$ ).

8) Υδρόλυση του παγιδευμένου οργανικού αζώτου.

Μετατροπή του σωματιδιακού οργανικού αζώτου ( $X_{ND} \downarrow$ ) σε διαλυμένο οργανικό άζωτο ( $S_{ND} \uparrow$ ).

### 2.2.3 Περιορισμοί μοντέλου

Για να είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός μοντέλου ενεργού ιλύος παρά το πλήθος των αντιδράσεων και των συστατικών που περιλαμβάνει, πρέπει να γίνουν κάποιες απλοποιήσεις και παραδοχές:

- Το pH θεωρείται σταθερό και σχεδόν ουδέτερο. Η ύπαρξη της μεταβλητής  $S_{ALK}$  στο μοντέλο στοχεύει κυρίως στην ανίχνευση πιθανών αδυναμιών στον έλεγχο του pH. Είναι γνωστό ότι το pH επηρεάζει πολλές από τις παραμέτρους του μοντέλου, δεν υπάρχουν όμως εξισώσεις για τον πλήρη υπολογισμό της επίδρασης αυτής.
- Αντίθετα η επίδραση της θερμοκρασίας στις παραμέτρους του μοντέλου είναι κάτι που θα μπορούσε να υπολογιστεί. Όμως η θερμοκρασία θεωρείται σταθερή, και το μοντέλο δεν έχει σχεδιαστεί να λαμβάνει υπόψιν τυχόν διακυμάνσεις της. Επομένως και οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου θεωρούνται σταθερές.
- Το μοντέλο δε λαμβάνει υπόψη τυχόν μεταβολές των επιμέρους συστατικών της οργανικής ύλης. Ως αποτέλεσμα το μοντέλο δεν μπορεί να διαχειριστεί μεταβολές στη σύσταση των λυμάτων κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης.
- Οι διορθωτικοί συντελεστές της απονιτροποίησης  $\eta_g$  και  $\eta_h$  θεωρούνται σταθεροί.
- Οι παράμετροι της νιτροποίησης θεωρούνται κι αυτές σταθερές.
- Η ετεροτροφική βιομάζα είναι ομοιογενής και δε μεταβάλλεται με το χρόνο.
- Η παγίδευση του σωματιδιακού οργανικού υλικού από τη βιομάζα θεωρείται ότι πραγματοποιείται στιγμιαία.
- Το είδος του αποδέκτη ηλεκτρονίων δεν επηρεάζει την αποσύνθεση της βιομάζας.

### 2.3 Activated Sludge Model No. 2 (ASM2)

Η προσομοίωση του συστήματος ενεργού ιλύος επιτυγχάνεται μέσω δεκαεννέα διεργασιών, εκ των οποίων

- οι τρεις σχετίζονται με την υδρόλυση,
- οι έξι σχετίζονται με την ετεροτροφική βιομάζα,
- οι έξι σχετίζονται με τα πολυφωσφορικά βακτηρίδια,
- οι δύο σχετίζονται με την αυτοτροφική βιομάζα και
- οι δύο σχετίζονται με τη χημική κατακρήμνιση φωσφόρου.

#### 2.3.1 Μεταβλητές μοντέλου

Για την περιγραφή και κατανόηση των διεργασιών αυτών όμως είναι απαραίτητο να προηγηθεί η παρουσίαση των συστατικών του μοντέλου (Πίνακας 2.3.1), καθώς διαφέρουν ελαφρώς από εκείνα του ASM1. Υπενθυμίζεται ότι τα σωματιδιακά στοιχεία συμβολίζονται με  $X$  και τα διαλυτά με  $S$ .

Πίνακας 2.3.1: Συστατικά του ASM2

Συμβολισμός	Περιγραφή
$S_A$	Προϊόντα αναερόβιας ζύμωσης
$S_F$	Ζυμώσιμη εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
$S_I$	Αδρανής οργανική ύλη (μη-βιοδιασπάσιμη)
$S_{N2}$	Αέριο άζωτο
$S_{NH4}$	Αμμωνιακό άζωτο
$S_{NO3}$	Νιτρικό άζωτο
$S_{O2}$	Οξυγόνο
$S_{PO4}$	Ανόργανος φώσφορος
$S_{ALK}$	Συνολική αλκαλικότητα
$X_H$	Ετεροτροφική βιομάζα
$X_{AUT}$	Αυτοτροφική βιομάζα
$X_{PAO}$	Πολυφωσφορικά βακτήρια
$X_{MeOH}$	Υδροξείδια μετάλλων
$X_{MeP}$	Φωσφορικά μέταλλα
$X_{PP}$	Πολυφωσφορικά
$X_I$	Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη (μη-βιοδιασπάσιμη)
$X_S$	Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
$X_{PHA}$	Εσωκυτταρικά προϊόντα αποθήκευσης στους πολυφωσφορικούς μικροοργανισμούς
$X_{TSS}$	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά

Η οργανική ύλη εκφράζεται σε μονάδες COD και μπορεί να χωριστεί σε βιοδιασπάσιμη και σε μη-βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη, και σε βιομάζα.

Η βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη διακρίνεται σε:

- Προϊόντα Αναερόβιας Ζύμωσης ( $S_A$ ): Πρόκειται για τα τελικά προϊόντα της ζύμωσης. Σε αυτό το μοντέλο οι βιολογικές διεργασίες περιλαμβάνουν τη ζύμωση, για αυτό τα προϊόντα της μοντελοποιούνται ξεχωριστά από τα υπόλοιπα διαλυτά οργανικά υλικά.
- Ζυμώσιμη, εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη ( $S_F$ ): Είναι άμεσα διαθέσιμη για κατανάλωση από την ετεροτροφική βιομάζα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως τροφή κατά τη ζύμωση. Η εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη  $S_S$  του ASM1 αντικαθίσταται με το άθροισμα των  $S_A$  και  $S_F$ .
- Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη ( $X_S$ ): Πρόκειται για μεγάλου μοριακού βάρους κολλοειδή και σωματιδιακή τροφή, η οποία πρώτα πρέπει να υποστεί εξωκυτταρική υδρόλυση προτού να γίνει διαθέσιμη για κατανάλωση από τη βιομάζα.

Η μη-βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη διακρίνεται σε:

- Αδρανή διαλυμένη οργανική ύλη ( $S_I$ ): Διέρχεται από το σύστημα με τη συγκέντρωση που εισήλθε και συνεισφέρει στο COD της εκροής.
- Σωματιδιακή αδρανή οργανική ύλη ( $X_I$ ): Εγκλωβίζεται στην ενεργό ιλύ και απομακρύνεται από το σύστημα μέσω της απομακρυνθείσας ιλύος.

Η βιομάζα, το σύνολο των μικροοργανισμών, διακρίνεται σε:

- Αυτοτροφική βιομάζα ( $X_{AUT}$ ): Οι νιτροποιητές (το γένος νιτροσομονάδα και το γένος νιτροβακτήριο) είναι υπεύθυνοι για τη νιτροποίηση – θεωρείται ότι οι νιτροποιητές οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο  $S_{NH_4}$  απευθείας σε νιτρικό άζωτο  $S_{NO_3}$  (χωρίς ενδιάμεσα στάδια).
- Ετεροτροφική βιομάζα ( $X_H$ ): Πρόκειται για μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες (απονιτροποίηση) και παραμένουν ενεργοί σε αναερόβιες συνθήκες. Είναι υπεύθυνοι για την υδρόλυση της αργά βιοδιασπάσιμης τροφής  $X_S$ .
- Πολυφωσφορική βιομάζα ( $X_{PAO}$ ): Θεωρείται αντιπροσωπευτική για όλους τους τύπους μικροοργανισμών με την ιδιότητα να συσσωρεύουν φώσφορο στο κύτταρό τους (PAO – Phosphate Accumulating Organisms). Η συγκέντρωση  $X_{PAO}$  δεν περιλαμβάνει τα εσωκυτταρικά προϊόντα  $X_{PP}$  και  $X_{PHA}$ .



Η αζωτούχα ύλη περιγράφεται από τα:

- Αέριο άζωτο ( $S_{N_2}$ ): Θεωρείται το μοναδικό προϊόν της απονιτροποίησης.
- Αμμωνιακό άζωτο ( $S_{NH_4}$ )
- Νιτρικό άζωτο ( $S_{NO_3}$ )

Το μοντέλο περιλαμβάνει επίσης τα ακόλουθα συστατικά:

- Αλκαλικότητα ( $S_{ALK}$ ): Η ενσωμάτωση της αλκαλικότητας στο μοντέλο επιτρέπει την ανίχνευση πιθανής υπερβολικής μείωσης του pH, γεγονός που δρα ανασταλτικά για κάποιες βιολογικές διεργασίες.
- Διαλυμένο οξυγόνο ( $S_{O_2}$ )
- Ανόργανος φώσφορος ( $S_{PO_4}$ )
- Υδροξείδια μετάλλων ( $X_{MeOH}$ ): Το συστατικό αυτό εκφράζει την πιθανή παρουσία υδροξειδίων μετάλλων που προκαλούν χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου.
- Φωσφορικά μέταλλα ( $X_{MeP}$ ): Είναι προϊόντα της χημικής κατακρήμνισης του φωσφόρου στα υδροξείδια μετάλλων.
- Εσωκυτταρικά προϊόντα αποθήκευσης στους πολυφωσφορικούς μικροοργανισμούς ( $X_{PHA}$ ): Δε συμπεριλαμβάνονται στη συγκέντρωση της βιομάζας  $X_{PAO}$ .
- Πολυφωσφορικά ( $X_{PP}$ ): Πρόκειται για εσωκυτταρικά ανόργανα προϊόντα αποθήκευσης των πολυφωσφορικών βακτηριδίων, τα οποία δε συμπεριλαμβάνονται στη συγκέντρωση της βιομάζας  $X_{PAO}$ .
- Ολικά αιωρούμενα στερεά ( $X_{TSS}$ ): Η παράμετρος αυτή εισάγεται στο μοντέλο με σκοπό να υπολογιστεί η συγκέντρωση τους μέσω στοιχειομετρίας. Η πρόβλεψη της συγκέντρωσής τους είναι σημαντική καθώς η απομάκρυνση και η κατακρήμνιση φωσφόρου δημιουργεί ανόργανα στερεά.

### 2.3.2 Διεργασίες μοντέλου

Οι δεκαεννέα (19) διεργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω αναλύονται στη συνέχεια, πρώτα όμως παρουσιάζονται με τους ρυθμούς τους στον Πίνακα 2.3.2 στις επόμενες σελίδες:

Πίνακας 2.3.2: Ρυθμοί διεργασιών μοντέλου ASM2 (International Water Association, 2000)

Διεργασία	Ρυθμός διεργασίας $\rho_i$
<b>Υδρόλυση</b>	
1 Αερόβια 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 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 $S_A$ απονιτροποίηση	$\mu_H * n_{NO_3} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_A}{S_A + K_A} * \frac{S_A}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_H$
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 $X_{PHA}$	$b_{PHA} * X_{PHA} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$
<b>Νιτροποιητές</b>		
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	$b_{AUT} * X_{AUT}$
<b>Κατακρήμνιση και επαναδιάλυση φωσφόρου</b>		
18	Κατακρήμνιση	$k_{PRE} * S_{PO_4} * X_{MeOH}$
19	Επαναδιάλυση	$k_{RED} * X_{MeP} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$

### Διεργασίες υδρόλυσης

#### 1) Αερόβια υδρόλυση

Πραγματοποιείται σε αερόβιες συνθήκες ( $S_{O_2} > 0$ ).

#### 2) Ανοξική υδρόλυση

Πραγματοποιείται σε ανοξικές συνθήκες ( $S_{O_2} \cong 0, S_{NO_3} > 0$ ). Πρόκειται για πιο αργή διεργασία από την αερόβια υδρόλυση.

#### 3) Αναερόβια υδρόλυση

Πραγματοποιείται σε αναερόβιες συνθήκες ( $S_{O_2} \cong 0, S_{NO_3} \cong 0$ ).

Πίνακας 2.3.3: Στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης (IWA, 2000)

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

### Διεργασίες ετεροτροφικής βιομάζας

#### 4 & 5) Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών

Πρόκειται για δύο διεργασίες που πραγματοποιούνται παράλληλα, με κατανάλωση  $S_F \downarrow$  και  $S_A \downarrow$  αντίστοιχα. Κατά τις διεργασίες αυτές απαιτείται η παρουσία αποδέκτη ηλεκτρονίων ( $S_{O_2} \downarrow$ ), θρεπτικών συστατικών ( $S_{NH_4} \downarrow$  και  $S_{PO_4} \downarrow$ ), και παράγονται ολικά αιωρούμενα στερεά ( $X_{TSS} \uparrow$ ).

#### 6 & 7) Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών

Όμοια με τις διεργασίες 4 και 5, όμως εδώ η παρουσία οξυγόνου δρα ανασταλτικά και ο αποδέκτης ηλεκτρονίων είναι  $S_{NO_3} \downarrow$ , που απονιτροποιείται σε αέριο άζωτο  $S_{N_2} \uparrow$  και παράγεται αλκαλικότητα.

#### 8) Ζύμωση

Υπό αναερόβιες συνθήκες οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν  $S_F \downarrow$  σε  $S_A \uparrow$ . Αυτή η διεργασία μπορεί να συμβάλλει στην ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας, εδώ όμως θεωρείται απλά μια διεργασία μετατροπής.

9) Αποσύνθεση ετεροτροφικών μικροοργανισμών

Αυτή η διεργασία εκπροσωπεί όλες τις διεργασίες φθοράς της ετεροτροφικής βιομάζας, και έχει μοντελοποιηθεί αντίστοιχα με το ASM1.

Πίνακας 2.3.4: Στοιχειομετρία των διεργασιών της ετεροτροφικής βιομάζας (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 $S_F$	$1 - \frac{1}{Y_H}$	$-\frac{1}{Y_H}$		$-\frac{1 - Y_H}{2.86 Y_H}$	$\frac{1 - Y_H}{2.86 Y_H}$			1
7	Ανοξική ανάπτυξη στο $S_A$			$-\frac{1}{Y_H}$	$-\frac{1 - Y_H}{2.86 Y_H}$	$\frac{1 - Y_H}{2.86 Y_H}$			1
8	Ζύμωση		-1	1					
9	Αποσύνθεση						$f_{x1}$	$1 - f_{x1}$	-1

Διεργασίες πολυφωσφορικής βιομάζας

10) Αποθήκευση  $X_{PHA}$

Τα πολυφωσφορικά βακτήρια απελευθερώνουν φώσφορο ( $S_{PO_4} \uparrow$ ) από τα αποθηκευμένα πολυφωσφορικά ( $X_{PP} \downarrow$ ), και αξιοποιούν την ενέργεια από αυτή τη διαδικασία για να αποθηκεύσουν εξωκυτταρικά προϊόντα ζύμωσης ( $S_A \downarrow$ ) με τη μορφή εσωκυτταρικού οργανικού υλικού ( $X_{PHA} \uparrow$ ).

11) Αποθήκευση πολυφωσφορικών

Η αποθήκευση διαλυτού φωσφόρου ( $S_{PO_4} \downarrow$ ) με τη μορφή εσωκυτταρικών πολυφωσφορικών ( $X_{PP} \uparrow$ ) απαιτεί ενέργεια, η οποία προκύπτει από τα  $X_{PHA} \downarrow$ .

12) Αερόβια ανάπτυξη πολυφωσφορικής βιομάζας

Οι μικροοργανισμοί αυτοί θεωρείται ότι αναπτύσσονται μόνο σε βάρος των εσωκυτταρικών προϊόντων  $X_{PHA} \downarrow$ . Από τη λύση των πολυφωσφορικών απελευθερώνεται φώσφορος, ο οποίος αποτελεί θρεπτικό συστατικό και καταναλώνεται ( $S_{PO_4} \downarrow$ ) για την παραγωγή βιομάζας ( $X_{PAO} \uparrow$ ). Για το ASM2 η διεργασία αυτή πραγματοποιείται υποχρεωτικά σε αερόβιες συνθήκες ( $S_{O_2} \downarrow$ ).

13, 14 & 15) Αποσύνθεση της πολυφωσφορικής βιομάζας και των προϊόντων που αποθηκεύουν

Περιλαμβάνει τη λύση, την ενδογενή αναπνοή και τη φθορά όλων των πολυφωσφορικών μικροοργανισμών. Εφόσον το μοντέλο μετράει ξεχωριστά από τη βιομάζα ( $X_{PAO}$ ) τα προϊόντα αποθήκευσης ( $X_{PP}$ ,  $X_{PHA}$ ), απαιτούνται τρεις διαφορετικές διεργασίες αποσύνθεσης.

Πίνακας 2.3.5: Στοιχειομετρία των διεργασιών πολυφωσφορικής βιομάζας (IWA, 2000)

	Διεργασίες	$S_{O2}$	$S_A$	$S_{PO4}$	$X_I$	$X_S$	$X_{PAO}$	$X_{PP}$	$X_{PHA}$
10	Αποθήκευση $X_{PHA}$		-1	$Y_{PO4}$				$-Y_{PO4}$	1
11	Αποθήκευση $X_{PP}$	$-Y_{PHA}$		-1				1	$-Y_{PHA}$
12	Αερόβια ανάπτυξη $X_{PAO}$	$1 - \frac{1}{Y_H}$		$-i_{PBM}$			1		$-\frac{1}{Y_H}$
13	Αποσύνθεση $X_{PAO}$			$v_{13,PO4}$	$f_{x1}$	$1 - f_{x1}$	-1		
14	Αποσύνθεση $X_{PP}$			1				-1	
15	Αποσύνθεση $X_{PHA}$		1						-1

#### Διεργασίες αυτοτροφικής βιομάζας

16) Αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικών μικροοργανισμών

Αυτή η διεργασία έχει μοντελοποιηθεί όπως στο ASM1, με μόνη διαφορά την πρόσληψη φωσφόρου από τη βιομάζα.

17) Αποσύνθεση αυτοτροφικών μικροοργανισμών

Αυτή η διεργασία έχει μοντελοποιηθεί όπως στο ASM1.

Πίνακας 2.3.6: Στοιχειομετρία των διεργασιών αυτοτροφικής βιομάζας (IWA,2000)

	Διεργασίες	$S_{O2}$	$S_{NH4}$	$S_{NO3}$	$S_{PO4}$	$X_I$	$X_S$	$X_{AUT}$
16	Αερόβια ανάπτυξη $X_{AUT}$	$-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$-\frac{i_{NBM}}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{PBM}$			1
17	Αποσύνθεση		$v_{17,NH4}$		$v_{17,PO4}$	$f_{x1}$	$1 - f_{x1}$	-1

### Διεργασίες χημικής κατακρήμνισης φωσφόρου

18 & 19) Κατακρήμνιση και Επαναδιάλυση φωσφόρου

Πρόκειται για δύο αντίστροφες μεταξύ τους διεργασίες, που σε σταθερές συνθήκες βρίσκονται σε ισορροπία, σύμφωνα με τη σχέση  $X_{MeOH} + S_{PO4} \leftrightarrow X_{MeP}$ .

Πίνακας 2.3.7: Στοιχειομετρία των διεργασιών χημικής κατακρήμνισης φωσφόρου (IWA, 2000)

	Διεργασίες	$S_{PO4}$	$S_{ALK}$	$X_{MeOH}$	$X_{MeP}$	$X_{TSS}$
18	Κατακρήμνιση	-1	$v_{19,ALK}$	-3.45	4.87	1.42
19	Επαναδιάλυση	1	$v_{20,ALK}$	3.45	-4.87	-1.42

### 2.3.3 Περιορισμοί μοντέλου

Οι παραδοχές και οι περιορισμοί του ASM1 αφορούν και το ASM2. Κάποιες παραδοχές του ASM1 διευρύνονται για να καλύπτουν και τη βιοχημική απομάκρυνση φωσφόρου:

- Η ετεροτροφική βιομάζα και η πολυφωσφορική βιομάζα είναι ομοιογενείς και δεν μεταβάλλονται με το χρόνο.
- Η υδρόλυση της οργανικής ύλης, του οργανικού αζώτου και του οργανικού φωσφόρου πραγματοποιούνται ταυτόχρονα.

Οι ακόλουθες παραδοχές αφορούν τη συμπεριφορά της βιομάζας, κυρίως της πολυφωσφορικής βιομάζας:

- Το μοναδικό κομμάτι οργανικής ύλης που μπορεί να προσλάβει η πολυφωσφορική βιομάζα είναι τα προϊόντα ζύμωσης  $S_A$ . Αντίθετα τα υπόλοιπα κλάσματα της ετεροτροφικής βιομάζας μπορούν να αξιοποιήσουν και  $S_A$  και  $S_F$ .
- Η πολυφωσφορική βιομάζα θεωρείται ότι αναπτύσσεται αερόβια μόνο με την αξιοποίηση των αποθηκευμένων  $X_{PHA}$ , και όχι με την άμεση αξιοποίηση των  $S_A$ .
- Θεωρείται ότι η πολυφωσφορική βιομάζα δεν έχει ικανότητες απονιτροποίησης.
- Θεωρείται ότι τα  $PHAs$  αντιπροσωπεύουν όλη την οργανική ύλη που είναι αποθηκευμένη στα κύτταρα της πολυφωσφορικής βιομάζας.
- Το μοντέλο δεν περιλαμβάνει ξεχωριστό κλάσμα βιομάζας ικανής να αποθηκεύσει  $PHAs$  χωρίς να απελευθερώσει φώσφορο πρώτα.

- Η ετεροτροφική βιομάζα του ASM2 θεωρείται ότι αναπτύσσεται αερόβια, απονιτροποιεί ανοξικά και ζυμώνει αναερόβια. Δεν πρόκειται για τυπική συμπεριφορά ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

Πέρα από τις παραδοχές, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί για το ASM2, για να εξασφαλίζεται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι αξιόπιστα για πρακτική εφαρμογή:

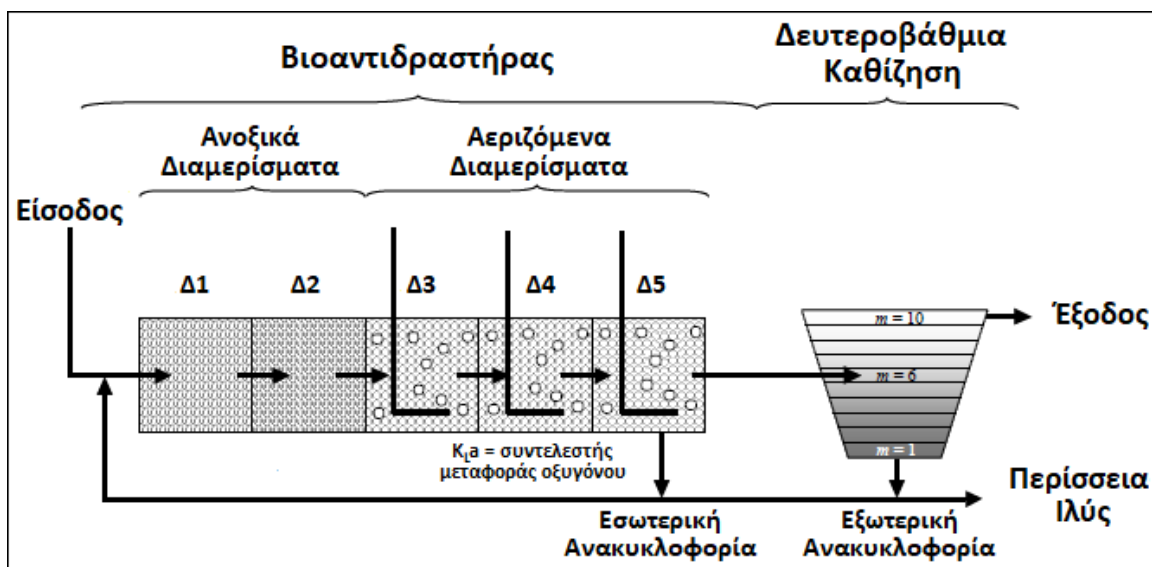
- Έχει σχεδιαστεί για αστικά λύματα και δεν μπορεί να εφαρμόζεται σε βιομηχανικά λύματα που μπορεί να περιέχουν ασυνήθιστα συστατικά που να είναι τοξικά ή μερικώς – βιοδιασπάσιμα.
- Προσομοιώνει τις διεργασίες στους βιοαντιδραστήρες χωρίς να λαμβάνει υπόψη το διαχωρισμό στερεών στις δεξαμενές καθίζησης.
- Το pH πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ουδέτερο, κατά προτίμηση μεταξύ 6.3 και 7.8.
- Η θερμοκρασία εφαρμογής πρέπει να είναι μεταξύ 10 και 25 °C. Πέραν αυτού του εύρους θερμοκρασιών η συμπεριφορά της πολυφωσφορικής βιομάζας διαφέρει και το ASM2 δε δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.



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

### 2.4.1 Διάταξη Μοντέλου

Η διάταξη του BSM1 είναι απλή καθώς περιλαμβάνει ένα βιολογικό αντιδραστήρα και μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Σχήμα 2.4.1).



Σχήμα 2.4.1: Διάταξη εγκατάστασης στο BSM1 (Alex et al., 2008)

#### Βιολογικός Αντιδραστήρας

Η λειτουργία του βιολογικού αντιδραστήρα προσομοιώνεται με πέντε (5) διαδοχικά διαμερίσματα· στα δύο (2) πρώτα επικρατούν ανοξικές συνθήκες, και αερόβιες στα επόμενα τρία (3). Για την περιγραφή των βιολογικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο βιοαντιδραστήρα επιλέχθηκε το μοντέλο ενεργού ιλύος ASM1.

#### Δεξαμενή Δευτεροβάθμιας Καθίζησης

Η λειτουργία της δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης προσομοιώνεται με μια μονάδα σταθερού εμβαδού  $A$ , στην οποία δε λαμβάνουν χώρα βιολογικά φαινόμενα. Η μονάδα χωρίζεται σε δέκα ( $m=10$ ) οριζόντιες στρώσεις, ίδιου ύψους  $z$ . Η έκτη στρώση ( $m=6$ ) είναι η στρώση τροφοδοσίας, με την αρίθμηση να ξεκινάει από τη βάση.

Η ροή των στερεών λόγω βαρύτητας είναι

$$J_s = v_s(X_{sc})X_{sc} \quad (2.1)$$

όπου  $X_{sc}$  η συνολική συγκέντρωση ιλύος και  $v_s(X_{sc})$  η ταχύτητα καθίζησης. Σύμφωνα με τους Takács et al. (1991), η ταχύτητα καθίζησης ισούται με

$$v_s(X_{sc}) = \max[0, \min\{v'_0, v_0(e^{-r_h(X_{sc}-X_{min})} - e^{-r_p(X_{sc}-X_{min})})\}] \quad (2.2)$$

όπου  $X_{min} = f_{ns}X_f$ , με  $X_f$  τη συνολική συγκέντρωση στερεών στο βιοαντιδραστήρα. Οι τιμές των παραμέτρων για τη (2.1) δίνονται στον Πίνακα 2.4.1:

Πίνακας 2.4.1: Τιμές παραμέτρων συνάρτησης ταχύτητας (Alex et al., 2008)

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες Μέτρησης
$v'_0$	250	$m/d$
$v_0$	474	$m/d$
$r_h$	0,000576	$m^3/g SS$
$r_p$	0,00286	$m^3/g SS$
$f_{ns}$	0,00228	—

## 2.4.2 Αξιολόγηση Απόδοσης Εγκατάστασης

Ένα μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης, πέρα από μοντέλα προσομοίωσης των επιμέρους μονάδων μιας εγκατάστασης, περιλαμβάνει και κριτήρια για την αξιολόγηση της απόδοσης της εγκατάστασης.

### Παραβιάσεις Ορίων Εκροής

Στην έξοδο της εγκατάστασης, η εκροή δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα όρια του Πίνακα 2.4.2. Τα όρια αφορούν το ολικό άζωτο, το ολικό COD, την αμμωνία, τα ολικά αιωρούμενα στερεά και το BOD. Τα ολικό άζωτο υπολογίζεται ως:

$$N_{tot,e} = S_{NO,e} + S_{NKj,e} \quad (2.3)$$

όπου  $S_{NKj,e}$  το άζωτο *Kjeldahl* (άθροισμα του οργανικού και αμμωνιακού αζώτου):

$$S_{NKj,e} = S_{NH,e} + S_{ND,e} + X_{ND,e} + i_{XB}(X_{B,H,e} + X_{B,A,e}) + i_{XP}(X_{P,e} + X_{I,e}) \quad (2.4)$$

Για την αξιολόγηση της απόδοσης της εγκατάστασης, παρέχεται το ποσοστό του χρόνου αξιολόγησης καθώς και το πλήθος των ημερών που δεν τηρήθηκαν τα όρια στην εκροή.

Πίνακας 2.4.2: Όρια στην έξοδο της εγκατάστασης (Alex et al., 2008)

Μεταβλητή	Όριο
$N_{tot}$	18 $g N/m^3$
$COD_{tot}$	100 $g COD/m^3$
$S_{NH}$	4 $g N/m^3$
$TSS$	30 $g SS/m^3$
$BOD_5$	10 $g BOD/m^3$

### EQI (Effluent Quality Index) – Δείκτης Ποιότητας Εκροής

Πέρα από τη συμμόρφωση με τα όρια εκροής, η έξοδος της εγκατάστασης μπορεί να χαρακτηριστεί και από το Δείκτη Ποιότητας Εκροής – EQI, ο οποίος υπολογίζεται για ένα διάστημα επτά (7) ημερών (όπως τις τελευταίες επτά (7) μέρες της προσομοίωσης) από τα φορτία εξόδου συστατικών που έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ποιότητα του αποδέκτη (με διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας για το κάθε συστατικό), και που συνήθως αναφέρονται στην εκάστοτε νομοθεσία:

$$EQI = \frac{1}{t_{obs} \cdot 1000} \int_{t=7 \text{ days}}^{t=14 \text{ days}} \left( 2 \cdot TSS_e(t) + COD_e(t) + 2BOD_e(t) + 30S_{NKj,e}(t) + 10S_{NO,e}(t) \right) Q_e(t) \cdot dt \quad (2.5)$$

όπου

$$TSS_e = 0.75(X_{S,e} + X_{I,e} + X_{B,H,e} + X_{B,A,e} + X_{P,e}) \quad (2.6)$$

$$COD_{tot,e} = S_{S,e} + S_{I,e} + X_{S,e} + X_{I,e} + X_{B,H,e} + X_{B,A,e} + X_{P,e} \quad (2.7)$$

$$BOD_{5,e} = 0.25 \left( S_{S,e} + X_{S,e} + (1 - f_p) \cdot (X_{B,H,e} + X_{B,A,e}) \right) \quad (2.8)$$

### OCI (Overall Cost Index) – Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους

Για το προηγούμενο χρονικό διάστημα υπολογίζεται επίσης ένας Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους – OCI, ο οποίος ορίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα των:

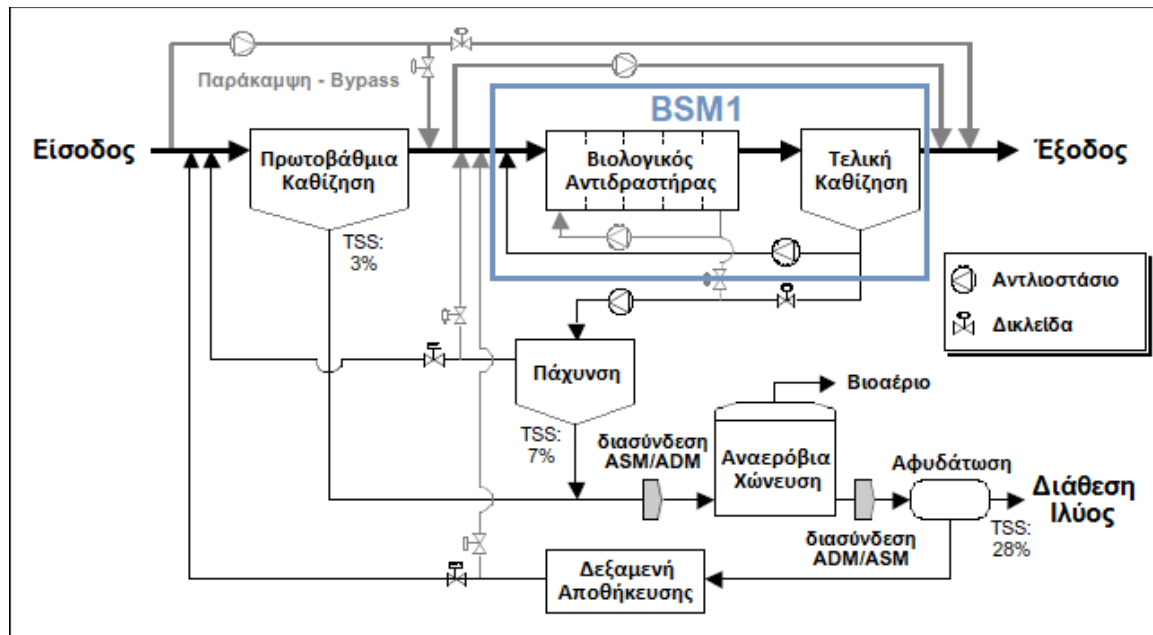
- *AE*: Ενέργεια Αερισμού
- *PE*: Ενέργεια Άντλησης
- *SP*: Παραγόμενη Ιλύς προς Διάθεση
- *EC*: Δόσεις Εξωτερικού Άνθρακα
- *ME*: Ενέργεια Ανάμιξης

$$OCI = AE + PE + 5 \cdot SP + 3 \cdot EC + ME \quad (2.9)$$

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

### 2.5.1 Διάταξη Μοντέλου

Το BSM2, πέρα από τις μονάδες του BSM1 (Σχήμα 2.5.1), περιλαμβάνει επίσης:



Σχήμα 2.5.1: Διάταξη εγκατάστασης στο BSM2 (Jeppsson, Ulf, et al., 2007)

- Πρωτοβάθμια Καθίζηση, όπου απομακρύνεται το 50% των στερεών
- Πάχυνση Βαρύτητας, όπου απομακρύνεται το 98% των στερεών
- Αναερόβια Χώνευση, η προσομοίωση της λειτουργίας της οποίας βασίζεται στο Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)
- Αφυδάτωση, όπου απομακρύνεται το 98% των στερεών
- Δεξαμενή Αποθήκευσης, η οποία παρέχει δυνατότητα διενέργειας ελεγχόμενων αντλήσεων

Με εξαίρεση την αναερόβια χώνευση, στις υπόλοιπες μονάδες δε λαμβάνουν χώρα βιολογικά φαινόμενα.

Ο τρόπος προσομοίωσης των μονάδων αυτών θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.

### 2.5.2 Αξιολόγηση Απόδοσης Εγκατάστασης

Όπως και στο BSM1, η ανάγκη για αξιολόγηση της απόδοσης της εγκατάστασης καλύπτεται με την καταγραφή των παραβιάσεων στην εκροή, και με τους δείκτες EQI και OCI.

### Παραβιάσεις Ορίων Εκροής

Ισχύουν τα ίδια όρια εκροής με το BSM1 (Πίνακας 2.4.2).

### EQI (Effluent Quality Index) – Δείκτης Ποιότητας Εκροής

Αντί για μια εβδομάδα (7 ημέρες) όπως στο BSM1, το διάστημα αξιολόγησης είναι ένα έτος (364 ημέρες), επομένως στη σχέση (2.5) αλλάζουν μόνο τα όρια ολοκλήρωσης:

$$EQI = \frac{1}{t_{obs} \cdot 1000} \int_{t=245 \text{ days}}^{t=609 \text{ days}} \left( \begin{array}{l} 2 \cdot TSS_e(t) + COD_e(t) + 2BOD_e(t) \\ + 30S_{NKj,e}(t) + 10S_{NO,e}(t) \end{array} \right) Q_e(t) \cdot dt \quad (2.10)$$

### OCI (Overall Cost Index) – Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους

Λόγω της προσθήκης μονάδας αναερόβιας χώνευσης, πρέπει στη σχέση (2.9) του BSM1 να προστεθούν δύο ακόμη όροι:

- $MET_{prod}$ : Παραγωγή Μεθανίου
- $HE_{net}$ : Ενέργεια Θέρμανσης

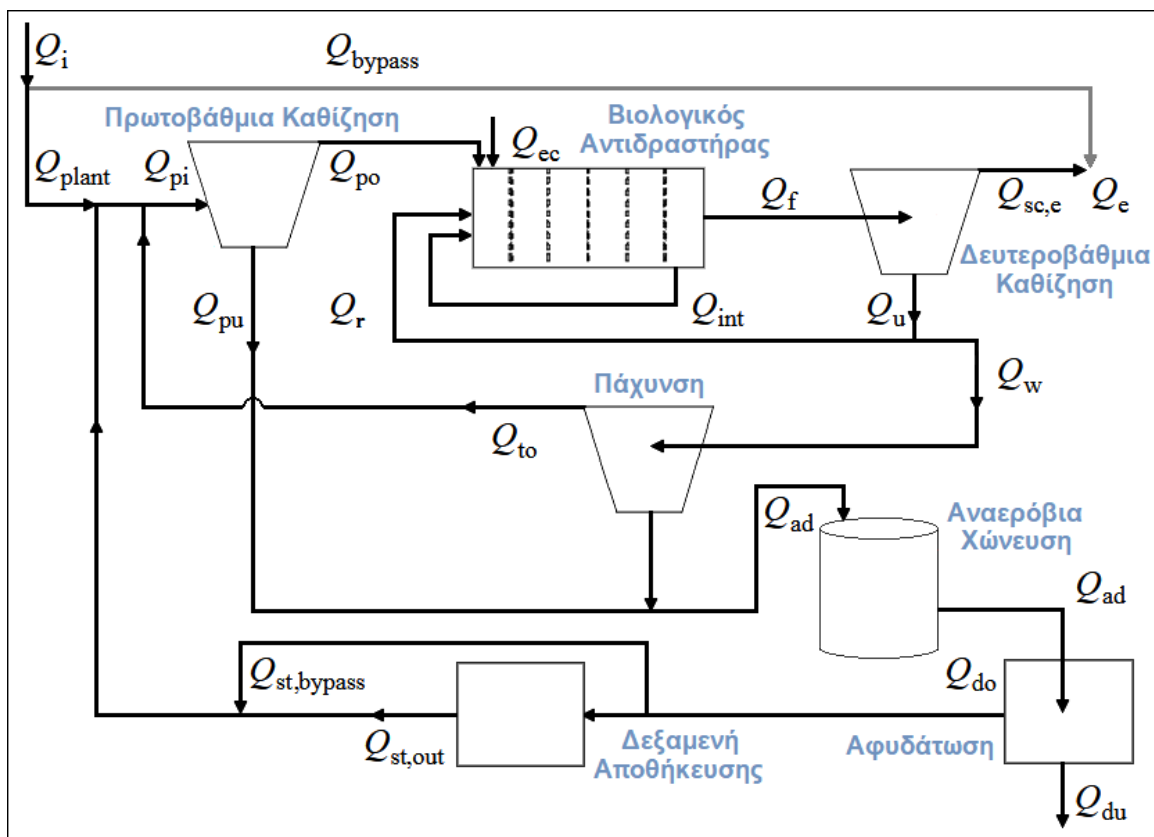
$$OCI = AE + PE + 3 \cdot SP + 3 \cdot EC + ME - 6MET_{prod} + HE_{net} \quad (2.11)$$

### 3 Μοντέλο Ολοκληρωμένης Προσομοίωσης Νο.2 (BSM2)

#### 3.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε το Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2), όπως υλοποιήθηκε σε Matlab/Simulink από το Πανεπιστήμιο Lund στη Σουηδία. Στην προηγούμενη υποενότητα έγινε μια συνοπτική παρουσίαση του μοντέλου και σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί με περισσότερη λεπτομέρεια ο τρόπος προσομοίωσης της λειτουργίας κάθε μονάδας.

Κάθε εγκατάσταση, ανάλογα με το σχεδιασμό της, έχει μια μέγιστη παροχή που μπορεί να διαχειριστεί με ασφάλεια. Μεγαλύτερες παροχές παρακάμπτονται τελείως τα έργα της εγκατάστασης ( $Q_{bypass}$ ) και οδηγούνται κατευθείαν στον αποδέκτη (Σχήμα 3.1.1).

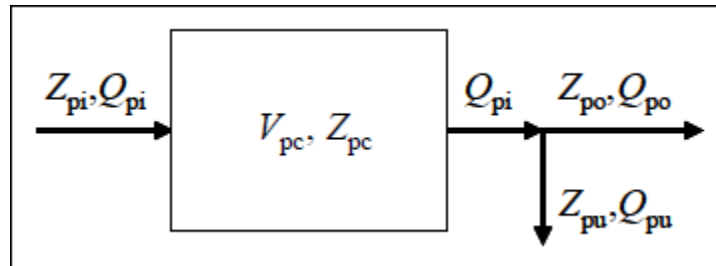


Σχήμα 3.1.1: Παροχές μονάδων BSM2 (Alex et al., 2008)

Στο BSM2, αν η παροχή των ανεπεξέργαστων λυμάτων πριν την είσοδο της εγκατάστασης ( $Q_i$ ) ξεπερνά τα  $60000 \text{ m}^3/\text{d}$ , τότε η  $Q_{bypass}$  θα είναι ίση με  $Q_i - 60000 \text{ [m}^3/\text{d]}$  και για επεξεργασία προς την πρωτοβάθμια καθίζηση θα συνεχίσει παροχή ίση με  $Q_{plant} = 60000 \text{ m}^3/\text{d}$ .

### 3.2 Πρωτοβάθμια Καθίζηση

Για την προσομοίωση της Δεξαμενής Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ) επιλέχθηκε και τροποποιήθηκε το μοντέλο που προτάθηκε από τους Otterpohl και Freund (1992) και Otterpohl et al. (1994). Σύμφωνα με αυτό, η ΔΠΚ μπορεί να προσομοιωθεί ως μια δεξαμενή πλήρους μίξης, με δύο ρεύματα εξόδου· ένα ρεύμα λυμάτων, κι ένα πρωτοβάθμιας ιλύος (Σχήμα 3.2.1). Στην αρχική περιγραφή του μοντέλου δεν περιλαμβανόταν το δεύτερο ρεύμα, οπότε προστέθηκαν οι εξισώσεις που αφορούν την πρωτοβάθμια λάσπη, οι οποίες προκύπτουν από ισοζύγια μαζών.



Σχήμα 3.2.1: Συγκεντρώσεις και Παροχές Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (Alex et al., 2008)

Η παροχή στην είσοδο της ΔΠΚ ( $Q_{pi}$ ) προκύπτει από το άθροισμα

$$Q_{pi} = Q_{plant} + Q_{to} + Q_{st,bypass} + Q_{st,out} \quad (3.1)$$

όπου

$Q_{plant}$  η παροχή των ανεπεξέργαστων λυμάτων ( $\leq 60000 \text{ m}^3/d$ ),

$Q_{to}$  η παροχή από τη μονάδα πάχυνσης,

$Q_{st,bypass}$  η παροχή παράκαμψης από τη δεξαμενή αποθήκευσης, και

$Q_{st,out}$  είναι η παροχή από τη δεξαμενή αποθήκευσης.

Για οποιοδήποτε συστατικό στην είσοδο της μονάδας, όπως και για τη θερμοκρασία, ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$Z_{pi}Q_{pi} = Z_{plant}Q_{plant} + Z_{to}Q_{to} + Z_{st,bypass}Q_{st,bypass} + Z_{st,out}Q_{st,out} \quad (3.2)$$

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης  $Z$  ενός οποιουδήποτε συστατικού  $k$  μέσα στη δεξαμενή, ισχύουν οι εξισώσεις αντιδραστήρα πλήρους μίξης CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor):

$$\frac{dZ_{pc,k}(t)}{dt} = \frac{Q_{pi}(t)}{V_{pc}} (Z_{pi,k} - Z_{pc,k}) \quad (3.3)$$

Η αποδοτικότητα της απομάκρυνσης του COD ( $\eta_{COD}(t)$  [%]) δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{COD}(t) = f_{corr}(2,88f_X - 0,118)(1,45 + 6,15 \ln(t_h(t) \times 24 \times 60)) \quad (3.4)$$

όπου

- $f_{corr} = 0,65$ : διορθωτικός συντελεστής
- $f_X$ : η μέση τιμή της αναλογίας σωματιδιακού COD προς ολικό COD (σταθερά)

$$f_X = \frac{COD_{part}}{COD_{tot}} \quad (3.4.1)$$

- $t_h$ : υδραυλικός χρόνος παραμονής [d]

$$t_h(t) = \frac{V_{pc}}{Q_m(t) + 0,001} \quad (3.4.2)$$

Για τον υπολογισμό της «μέσης» παροχής εισόδου  $Q_m(t)$  απαιτείται η χρήση μιας σταθεράς εξομάλυνσης χρόνου  $t_m = 3/24$  d:

$$\frac{dQ_m(t)}{dt} = (Q_{pi}(t) - Q_m(t)) \frac{1}{t_m} \quad (3.4.3)$$

Το διαλυτό COD δεν επηρεάζεται, άρα η αποδοτικότητα της απομάκρυνσης του σωματιδιακού COD δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{CODp} = \frac{\eta_{COD}}{f_X} \quad (3.5)$$

### Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Λύματα

Οι συγκεντρώσεις στην έξοδο της μονάδας υπολογίζονται από τη σχέση:

$$Z_{po,k}(t) = f_k Z_{pi,k}(t) \quad (3.6)$$

όπου

$$f_k = 1 - \frac{\eta_{CODp}}{100} f_{sx,k} \quad (3.6.1)$$

με την τιμή του  $f_{sx,k}$  να εξαρτάται από τη φύση του συστατικού:

- $f_{sx,k} = f_{XS}$  για  $X_S$
- $f_{sx,k} = 1$  για τα υπολοιπα σωματιδιακά συστατικά
- $f_{sx,k} = 0$  για όλα τα διαλυτά συστατικά



## Πρωτοβάθμια Ιλύς

Η συγκέντρωση της πρωτοβάθμιας ιλύος δίνεται από το ισοζύγιο μάζας

$$Z_{pu,k}(t) = \left( (1 - f_k) \frac{Q_{pi}(t)}{Q_{pu}(t)} + f_i \right) Z_{pc,k} \quad (3.7)$$

Για την παροχή της πρωτοβάθμιας ιλύος χρησιμοποιείται μια αναλογία με τη ροή των εισερχόμενων λυμάτων:

$$Q_{pu}(t) = f_{PS} q(t), \quad \text{όπου } f_{PS} = 0,007 \quad (3.8)$$

### 3.3 Βιολογικός Αντιδραστήρας

Για την προσομοίωση της λειτουργίας του βιολογικού αντιδραστήρα χρησιμοποιείται το μοντέλο ενεργού ιλύος ASM1. Υπενθυμίζονται τα συστατικά του (Πίνακας 2.2.1).

Πίνακας 2.2.1: Συστατικά του ASM1

Συμβολισμός	Περιγραφή
$S_S$	Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
$X_S$	Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
$S_I$	Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη (μη-βιοδιασπάσιμη)
$X_I$	Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη (μη-βιοδιασπάσιμη)
$X_P$	Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης
$X_{B,H}$	Ετεροτροφική βιομάζα
$X_{B,A}$	Αυτοτροφική βιομάζα
$S_{NO}$	Διαλυμένο νιτρικό άζωτο
$X_{ND}$	Σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο
$S_{ND}$	Διαλυμένο οργανικό άζωτο
$S_{NH}$	Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο
$S_O$	Διαλυμένο οξυγόνο
$S_{ALK}$	Συνολική αλκαλικότητα

Όπως αναφέρθηκε κατά την περιγραφή του BSM1, η λειτουργία του βιοαντιδραστήρα προσομοιώνεται με μια δεξαμενή πέντε διαμερισμάτων. Στα δύο πρώτα διαμερίσματα ( $V_{as,1} = V_{as,2} = 1500 \text{ m}^3$ ) επικρατούν ανοξικές συνθήκες, και στα επόμενα τρία ( $V_{as,3} = V_{as,4} = V_{as,5} = 3000 \text{ m}^3$ ) αερόβιες.

Η παροχή στο διαμέρισμα 1 προκύπτει από το άθροισμα

$$Q_1 = Q_{int} + Q_r + Q_{po} \quad (3.9)$$

όπου

$Q_{int}$  η εσωτερική ανακυκλοφορία από το διαμέρισμα 5,  
 $Q_r$  η εξωτερική ανακυκλοφορία από τη δεξαμενή τελικής καθίζησης και  
 $Q_{po}$  η παροχή εισόδου από την πρωτοβάθμια καθίζηση

Για τις παροχές των επόμενων διαμερισμάτων ισχύει  $Q_k = Q_{k-1}$ .

Οι συγκεντρώσεις των συστατικών υπολογίζονται από ισοζύγια μάζας, με ξεχωριστές εξισώσεις για το 1<sup>ο</sup> διαμέρισμα ( $k=1$ ) και για τα επόμενα διαμερίσματα ( $k=2$  έως 5):

$$\frac{dZ_{as,1}}{dt} = \frac{1}{V_{as,1}} (Q_{int}Z_{int} + Q_rZ_r + Q_{po}Z_{po} + r_{z,1}V_{as,1} - Q_1Z_{as,1}) \quad (3.10)$$

$$\frac{dZ_{as,k}}{dt} = \frac{1}{V_{as,k}} (Q_{k-1}Z_{as,k-1} + r_{z,k}V_{as,k} - Q_kZ_{as,k}), \quad k = 2 - 5 \quad (3.11)$$

Συγκεκριμένα για το οξυγόνο ισχύει

$$\frac{dS_{O,as,k}}{dt} = \frac{1}{V_{as,k}} (Q_{k-1}S_{O,as,k-1} + r_{z,k}V_{as,k} + (K_L a)_k V_{as,k} (S_{O,as}^{sat} - S_{O,as,k}) - Q_k S_{O,as,k}) \quad (3.12)$$

όπου

$r_{z,k}$  ο παρατηρούμενος ρυθμός αντίδρασης, και  
 $S_{O,as}^{sat}$  η συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου. Εξαρτάται από τη θερμοκρασία, και μειώνεται με τη μείωσή της:

$$S_{O,as}^{sat}(T_{as}) = 0,9997743214 \times \frac{8}{10,5} \times 6791,5 \times 56,12 e^{A+B/T^*+C \ln T^*} \quad (3.12.1)$$

όπου

$$A = -66,7354,$$

$$B = 87,4755,$$

$$C = 24,4526 \text{ και}$$

$$T^* = T_K/100 \text{ (K)}, \text{ με } T_K = T_{as} \text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15$$

με θερμοκρασία  $T_{as}$  μια αδιαβατική θερμοκρασία ισορροπίας· θεωρείται ότι δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον:

$$\frac{dT_{as,k}}{dt} = \frac{1}{V_{as,k}} (Q_{k-1}T_{as,k-1} - Q_k T_{as,k}) \quad (3.12.2)$$

### 3.4 Δευτεροβάθμια Καθίζηση

Όπως αναφέρθηκε κατά την περιγραφή του BSM1, η λειτουργία της δευτεροβάθμιας καθίζησης προσομοιώνεται με μια μονάδα 10 στρώσεων, όπου δε λαμβάνουν χώρα βιολογικές διεργασίες. Το ύψος κάθε στρώσης είναι  $z_m = 0,4 \text{ m}$  άρα το συνολικό ύψος είναι  $4 \text{ m}$ , και η μονάδα έχει επιφάνεια  $A = 1500 \text{ m}^2$ , άρα ο συνολικός όγκος ισούται με  $6000 \text{ m}^3$ . Η έκτη στρώση ( $m=6$ ) είναι η στρώση τροφοδοσίας, με την αρίθμηση να ξεκινάει από τη βάση.

Υπενθυμίζεται ότι η ροή των στερεών λόγω βαρύτητας είναι

$$J_s = v_s(X_{sc})X_{sc} \quad (3.13)$$

όπου

$X_{sc}$  η συνολική συγκέντρωση ιλύος, και

$v_s(X_{sc})$  η ταχύτητα καθίζησης που, σύμφωνα με τους Takács *et al.* (1991), ισούται με

$$v_s(X_{sc}) = \max[0, \min\{v'_0, v_0(e^{-r_h(X_{sc}-X_{min})} - e^{-r_p(X_{sc}-X_{min})})\}] \quad (3.14)$$

όπου  $X_{min} = f_{ns}X_f$ , με  $X_f$  τη συνολική συγκέντρωση στερεών στο βιοαντιδραστήρα.

Οι τιμές των παραμέτρων για τη συνάρτηση ταχύτητας δίνονται στον Πίνακα 2.4.1.

Πίνακας 2.4.1: Τιμές παραμέτρων συνάρτησης ταχύτητας (Alex *et al.*, 2008)

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες Μέτρησης
$v'_0$	250	$\text{m/d}$
$v_0$	474	$\text{m/d}$
$r_h$	0,000576	$\text{m}^3/\text{g SS}$
$r_p$	0,00286	$\text{m}^3/\text{g SS}$
$f_{ns}$	0,00228	—

Για τον υπολογισμό των ισοζυγίων μαζών της λύος απαιτείται πρώτα ο υπολογισμός των ταχυτήτων  $v_{up}$  και  $v_{dn}$ :

$$v_{up} = \frac{Q_{sc,e}}{A} \quad (3.15)$$

$$v_{dn} = \frac{Q_{sc,u}}{A} = \frac{Q_r + Q_w}{A} \quad (3.16)$$

Για τη στρώση τροφοδοσίας ( $m = 6$ ):

$$\frac{dX_{sc,6}}{dt} = \frac{\frac{Q_f X_f}{A} + J_{sc,7} - (v_{up} + v_{dn})X_{sc,6} - \min(J_{s,6}, J_{s,5})}{z_6} \quad (3.17)$$

Για τις ενδιάμεσες στρώσεις κάτω από τη στρώση τροφοδοσίας ( $m = 2 - 5$ ):

$$\frac{dX_{sc,m}}{dt} = \frac{v_{dn}(X_{sc,m+1} - X_{sc,m}) + \min(J_{s,m}, J_{s,m+1}) - \min(J_{s,m}, J_{s,m-1})}{z_m} \quad (3.18)$$

Για τη στρώση στη βάση ( $m = 1$ ):

$$\frac{dX_{sc,1}}{dt} = \frac{v_{dn}(X_{sc,2} - X_{sc,1}) + \min(J_{s,1}, J_{s,2})}{z_1} \quad (3.19)$$

Για τις ενδιάμεσες στρώσεις πάνω από τη στρώση τροφοδοσίας ( $m = 7 - 9$ ):

$$\frac{dX_{sc,m}}{dt} = \frac{v_{up}(X_{sc,m-1} - X_{sc,m}) + J_{sc,m+1} - J_{sc,m}}{z_m} \quad (3.20)$$

όπου

$$J_{sc,j} = \begin{cases} \min(v_{s,j}X_{sc,j}, v_{s,j-1}X_{sc,j-1}) & \text{αν } X_{sc,j-1} > X_t \\ \text{ή} \\ v_{s,j}X_{sc,j} & \text{αν } X_{sc,j-1} \leq X_t \end{cases}$$

Για τη στρώση στην κορυφή ( $m = 10$ ):

$$\frac{dX_{sc,10}}{dt} = \frac{v_{up}(X_{sc,9} - X_{sc,10}) - J_{sc,10}}{z_{10}} \quad (3.21)$$

όπου

$$J_{sc,10} = \begin{cases} \min(v_{s,10}X_{sc,10}, v_{s,9}X_{sc,9}) & \text{αν } X_{sc,9} > X_t \\ \text{ή} \\ v_{s,10}X_{sc,10} & \text{αν } X_{sc,9} \leq X_t \end{cases}$$

Η συγκέντρωση – όριο  $X_t$  ισούται με  $3000 \text{ g/m}^{-3}$ .

Για τα διαλυτά συστατικά (συμπεριλαμβανομένων του διαλυμένου οξυγόνου και της θερμοκρασίας ( $T_{sc}$ )), κάθε στρώση αντιπροσωπεύει έναν εντελώς αναμειγμένο όγκο και οι συγκεντρώσεις των διαλυτών συστατικών υπολογίζονται αναλόγως:

Για τη στρώση τροφοδοσίας ( $m = 6$ ):

$$\frac{dZ_{sc,6}}{dt} = \frac{\frac{Q_f X_f}{A} + J_{sc,7} - (v_{up} + v_{dn})Z_{sc,6}}{z_6} \quad (3.22)$$

Για τις στρώσεις ( $m = 1 - 5$ ):

$$\frac{dZ_{sc,m}}{dt} = \frac{v_{dn}(Z_{sc,m+1} - Z_{sc,m})}{z_m} \quad (3.23)$$

Για τις στρώσεις ( $m = 7 - 10$ ):

$$\frac{dZ_{sc,m}}{dt} = \frac{v_{up}(Z_{sc,m+1} - Z_{sc,m})}{z_m} \quad (3.24)$$

Οι συγκεντρώσεις στην παροχή ανακυκλοφορίας και στην περίσσεια είναι ίσες με εκείνες της στρώσης στη βάση ( $Z_u = Z_{sc,1}$ ).

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης της ιλύος προκύπτει από το άθροισμα των σωματιδιακών στοιχείων του τελευταίου αερόβιου διαμερίσματος:

$$X_f = \frac{1}{fr_{COS-SS}} (X_{S,as,5} + X_{P,as,5} + X_{I,as,5} + X_{B,H,as,5} + X_{B,A,as,5}) \quad (3.25)$$

Το ίδιο ισχύει για το  $X_u$  (στην περίσσεια ιλύ) και το  $X_e$  (στην έξοδο της καθίζησης).

Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των σωματιδιακών στοιχείων τόσο στην επανακυκλοφορία όσο και στην περίσσεια ιλύ, η αναλογία τους προς τη συγκέντρωση των ολικών στερεών θεωρείται σταθερή μέσα στη δεξαμενή τελικής καθίζησης:

$$\frac{X_{S,as,5}}{X_f} = \frac{X_{S,sc,1}}{X_u} \quad (3.26)$$

Παρόμοιες εξισώσεις ισχύουν για τα  $X_{P,sc,1}$ ,  $X_{I,sc,1}$ ,  $X_{B,H,sc,1}$ ,  $X_{B,A,sc,1}$  και  $X_{ND,sc,1}$ .

Ο υπολογισμός για την ηλικία της ιλύος βασίζεται στη συνολική ποσότητα βιομάζας που είναι παρούσα στο σύστημα, δηλαδή τον αντιδραστήρα και τη δεξαμενή καθίζησης:

$$SRT = \frac{TX_{as} + TX_{sc}}{\varphi_e + \varphi_w} \quad (3.27)$$

όπου

$TX_{as}$  είναι η συνολική ποσότητα βιομάζας στον αντιδραστήρα

$$TX_{as} = \sum_{k=1}^{k=n} (X_{B,H,as,k} + X_{B,A,as,k}) V_{as,k}, \mu\epsilon n = 5 \quad (3.28)$$

$TX_{sc}$  είναι η συνολική ποσότητα βιομάζας στη δεξαμενή καθίζησης

$$TX_{sc} = \sum_{j=1}^{j=m} (X_{B,H,sc,j} + X_{B,A,sc,j}) z_j \times A, \mu\epsilon m = 10 \quad (3.29)$$

$\varphi_e$  είναι ο ρυθμός απώλειας βιομάζας στην υπερχειλίση της δεξαμενής

$$\varphi_e = (X_{B,H,sc,m} + X_{B,A,sc,m}) \times Q_{sc,e} \quad (3.30)$$

$\varphi_w$  είναι ο ρυθμός απώλειας βιομάζας στην περίσσεια ιλύ

$$\varphi_w = (X_{B,H,sc,1} + X_{B,A,sc,1}) \times Q_w \quad (3.31)$$

Σε πραγματικές συνθήκες, σε μια εγκατάσταση η ηλικία της ιλύος μετράται με βάση τη συνολική ποσότητα στερεών στο σύστημα:

$$SRT_{meas} = \frac{TSS_{as} + TSS_{sc}}{\psi_e + \psi_w} \quad (3.32)$$

όπου  $TSS_{as}$  η συνολική ποσότητα στερεών στον αντιδραστήρα

$$TSS_{as} = \sum_{k=1}^{k=n} TSS_{as,k} V_{as,k}, \mu\epsilon n = 5 \quad (3.33)$$

και

$$TSS_{as,k} = 0.75(X_{S,as,k} + X_{P,as,k} + X_{I,as,k} + X_{B,H,as,k} + X_{B,A,as,k}) \quad (3.33.1)$$

όπου  $TSS_{sc}$  η συνολική ποσότητα στερεών στην τελική καθίζηση

$$TSS_{sc} = \sum_{j=1}^{j=m} TSS_{sc,j} Z_j A, \text{ με } m = 10 \quad (3.34)$$

και

$$TSS_{sc,j} = 0.75(X_{S,sc,j} + X_{P,sc,j} + X_{I,sc,j} + X_{B,H,sc,j} + X_{B,A,sc,j}) \quad (3.34.1)$$

όπου  $\psi_e$  είναι ο ρυθμός απώλειας στερεών στην έξοδο της τελικής καθίζησης

$$\psi_e = TSS_{sc,m} \times Q_{sc,e} \quad (3.35)$$

με

$$TSS_{sc,m} = 0.75(X_{S,sc,m} + X_{P,sc,m} + X_{I,sc,m} + X_{B,H,sc,m} + X_{B,A,sc,m}) \quad (3.35.1)$$

όπου  $\psi_w$  είναι ο ρυθμός απώλειας στερεών στην παροχή της περίσσειας ιλύος

$$\psi_w = TSS_{sc,1} \times Q_w \quad (3.36)$$

με

$$TSS_{sc,1} = 0.75(X_{S,sc,1} + X_{P,sc,1} + X_{I,sc,1} + X_{B,H,sc,1} + X_{B,A,sc,1}) \quad (3.36.1)$$

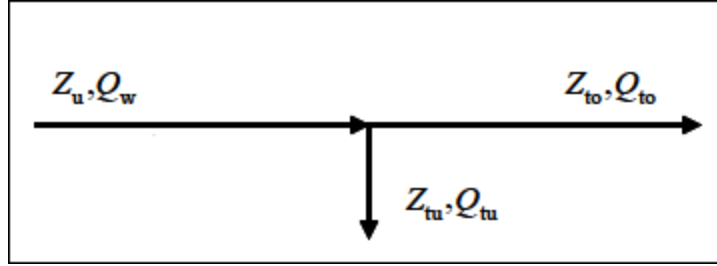
Η σύσταση της εκροής της εγκατάστασης βασίζεται στην υπερχειλίση της δεξαμενής τελικής καθίζησης και σε ανεπεξέργαστα λύματα που παρακάμπτουν την εγκατάσταση. Για οποιοδήποτε συστατικό ισχύει:

$$Z_e = (Q_{sc,e} Z_{sc,10} + Q_{bypass} Z_i) / (Q_{sc,e} + Q_{bypass}) \quad (3.37)$$

όπου  $Z_i$  η συγκέντρωση στα ανεπεξέργαστα λύματα.

### 3.5 Μονάδα Πάχυνσης

Για λόγους απλότητας η μονάδα θεωρείται ότι η μονάδα πάχυνσης έχει ιδανική συμπεριφορά και μηδενικό όγκο. Η περίσσεια ιλύς από τη δεξαμενή τελικής καθίζησης «παχαίνεται» πριν αναμειχθεί με την πρωτοβάθμια ιλύ και κατευθυνθεί προς την αναερόβια χώνευση (Σχήμα 3.5.1).



Σχήμα 3.5.1: Συγκεντρώσεις και Παροχές μονάδας Πάχυνσης (Alex et al., 2008)

Η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στην είσοδο του παχυντή είναι  $TSS_{sc,1}$  (από τη στρώση  $m = 1$  της δεξαμενής τελικής καθίζησης). Το ποσοστό των αιωρούμενων στερεών στην έξοδο του παχυντή είναι  $p_{thick}$  ( $= 7\%$ ). Το ποσοστό των αιωρούμενων στερεών που απομακρύνεται είναι  $TSS_{rem}$  ( $= 98\%$ ). Ο συντελεστής πάχυνσης ( $f_{thick}$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$f_{thick} = p_{thick} \frac{10000}{TSS_{sc,1}} \quad (3.38)$$

Έστω

$$fq_{tu} = \frac{TSS_{rem}}{100f_{thick}} \quad (3.39)$$

Τότε ο συντελεστής αραιώσης ( $f_{thin}$ ) ισούται με

$$f_{thin} = \frac{1 - TSS_{rem}/100}{1 - fq_{tu}} \quad (3.40)$$

Αν ο συντελεστής πάχυνσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας, τότε οι μεταβλητές στην έξοδο υπολογίζονται ως εξής:

- Για οποιοδήποτε σωματιδιακό κλάσμα:  $Z_{tu} = Z_u f_{thick}$
- Για οποιοδήποτε διαλυτό κλάσμα και τη θερμοκρασία:  $Z_{tu} = Z_u$
- Παροχή εξόδου:  $Q_{tu} = Q_w f q_{tu}$

Οι μεταβλητές στα στραγγίδια υπολογίζονται ως εξής:

- Για οποιοδήποτε σωματιδιακό κλάσμα:  $Z_{to} = Z_u f_{thin}$
- Για οποιοδήποτε διαλυτό κλάσμα και τη θερμοκρασία:  $Z_{to} = Z_u$
- Παροχή εξόδου:  $Q_{to} = Q_w (1 - f q_{tu})$

Αν ο συντελεστής πάχυνσης είναι μικρότερος της μονάδας, τότε πρόκειται για λάθος.



### 3.6 Μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης

Η λειτουργία της μονάδας αναερόβιας χώνευσης προσομοιώνεται με το Anaerobic Digestion Model No. 1, οι εξισώσεις του οποίου παρουσιάζονται στη συνέχεια. Οι μεταβλητές του διαφέρουν από εκείνες του ASM1 που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κατάσταση του ανάμεικτου υγρού στις διάφορες θέσεις της εγκατάστασης, για αυτό πριν την είσοδο στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης γίνεται ένας υπολογισμός των συστατικών του ADM1 (διασύνδεση ASM/ADM), και με την έξοδο από τη μονάδα υπολογίζονται τα συστατικά πάλι σε όρους μεταβλητών ASM1 (διασύνδεση ADM/ASM).

Ο όγκος της μονάδας είναι  $3400 \text{ m}^3$  και η παροχή της υπολογίζεται ως το άθροισμα

$$Q_{ad} = Q_{tu} + Q_{pu} \quad (3.41)$$

όπου

$Q_{tu}$  η παροχή από τη μονάδα πάχυνσης και

$Q_{pu}$  η παροχή από την πρωτοβάθμια καθίζηση.

#### Εξισώσεις ADM1

- Ρυθμοί βιοχημικών διεργασιών

Κλασματοποίηση:

$$\rho_{1,ad} = k_{dis} X_c \quad (3.42)$$

Υδρόλυση υδρογονανθράκων:

$$\rho_{2,ad} = k_{hyd,ch} X_{ch} \quad (3.43)$$

Υδρόλυση πρωτεϊνών:

$$\rho_{3,ad} = k_{hyd,pr} X_{pr} \quad (3.44)$$

Υδρόλυση υδρογονανθράκων:

$$\rho_{4,ad} = k_{hyd,li} X_{li} \quad (3.45)$$

Κατανάλωση σακχάρων:

$$\rho_{5,ad} = k_{m,su} \frac{S_{su}}{K_{S,su} + S_{su}} X_{su} I_5 \quad (3.46)$$

Κατανάλωση αμινοξέων:

$$\rho_{6,ad} = k_{m,aa} \frac{S_{aa}}{K_{S,aa} + S_{aa}} X_{aa} I_6 \quad (3.47)$$

Κατανάλωση πτητικών λιπαρών οξέων:

$$\rho_{7,ad} = k_{m,fa} \frac{S_{fa}}{K_{S,fa} + S_{fa}} X_{fa} I_7 \quad (3.48)$$

Κατανάλωση βαλτρικού οξέος:

$$\rho_{8,ad} = k_{m,c4} \frac{S_{va}}{K_{S,c4} + S_{va}} X_{c4} \frac{S_{va}}{S_{bu} + S_{va}} I_8 \quad (3.49)$$

Κατανάλωση βουτυρικού οξέος:

$$\rho_{9,ad} = k_{m,c4} \frac{S_{bu}}{K_{S,c4} + S_{bu}} X_{c4} \frac{S_{bu}}{S_{va} + S_{bu}} I_9 \quad (3.50)$$

Κατανάλωση προπιονικού οξέος:

$$\rho_{10,ad} = k_{m,pro} \frac{S_{pro}}{K_{S,pro} + S_{pro}} X_{pro} I_{10} \quad (3.51)$$

Κατανάλωση οξικού οξέος:

$$\rho_{11,ad} = k_{m,ac} \frac{S_{ac}}{K_{S,ac} + S_{ac}} X_{ac} I_{11} \quad (3.52)$$

Κατανάλωση υδρογόνου:

$$\rho_{12,ad} = k_{m,h2} \frac{S_{h2}}{K_{S,h2} + S_{h2}} X_{h2} I_{12} \quad (3.53)$$

Αποσύνθεση καταναλωτών σακχάρων:

$$\rho_{13,ad} = k_{dec,xsu} X_{su} \quad (3.54)$$

Αποσύνθεση καταναλωτών αμινοξέων:

$$\rho_{14,ad} = k_{dec,xa} X_{aa} \quad (3.55)$$

Αποσύνθεση καταναλωτών λιπαρών οξέων:

$$\rho_{15,ad} = k_{dec,xf} X_{fa} \quad (3.56)$$

Αποσύνθεση καταναλωτών βαλριικού και βουτυρικού οξέος:

$$\rho_{16,ad} = k_{dec,xc} X_{c4} \quad (3.57)$$

Αποσύνθεση καταναλωτών προπιονικού οξέος:

$$\rho_{17,ad} = k_{dec,xp} X_{pro} \quad (3.58)$$

Αποσύνθεση καταναλωτών οξικού οξέος:

$$\rho_{18,ad} = k_{dec,xa} X_{ac} \quad (3.59)$$

Αποσύνθεση καταναλωτών υδρογόνου:

$$\rho_{19,ad} = k_{dec,xh} X_{h2} \quad (3.60)$$

Στις εκφράσεις των  $\rho_{8,ad}$  και  $\rho_{9,ad}$ , μια μικρή σταθερά ( $10^{-6}$ ) μπορεί να προστεθεί στο άθροισμα του παρονομαστή ( $S_{va} + S_{bu}$ ) ώστε να αποφευχθεί η διαίρεση με το μηδέν, στην περίπτωση που δε γίνει καλή επιλογή των αρχικών συνθηκών για τα  $S_{va}$  και  $S_{bu}$ , αντίστοιχα.

➤ Ρυθμοί οξεογένεσης

$$\rho_{A,4} = k_{A,Bva} (S_{va} - (K_{a,va} + S_{H^+}) - K_{a,va} S_{va}) \quad (3.61)$$

$$\rho_{A,5} = k_{A,Bbu} (S_{bu} - (K_{a,bu} + S_{H^+}) - K_{a,bu} S_{bu}) \quad (3.62)$$

$$\rho_{A,6} = k_{A,Bpro} (S_{pro} - (K_{a,pro} + S_{H^+}) - K_{a,pro} S_{pro}) \quad (3.63)$$

$$\rho_{A,7} = k_{A,Bac} (S_{ac} - (K_{a,ac} + S_{H^+}) - K_{a,ac} S_{ac}) \quad (3.64)$$

$$\rho_{A,10} = k_{A,Bco2}(S_{hco3^-}(K_{a,co2} + S_{H^+}) - K_{a,co2}S_{IC}) \quad (3.65)$$

$$\rho_{A,11} = k_{A,BIN}(S_{nh3}(K_{a,IN} + S_{H^+}) - K_{a,IN}S_{IN}) \quad (3.66)$$

➤ Ρυθμοί μεταφοράς σε αέριο

$$\rho_{T,8} = K_L a(S_{h2} - 16K_{H,h2}p_{gas,h2}) \quad (3.67)$$

$$\rho_{T,9} = K_L a(S_{ch4} - 64K_{H,ch4}p_{gas,ch4}) \quad (3.68)$$

$$\rho_{T,10} = K_L a(S_{co2} - 64K_{H,co2}p_{gas,co2}) \quad (3.69)$$

➤ Συντελεστές αναχαίτισης

Συντελεστής αναχαίτισης του pH και του ανόργανου αζώτου για την κατανάλωση των σακχάρων και των αμινοξέων:

$$I_5 = I_6 = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \quad (3.70)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του pH και του ανόργανου αζώτου για την κατανάλωση των πτητικών λιπαρών οξέων:

$$I_7 = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2,fa} \quad (3.71)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του pH και του ανόργανου αζώτου για την κατανάλωση του βουτυρικού και του βαλρικού οξέος:

$$I_8 = I_9 = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2,c4} \quad (3.72)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του pH και του ανόργανου αζώτου για την κατανάλωση του προπιονικού οξέος:

$$I_{10} = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2,pro} \quad (3.73)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του pH, του ανόργανου αζώτου και της ελεύθερης αμμωνίας για την κατανάλωση οξικού οξέος:

$$I_{11} = I_{pH,ac} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{nh3} \quad (3.74)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του pH και του ανόργανου αζώτου για την κατανάλωση υδρογόνου:

$$I_{12} = I_{pH,h2} \cdot I_{IN,lim} \quad (3.75)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του ανόργανου αζώτου:

$$I_{IN,lim} = \frac{1}{1 + K_{S,IN}/S_{IN}} \quad (3.76)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του υδρογόνου για την κατανάλωση πτητικών λιπαρών οξέων:

$$I_{h2,fa} = \frac{1}{1 + S_{h2}/K_{I,h2,fa}} \quad (3.77)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του υδρογόνου για την κατανάλωση βουτυρικού και βαλιρικού οξέος:

$$I_{h2,c4} = \frac{1}{1 + S_{h2}/K_{I,h2,c4}} \quad (3.78)$$

Συντελεστής αναχαίτισης του υδρογόνου για την κατανάλωση προπιονικού οξέος:

$$I_{h2,pro} = \frac{1}{1 + S_{h2}/K_{I,h2,pro}} \quad (3.79)$$

Συντελεστής αναχαίτισης της ελεύθερης αμμωνίας

$$I_{nh3} = \frac{1}{1 + S_{nh3}/K_{I,nh3}} \quad (3.80)$$

Οι Batstone *et al.* (2002) χρησιμοποίησαν συναρτήσεις – διακόπτες για να λαμβάνουν υπόψη τυχόν αναχαίσεις λόγω του pH. Αυτές οι συναρτήσεις δεν ήταν όμως συνεχείς, και σε ένα «δύσκαμπτο» σύστημα τέτοιοι διακόπτες ευνοούν αριθμητικές αστάθειες. Για να μειωθεί αυτό το ρίσκο, εναλλακτικές συναρτήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκφραστεί η αναχαίτιση λόγω pH. Οι Siegrist *et al.* (2002) χρησιμοποίησαν μία συνάρτηση αναχαίτισης βασισμένη στη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου, και αυτή η λύση επιλέχθηκε για το BSM2. Για το ADM1, αυτό δίνει τις ακόλουθες εκφράσεις:

Συντελεστής αναχαίτισης για την κατανάλωση αμινοξέων:

$$I_{pH,aa} = \frac{K_{pH}^{n_{aa}}}{S_{H^+}^{n_{aa}} + K_{pH}^{n_{aa}}} \quad (3.81)$$

όπου

$$K_{pH} = 10^{-\frac{pH_{LL,aa} + pH_{UL,aa}}{2}} \quad (3.81.1)$$

και

$$n_{aa} = \frac{3,0}{pH_{UL,aa} - pH_{LL,aa}} \quad (3.81.2)$$

Συντελεστής αναχαίτισης για την κατανάλωση οξικού οξέος:

$$I_{pH,ac} = \frac{K_{pH}^{n_{ac}}}{S_{H^+}^{n_{ac}} + K_{pH}^{n_{ac}}} \quad (3.82)$$

όπου

$$K_{pH} = 10^{-\frac{pH_{LL,ac} + pH_{UL,ac}}{2}} \quad (3.82.1)$$

και

$$n_{ac} = \frac{3,0}{pH_{UL,ac} - pH_{LL,ac}} \quad (3.82.2)$$

Συντελεστής αναχαίτισης για την κατανάλωση υδρογόνου:

$$I_{pH,h2} = \frac{K_{pH}^{n_{h2}}}{S_{H^+}^{n_{h2}} + K_{pH}^{n_{h2}}} \quad (3.83)$$

όπου

$$K_{pH} = 10^{-\frac{pH_{LL,h2} + pH_{UL,ac}}{2}} \quad (3.83.1)$$

και

$$n_{h2} = \frac{3,0}{pH_{UL,h2} - pH_{LL,h2}} \quad (3.83.2)$$

➤ Εξισώσεις υγρής φάσης

Διαφορικές εξισώσεις για τη διαλυτή ύλη

Μεταβολή σακχάρων:

$$\frac{dS_u}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{su,i} - S_{su}) + \rho_{2,ad} + (1 - f_{fa,li})\rho_{4,ad} - \rho_{5,ad} \quad (3.84)$$

Μεταβολή αμινοξέων:

$$\frac{dS_{aa}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{aa,i} - S_{aa}) - \rho_{6,ad} \quad (3.85)$$

Μεταβολή πτητικών λιπαρών οξέων:

$$\frac{dS_{fa}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{fa,i} - S_{fa}) + f_{fa,li}\rho_{4,ad} - \rho_{7,ad} \quad (3.86)$$

Μεταβολή βαλιρικού οξέος:

$$\frac{dS_{va}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{va,i} - S_{va}) + (1 - Y_{aa})f_{va,aa}\rho_{6,ad} - \rho_{8,ad} \quad (3.87)$$

Μεταβολή βουτυρικού οξέος:

$$\begin{aligned} \frac{dS_{bu}}{dt} = & \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{bu,i} - S_{su}) + (1 - Y_{su})f_{bu,su}\rho_{5,ad} \\ & + (1 - Y_{aa})f_{bu,aa}\rho_{6,ad} - \rho_{9,ad} \end{aligned} \quad (3.88)$$

Μεταβολή προπιονικού οξέος:

$$\begin{aligned} \frac{dS_{pro}}{dt} = & \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{pro,i} - S_{pro}) + (1 - Y_{su})f_{pro,su}\rho_{5,ad} \\ & + (1 - Y_{aa})f_{pro,aa}\rho_{6,ad} + (1 - Y_{c4})0,54\rho_{8,ad} - \rho_{10,ad} \end{aligned} \quad (3.89)$$

Μεταβολή οξικού οξέος:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_{ac}}{dt} = & \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{ac,i} - S_{ac}) + (1 - Y_{su})f_{ac,su}\rho_{5,ad} \\
 & + (1 - Y_{aa})f_{ac,aa}\rho_{6,ad} + (1 - Y_{fa})0,7\rho_{7,ad} \\
 & + (1 - Y_{c4})0,31\rho_{8,ad} + (1 - Y_{c4})0,58\rho_{9,ad} \\
 & + (1 - Y_{pro})0,57\rho_{10,ad} - \rho_{11,ad}
 \end{aligned} \tag{3.90}$$

Μεταβολή διαλυτού υδρογόνου:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_{h2}}{dt} = & \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{h2,i} - S_{h2}) + (1 - Y_{su})f_{h2,su}\rho_{5,ad} \\
 & + (1 - Y_{aa})f_{h2,aa}\rho_{6,ad} + (1 - Y_{fa})0,3\rho_{7,ad} \\
 & + (1 - Y_{c4})0,15\rho_{8,ad} + (1 - Y_{c4})0,2\rho_{9,ad} \\
 & + (1 - Y_{pro})0,43\rho_{10,ad} - \rho_{11,ad} - \rho_{T,8}
 \end{aligned} \tag{3.91}$$

Μεταβολή διαλυτού μεθανίου:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_{ch4}}{dt} = & \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{ch4,i} - S_{ch4}) + (1 - Y_{ac})\rho_{11,ad} + (1 - Y_{h2})\rho_{12,ad} \\
 & - \rho_{T,9}
 \end{aligned} \tag{3.92}$$

Μεταβολή ανόργανου άνθρακα:

$$\frac{dS_{IC}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{IC,i} - S_{IC}) - \sum_{j=1}^{19} \left( \sum_{k=1-9,11-24} C_k v_{k,j} \rho_{j,ad} \right) - \rho_{T,10} \tag{3.93}$$



Μεταβολή ανόργανου αζώτου:

$$\begin{aligned}
\frac{dS_{IN}}{dt} = & \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{IN,i} - S_{IN}) - Y_{su}N_{bac}\rho_{5,ad} + (N_{aa} - Y_{aa}N_{bac})\rho_{6,ad} \\
& - Y_{fa}N_{bac}\rho_{7,ad} - Y_{c4}N_{bac}\rho_{8,ad} - Y_{c4}N_{bac}\rho_{9,ad} \\
& - Y_{pro}N_{bac}\rho_{10,ad} - Y_{ac}N_{bac}\rho_{11,ad} - Y_{h2}N_{bac}\rho_{12,ad} \\
& + (N_{bac} - N_{xc}) \sum_{k=13}^{19} \rho_{k,ad} \\
& + (N_{xc} - f_{xi,xc}N_I - f_{si,xc}N_I - f_{pr,xc}N_{aa})\rho_{1,ad}
\end{aligned} \tag{3.94}$$

Μεταβολή διαλυτών αδρανών:

$$\frac{dS_I}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{I,i} - S_I) + f_{si,xc}\rho_{1,ad} \tag{3.95}$$

Διαφορικές εξισώσεις για τη σωματιδιακή ύλη

Μεταβολή σωματιδιακών κλασμάτων:

$$\begin{aligned}
\frac{dX_c}{dt} = & \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{c,i} - X_c) - \rho_{1,ad} + \rho_{13,ad} + \rho_{14,ad} + \rho_{15,ad} + \rho_{16,ad} \\
& + \rho_{17,ad} + \rho_{18,ad} + \rho_{19,ad}
\end{aligned} \tag{3.96}$$

Μεταβολή υδρογονανθράκων:

$$\frac{dX_{ch}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{ch,i} - X_{ch}) + f_{ch,xc}\rho_{1,ad} - \rho_{2,ad} \tag{3.97}$$

Μεταβολή πρωτεϊνών:

$$\frac{dX_{pr}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{pr,i} - X_{pr}) + f_{pr,xc}\rho_{1,ad} - \rho_{3,ad} \tag{3.98}$$

Μεταβολή λιπιδίων:

$$\frac{dX_{li}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{li,i} - X_{li}) + f_{li,xc} \rho_{1,ad} - \rho_{4,ad} \quad (3.99)$$

Μεταβολή καταναλωτών σακχάρων:

$$\frac{dX_{su}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{su,i} - X_{su}) + Y_{su} \rho_{5,ad} - \rho_{13,ad} \quad (3.100)$$

Μεταβολή καταναλωτών αμινοξέων:

$$\frac{dX_{aa}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{aa,i} - X_{aa}) + Y_{aa} \rho_{6,ad} - \rho_{14,ad} \quad (3.101)$$

Μεταβολή καταναλωτών λιπαρών οξέων:

$$\frac{dX_{fa}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{fa,i} - X_{fa}) + Y_{fa} \rho_{7,ad} - \rho_{15,ad} \quad (3.102)$$

Μεταβολή καταναλωτών μεθανίου:

$$\frac{dX_{c4}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{c4,i} - X_{c4}) + Y_{c4} \rho_{8,ad} + Y_{c4} \rho_{9,ad} - \rho_{16,ad} \quad (3.103)$$

Μεταβολή καταναλωτών προπιονικού οξέος:

$$\frac{dX_{pro}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{pro,i} - X_{pro}) + Y_{pro} \rho_{10,ad} - \rho_{17,ad} \quad (3.104)$$

Μεταβολή καταναλωτών οξικού οξέος:

$$\frac{dX_{ac}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{ac,i} - X_{ac}) + Y_{ac} \rho_{11,ad} - \rho_{18,ad} \quad (3.105)$$

Μεταβολή καταναλωτών διαλυτού υδρογόνου:

$$\frac{dX_{h2}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{h2,i} - X_{h2}) + Y_{h2} \rho_{12,ad} - \rho_{19,ad} \quad (3.106)$$

Μεταβολή σωματιδιακών αδρανών:

$$\frac{dX_I}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (X_{I,i} - X_I) + f_{xi\_xc} \rho_{1,ad} \quad (3.107)$$

➤ Διαφορικές εξισώσεις ανιόντων και κατιόντων

Μεταβολή κατιόντων:

$$\frac{dS_{cat^+}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{cat^+,i} - S_{cat^+}) \quad (3.108)$$

Μεταβολή ανιόντων:

$$\frac{dS_{an^-}}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{an^-,i} - S_{an^-}) \quad (3.109)$$

➤ Διαφορικές εξισώσεις διαφόρων ιόντων

Μεταβολή ανιόντων βαλιρικού οξέος:

$$\frac{dS_{va^-}}{dt} = -\rho_{A,4} \quad (3.110)$$

Μεταβολή ανιόντων βουτυρικού οξέος:

$$\frac{dS_{bu^-}}{dt} = -\rho_{A,5} \quad (3.111)$$

Μεταβολή ανιόντων προπιονικού οξέος:

$$\frac{dS_{pro^-}}{dt} = -\rho_{A,6} \quad (3.112)$$

Μεταβολή ανιόντων οξικού οξέος:

$$\frac{dS_{ac^-}}{dt} = -\rho_{A,7} \quad (3.113)$$

Μεταβολή ανιόντων ανθρακικού οξέος:

$$\frac{dS_{hco3^-}}{dt} = -\rho_{A,10} \quad (3.114)$$

Μεταβολή ανιόντων αμμωνίας:

$$\frac{dS_{nh3^-}}{dt} = -\rho_{A,11} \quad (3.115)$$

Οι αλγεβρικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό του pH είναι:

Συγκέντρωση ιόντος υδρογόνου:

$$S_{H^+} = -\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\theta^2 + 4K_W} \quad (3.116)$$

όπου

$$\theta = S_{cat^+} + S_{nh4^+} - S_{hco3^-} - \frac{S_{ac^-}}{64} - \frac{S_{pro^-}}{112} - \frac{S_{bu^-}}{160} - \frac{S_{va^-}}{208} - S_{an^-} \quad (3.116.1)$$

Συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου:

$$S_{nh4^+} = S_{IN} - S_{nh3} \quad (3.117)$$

Συγκέντρωση διαλυτού διοξειδίου του άνθρακα:

$$S_{co2} = S_{IN} - S_{hco3^-} \quad (3.118)$$

➤ Διαφορικές εξισώσεις αέριας φάσης

Μεταβολή αέριου υδρογόνου:

$$\frac{dS_{gas,h2}}{dt} = -\frac{S_{gas,h2}Q_{gas}}{V_{ad,gas}} + \rho_{T,8} \frac{V_{ad,liq}}{V_{ad,gas}} \quad (3.119)$$

Μεταβολή αέριου μεθανίου:

$$\frac{dS_{gas,ch4}}{dt} = -\frac{S_{gas,ch4}Q_{gas}}{V_{ad,gas}} + \rho_{T,9} \frac{V_{ad,liq}}{V_{ad,gas}} \quad (3.120)$$

Μεταβολή αέριου διοξειδίου του άνθρακα:

$$\frac{dS_{gas,co2}}{dt} = -\frac{S_{gas,co}Q_{gas}}{V_{ad,gas}} + \rho_{T,10} \frac{V_{ad,liq}}{V_{ad,gas}} \quad (3.121)$$

Οι απαραίτητες αλγεβρικές εξισώσεις είναι:

$$p_{gas,h2} = S_{gas,h2} \frac{RT_{ad}}{16} \quad (3.122)$$

$$p_{gas,ch4} = S_{gas,ch4} \frac{RT_{ad}}{64} \quad (3.123)$$

$$p_{gas,co2} = S_{gas,co2} \cdot RT_{ad} \quad (3.124)$$

$$Q_{gas} = \frac{RT_{ad}}{P_{atm} - p_{gas,H2O}} V_{ad,liq} \left( \frac{\rho_{T,8}}{16} + \frac{\rho_{T,9}}{64} + \rho_{T,10} \right) \quad (3.125)$$

Αυτός ο τρόπος υπολογισμού της παροχής αερίων μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά την επίλυση των εξισώσεων. Ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της παροχής προτάθηκε από τους Batstone *et al.* (2002):

$$Q_{gas} = k_p (P_{gas} - P_{atm}) \quad (3.126)$$

όπου

$$P_{gas} = p_{gas,h2} + p_{gas,ch4} + p_{gas,co2} + p_{gas,H2O} \quad (3.126.1)$$

Η εναλλακτική έκφραση υποθέτει μια υπερπίεση στον υπερκείμενο χώρο του χωνευτή. Ως αποτέλεσμα η παροχή υπολογίζεται σε υψηλότερη πίεση συγκριτικά με την πρώτη έκφραση. Για να υπολογίζεται η παροχή αερίων σε ατμοσφαιρική πίεση, η έκφραση ξαναγράφεται ως:

$$Q_{gas} = k_p (P_{gas} - P_{atm}) \frac{P_{gas}}{P_{atm}} \quad (3.127)$$

Ακόμη και με την παραπάνω διόρθωση, οι δύο εκφράσεις δεν παράγουν πανομοιότυπα αποτελέσματα. Ανάλογα τη λειτουργική υπερπίεση, η οποία είναι συνάρτηση της τιμής της παραμέτρου  $k_p$  (που σχετίζεται με την τριβή στην έξοδο του αερίου), η εναλλακτική έκφραση δίνει ελαφρώς μικρότερη παροχή. Αυτό οφείλεται στη διαφορά των ρυθμών μετατροπής από την υγρή στην αέρια φάση ( $\rho_{T,8}$ ,  $\rho_{T,9}$  και  $\rho_{T,10}$ ). Μια σύγκριση των δύο εκφράσεων όταν εφαρμόζεται η ίδια υπερπίεση δείχνει πολύ παρόμοια αποτελέσματα (η απόκλιση είναι της τάξης του  $10^{-5}$ ).

Στα πλαίσια του BSM2 χρησιμοποιείται ο εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της παροχής αερίων, υποθέτοντας την ύπαρξη υπερπίεσης στον υπερκείμενο χώρο.

### **Υλοποίηση ADM1**

Το ADM1 είναι ένα αρκετά «δύσκαμπτο» σύστημα, με χρονικά βήματα που ποικίλλουν από μερικά κλάσματα δευτερολέπτου για το pH και το υδρογόνο  $S_{H2}$ , σε εβδομάδες και μήνες για την περιγραφή διαφόρων κλασμάτων της βιομάζας. Αυτό κάνει την προσομοίωση ενός τέτοιου μοντέλου αρκετά απαιτητική και για να αποφευχθούν χρονοβόρες προσομοιώσεις, απαιτείται δημιουργικότητα στην εφαρμογή του μοντέλου.

Κάποιοι solvers είναι ικανοί να επιλύουν «δύσκαμπτα» συστήματα, για αυτό χαρακτηρίζονται ως «δύσκαμπτοι» solvers. Ένα πρόβλημα όλων των δύσκαμπτων solvers είναι η δυσκολία στη διαχείριση δυναμικών δεδομένων εισόδου, συμπεριλαμβανομένου και του θορύβου. Όσο πιο στοχαστικά ή τυχαία συμπεριφέρεται μια μεταβλητή εισόδου, τόσο πιο προβληματική είναι η προσομοίωση με τη χρήση ενός δύσκαμπτου solver. Ο λόγος για αυτό είναι ότι στους «δύσκαμπτους» solvers γίνονται προβλέψεις για μελλοντικές τιμές των μεταβλητών. Η ύπαρξη στοχαστικών δεδομένων εισόδου οδηγεί σε ανακρίβειες στις προβλέψεις, προκαλώντας καθυστερήσεις στον solver, ο οποίος αδυνατεί να χρησιμοποιήσει μεγαλύτερα βήματα ολοκλήρωσης.

Η προσομοίωση του BSM2, επομένως, έρχεται αντιμέτωπη με το ακόλουθο δίλημμα: Το BSM2, αφού περιλαμβάνει μοντέλα ASM1 και ADM1, είναι ένα αρκετά δύσκαμπτο σύστημα, άρα πρέπει να χρησιμοποιεί έναν δύσκαμπτο solver. Όμως το BSM2, όντας ένα μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης, πρέπει να περιλαμβάνει και να μπορεί να διαχειρίζεται θόρυβο, άρα θα επωφεληθεί από ένα μη-δύσκαμπτο solver.

Η λύση βρίσκεται στην επιλογή της χρήσης διαφορικών – αλγεβρικών εξισώσεων (Differential Algebraic Equations – DAE) αντί της χρήσης αποκλειστικά συνήθων διαφορικών εξισώσεων (Ordinary Differential Equations - ODE). Με τον τρόπο αυτό

μειώνεται η «δυσκαμψία» του συστήματος και επιτρέπει την ενσωμάτωση στοχαστικών στοιχείων.

Στην περίπτωση του ADM1, οι διαφορικές εξισώσεις των pH και  $S_{h2}$  προσομοιώνονται με αριθμητικές μεθόδους. Για την υλοποίηση του BSM2 σε Matlab/ Simulink χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton – Raphson για τον υπολογισμό:

➤ pH

$$S_{H^+,k+1} = S_{H^+,k} - \frac{E(S_{H^+,k})}{dE(S_{H^+,k})/dS_{H^+}|_{S_{H^+,k}}} \quad (3.128)$$

όπου

$S_{H^+,k}$  η τιμή από την προηγούμενη επανάληψη και

$E(S_{H^+,k})$  η τιμή από την αλγεβρική εξίσωση για την οποία ισχύει

$$E(S_{H^+,k}) = S_{cat+,k} + S_{nh4+,k} + S_{H^+,k} - S_{hco3-,k} - \frac{S_{ac-,k}}{64} - \frac{S_{pr-,k}}{112} - \frac{S_{bu-,k}}{160} - \frac{S_{va-,k}}{208} - \frac{K_W}{S_{H^+,k}} - S_{an-,k} \quad (3.128.1)$$

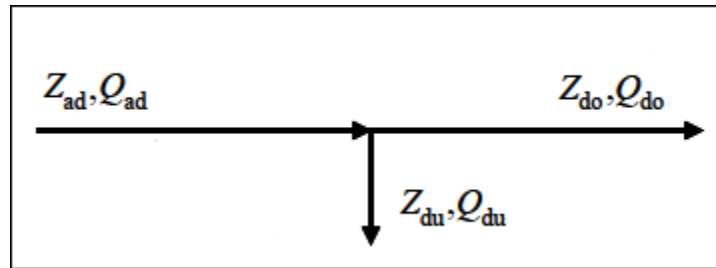
➤  $S_{h2}$

Ομοίως με τον υπολογισμό του  $S_{H^+}$ :

$$E(S_{h2,k}) = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} (S_{h2,i} - S_{h2,k}) + (1 - Y_{su})f_{h2,su}\rho_{5,ad} + (1 - Y_{aa})f_{h2,aa}\rho_{6,ad} + (1 - Y_{fa})0,3\rho_{7,ad} + (1 - Y_{c4})0,15\rho_{8,ad} + (1 - Y_{c4})0,2\rho_{9,ad} + (1 - Y_{pro})0,43\rho_{10,ad} - \rho_{12,ad} - \rho_{T,8} \quad (3.129)$$

### 3.7 Μονάδα Αφυδάτωσης

Για λόγους απλότητας η μονάδα θεωρείται ότι η μονάδα αφυδάτωσης έχει ιδανική συμπεριφορά και μηδενικό όγκο. Η μονάδα αφυδάτωσης «στραγγίζει» τη χωνεμένη ιλύ. Τα στραγγίδια επιστρέφουν στην είσοδο της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Το μοντέλο της μονάδας αφυδάτωσης είναι παρόμοιο με το μοντέλο της μονάδας πάχυνσης (Σχήμα 3.7.1):



Σχήμα 3.7.1: Συγκεντρώσεις και Παροχές μονάδας Αφυδάτωσης (Alex et al., 2008)

Η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στην είσοδο της μονάδας αφυδάτωσης ισούται με:

$$TSS_{ad} = 0.75(X_{S,ad} + X_{P,ad} + X_{I,ad} + X_{B,H,ad} + X_{B,A,ad}) \quad (3.130)$$

όπου  $X_{S,ad}$ ,  $X_{P,ad}$ ,  $X_{I,ad}$ ,  $X_{B,H,ad}$  και  $X_{B,A,ad}$  είναι μεταβλητές από τη διασύνδεση ADM/ASM.

Το ποσοστό των αιωρούμενων στερεών στην έξοδο της αφυδάτωσης είναι  $p_{dewat}$  (= 28%). Το ποσοστό των αιωρούμενων στερεών που απομακρύνεται είναι  $TSS_{rem}$  (= 98%). Ο συντελεστής αφυδάτωσης ( $f_{dewat}$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$f_{dewat} = p_{dewat} \frac{10000}{TSS_{ad}} \quad (3.131)$$

Έστω

$$fq_{du} = \frac{TSS_{rem}}{100f_{dewat}} \quad (3.132)$$

Τότε ο συντελεστής αραιώσης ( $f_{thin}$ ) ισούται με

$$f_{thin} = \frac{1 - TSS_{rem}/100}{1 - fq_{du}} \quad (3.133)$$



Αν ο συντελεστής αφυδάτωσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας, τότε οι μεταβλητές στην έξοδο υπολογίζονται ως εξής:

- Για οποιοδήποτε σωματιδιακό κλάσμα:  $Z_{du} = Z_{ad}f_{dewat}$
- Για οποιοδήποτε διαλυτό κλάσμα και τη θερμοκρασία:  $Z_{du} = Z_{ad}$
- Παροχή εξόδου:  $Q_{du} = Q_{ad}f_{q_{du}}$

Οι μεταβλητές στα στραγγίδια υπολογίζονται ως εξής:

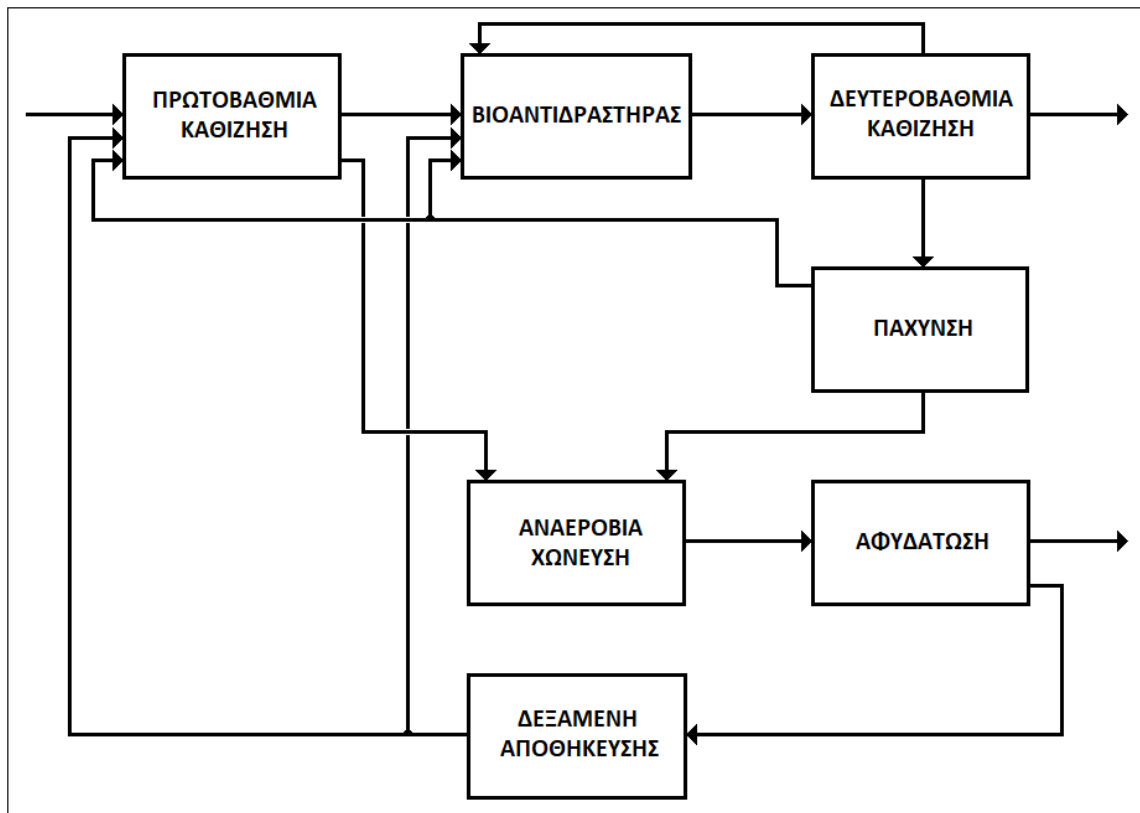
- Για οποιοδήποτε σωματιδιακό κλάσμα:  $Z_{do} = Z_{ad}f_{thin}$
- Για οποιοδήποτε διαλυτό κλάσμα και τη θερμοκρασία:  $Z_{do} = Z_{ad}$
- Παροχή εξόδου:  $Q_{do} = Q_{ad}(1 - f_{q_{du}})$

Αν ο συντελεστής αφυδάτωσης είναι μικρότερος της μονάδας, τότε πρόκειται για λάθος.

## 4 Αποτελέσματα

### 4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική, η λειτουργία μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων προσομοιώνεται με το σύστημα Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2), το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η διάταξη των βασικών μονάδων του υπενθυμίζεται συνοπτικά στο Σχήμα 4.1.1:



Σχήμα 4.1.1: Διάταξη Μονάδων BSM2

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται σε δυναμικές συνθήκες και η κάθε προσομοίωση διαρκεί 609 ημέρες:

- Οι πρώτες 245 ημέρες εξασφαλίζουν μια περίοδο σταθεροποίησης σε δυναμικές συνθήκες και
- Οι επόμενες 364 ημέρες αποτελούν τον ένα χρόνο για τον οποίο γίνεται η αξιολόγηση της επίδοσης της εγκατάστασης.

Πριν την προσομοίωση σε δυναμικές συνθήκες, προηγείται μια ακόμη περίοδος σταθεροποίησης με διάρκεια 500 ημέρες, σε σταθερές συνθήκες αυτή τη φορά. Στον Πίνακα 4.1.1 αναγράφονται οι αρχικές τιμές που δόθηκαν για την προσομοίωση σε σταθερές συνθήκες:

Πίνακας 4.1.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά ανεπεξέργαστων λυμάτων  
(Alex et al., 2008)

Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
$S_{I,stab}$	27,2262	$g\ COD/m^3$
$S_{S,stab}$	58,1762	$g\ COD/m^3$
$X_{I,stab}$	92,4990	$g\ COD/m^3$
$X_{S,stab}$	363,9435	$g\ COD/m^3$
$X_{B,H,stab}$	50,6833	$g\ COD/m^3$
$X_{B,A,stab}$	0,0000	$g\ COD/m^3$
$X_{P,stab}$	0,0000	$g\ COD/m^3$
$S_{O,stab}$	0,0000	$g\ (-COD)/m^3$
$S_{NO,stab}$	0,0000	$g\ N/m^3$
$S_{NH,stab}$	23,8595	$g\ N/m^3$
$S_{ND,stab}$	5,6516	$g\ N/m^3$
$X_{ND,stab}$	16,1298	$g\ N/m^3$
$S_{ALK,stab}$	7,0000	$mol\ HCO_3/m^3$
$TSS_{stab}$	380,3443	$g/m^3$
$Q_{i,stab}$	20648,3612	$m^3/d$
$T_{stab}$	14,8581	$^{\circ}C$

## 4.2 Σενάρια προσομοίωσης

Τα σενάρια που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους έχουν ως σκοπό να εξετάσουν την απόκριση της εγκατάστασης σε μεταβολές ορισμένων λειτουργικών παραμέτρων της, και διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Σειρά Σεναρίων Α: Έλεγχος διαλυμένου οξυγόνου στο βιοαντιδραστήρα
- Σειρά Σεναρίων Β: Έλεγχος αποτελεσματικότητας της πρωτοβάθμιας καθίζησης
- Σειρά Σεναρίων Γ: Έλεγχος αποτελεσματικότητας των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης
- Σειρά Σεναρίων Δ: Έλεγχος αποτελεσματικότητας της αναερόβιας χώνευσης
- Σειρά Σεναρίων Ε: Προσθήκη μονάδας αναερόβιας υδρόλυσης για επεξεργασία της πρωτοβάθμιας ιλύος και στη συνέχεια μονάδας πάχυνσης πριν την αναερόβια χώνευση

Οι μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων γίνονται σε σχέση με ένα σενάριο αναφοράς το οποίο δεν παρουσιάζεται ξεχωριστά, αλλά σε κάθε σειρά σεναρίων επισημαίνεται η αρχική τιμή της λειτουργικής παραμέτρου που εξετάζεται, και παρουσιάζεται η αρχική απόκριση της εγκατάστασης κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά της εκροής, καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης της απόδοσης της εγκατάστασης του BSM2, τα οποία αναλύθηκαν στις υποενότητες 2.4.2 και 2.5.2, και παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

### 1. Δείκτης Ποιότητας Εκροής (EQI)

Στον υπολογισμό του EQI συμμετέχουν τα φορτία εξόδου των συστατικών που έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ποιότητα του αποδέκτη, με συντελεστές βαρύτητας που φαίνονται στη σχέση (2.10):

$$EQI = \frac{1}{t_{obs} \cdot 1000} \int_{t=245 \text{ days}}^{t=609 \text{ days}} \left( 2 \cdot TSS_e(t) + COD_e(t) + 2BOD_e(t) + 30S_{NKj,e}(t) + 10S_{NO,e}(t) \right) Q_e(t) \cdot dt$$

## 2. Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους (OCI)

Σύμφωνα με τη σχέση (2.11):

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

στον υπολογισμό του OCI συμμετέχουν:

- η ενέργεια αερισμού ( $AE$ ),
- η ενέργεια άντλησης ( $PE$ ),
- η ενέργεια ανάμιξης ( $ME$ ),
- η ενέργεια θέρμανσης ( $HE_{net}$ ),
- η παραγόμενη ιλύς προς διάθεση ( $SP$ ),
- οι δόσεις εξωτερικού άνθρακα ( $EC$ ) και
- η παραγωγή μεθανίου ( $MET_{prod}$ ), η οποία είναι αρνητικά προσημασμένη αφού πρόκειται για παραγωγή ενέργειας.

## 3. Παραβιάσεις Ορίων Εκροής

Τα όρια που δεν πρέπει να υπερβαίνονται στην έξοδο της εγκατάστασης παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.5.2:

Πίνακας 2.5.2: Όρια στην έξοδο της εγκατάστασης (Alex et al., 2008)

Μεταβλητή	Όριο
$N_{tot}$	18 g N/m <sup>3</sup>
$COD_{tot}$	100 g COD/m <sup>3</sup>
$S_{NH}$	4 g N/m <sup>3</sup>
$TSS$	30 g SS/m <sup>3</sup>
$BOD_5$	10 g BOD/m <sup>3</sup>

Κατά περίπτωση μπορεί να συμπεριληφθούν κι άλλα αποτελέσματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα η παραγόμενη ιλύς, ή η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα αεριζόμενα διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα.

### 4.3 Σειρά σεναρίων Α: Έλεγχος διαλυμένου οξυγόνου στο βιολογικό αντιδραστήρα

#### 4.3.1 Περιγραφή προσομοιώσεων

Όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 2.5.1, η λειτουργία του βιολογικού αντιδραστήρα προσομοιώνεται με μια δεξαμενή πέντε διαμερισμάτων· στα διαμερίσματα 1 και 2 επικρατούν ανοξικές συνθήκες και στα διαμερίσματα 3, 4 και 5 αερόβιες. Το BSM2 δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει την επιθυμητή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου ( $S_O$ ) στο 4<sup>ο</sup> διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα (2<sup>ο</sup> αεριζόμενο). Η ύπαρξη αυτής της περίσσειας  $S_O$  εξασφαλίζει ότι στο προηγούμενο διαμέρισμα (το 1<sup>ο</sup> αεριζόμενο) υπήρχε επαρκής συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου για τις αερόβιες διεργασίες. Στο σενάριο αναφοράς η τιμή αυτή είναι η προτεινόμενη τιμή ασφαλείας,  $2 \text{ g } (-COD)/m^3$ . Άλλες τιμές που εξετάστηκαν είναι:

- ❖ Σενάριο A1:  $S_{O,4} = 2,5 \text{ g } (-COD)/m^3$
- ❖ Σενάριο A2:  $S_{O,4} = 1,5 \text{ g } (-COD)/m^3$
- ❖ Σενάριο A3:  $S_{O,4} = 1,0 \text{ g } (-COD)/m^3$
- ❖ Σενάριο A4:  $S_{O,4} = 0,5 \text{ g } (-COD)/m^3$

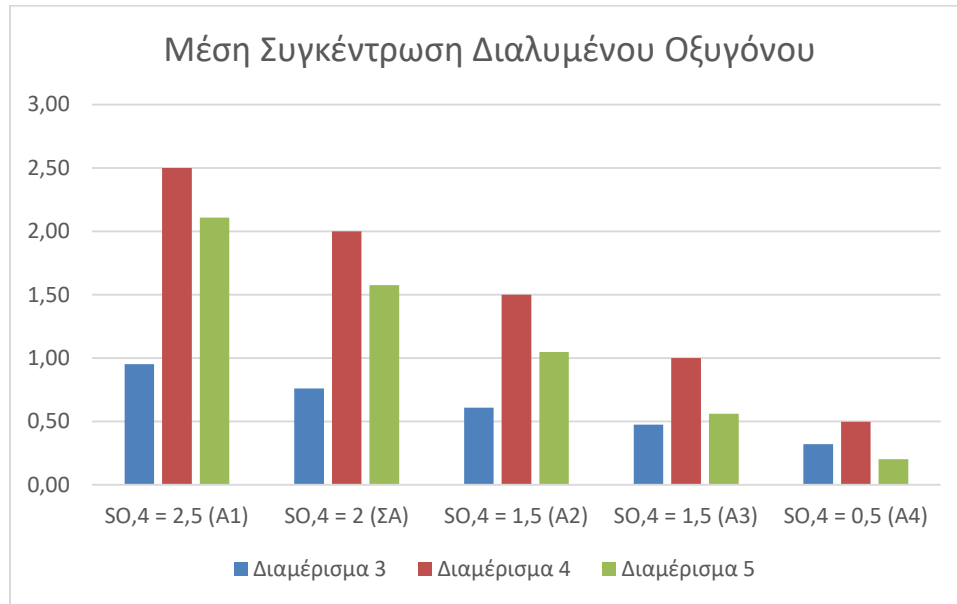
Πέρα από τη συγκέντρωση  $S_{O,4}$ , ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την αναλογία των συντελεστών μεταφοράς οξυγόνου  $K_L a$  μεταξύ των διαμερισμάτων 3, 4 και 5, επηρεάζοντας έτσι τις συγκεντρώσεις οξυγόνου στα αντίστοιχα διαμερίσματα. Στο σενάριο αναφοράς ισχύει  $K_L a_3 = K_L a_4$  και  $K_L a_5 = 0,5 \cdot K_L a_4$ , και ο συντελεστής εσωτερικής ανακυκλοφορίας από το 5<sup>ο</sup> στο 1<sup>ο</sup> διαμέρισμα ισούται με  $Q_{int} = 3$ . Εξετάστηκαν ακόμη τα ακόλουθα σενάρια:

- ❖ Σενάριο A5:  $K_L a_3 = 1,2 \cdot K_L a_4$
- ❖ Σενάριο A6:  $K_L a_3 = 1,2 \cdot K_L a_4$  με ταυτόχρονη αύξηση του  $Q_{int}$  σε 3,5

### 4.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

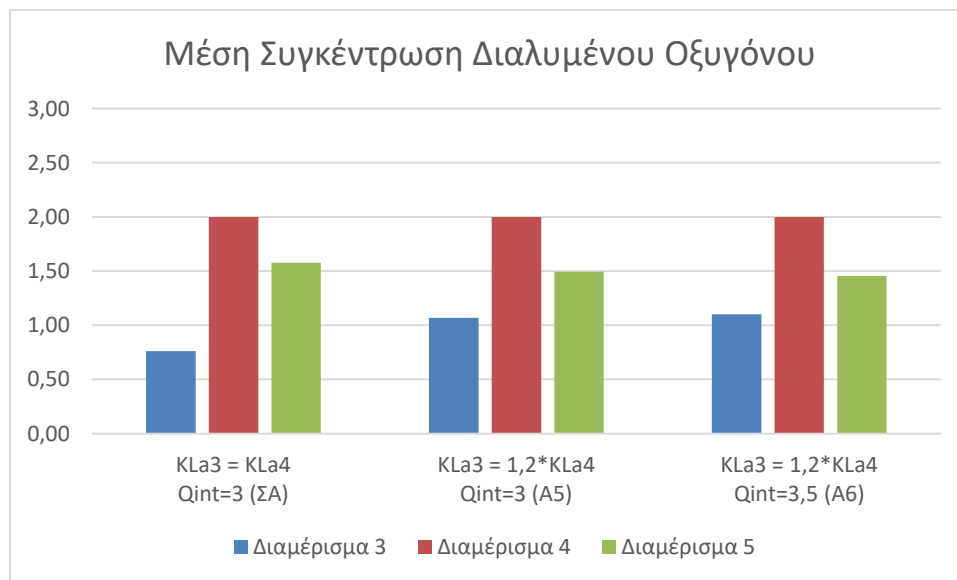
Όσα περιγράφηκαν προηγουμένως, γίνονται καλύτερα κατανοητά μέσω των σχημάτων 4.3.1 και 4.3.2, στα οποία παρουσιάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις οξυγόνου  $S_0$  [ $g(-COD)/m^3$ ] στα αεριζόμενα διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα για κάθε σενάριο.

#### ❖ Σενάρια A1 – A4



Σχήμα 4.3.1: Σενάριο αναφοράς και σενάρια A1, A2, A3 και A4

#### ❖ Σενάρια A5 & A6



Σχήμα 4.3.2: Σενάριο αναφοράς και σενάρια A5 και A6

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο 4<sup>ο</sup> διαμέρισμα είναι αυτή που επιλέχθηκε κάθε φορά από το χρήστη. Αύξηση της περιόσειας οξυγόνου στο 3<sup>ο</sup> διαμέρισμα μπορεί να επιτευχθεί είτε αυξάνοντας τη συγκέντρωση  $S_0$  στο 4<sup>ο</sup> διαμέρισμα (σενάριο A1) είτε αυξάνοντας την αναλογία  $K_L a_3 / K_L a_4$  (σενάρια A5 και A6). Ωστόσο στο σενάριο A1 υπάρχει και αυξημένη περίσσεια οξυγόνου στο 5<sup>ο</sup> διαμέρισμα, η οποία μένει ανεκμετάλλευτη. Από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα, η πρακτική των σεναρίων A5 και A6 φαίνεται πιο αποτελεσματική· επιτυγχάνεται αύξηση της περιόσειας οξυγόνου στο 3<sup>ο</sup> διαμέρισμα, με ταυτόχρονη μείωση στο 5<sup>ο</sup>. Οι αυξομειώσεις αυτές δε φαίνεται να είναι περισσότερο ή λιγότερο έντονες με την αύξηση της παροχής ανακυκλοφορίας στο σενάριο A6.

Αν πάλι είναι επιθυμητή η μείωση της περιόσειας οξυγόνου στο 3<sup>ο</sup> διαμέρισμα, αυτό επιτυγχάνεται μειώνοντας τη συγκέντρωση  $S_0$  στο 4<sup>ο</sup> διαμέρισμα (σενάρια A2, A3 και A4). Αντίστοιχη μείωση παρατηρείται και στην περίσσεια οξυγόνου του διαμερίσματος 5.

#### Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εκροής

Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υγρού στην έξοδο της εγκατάστασης παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα (Πίνακας 4.3.1).

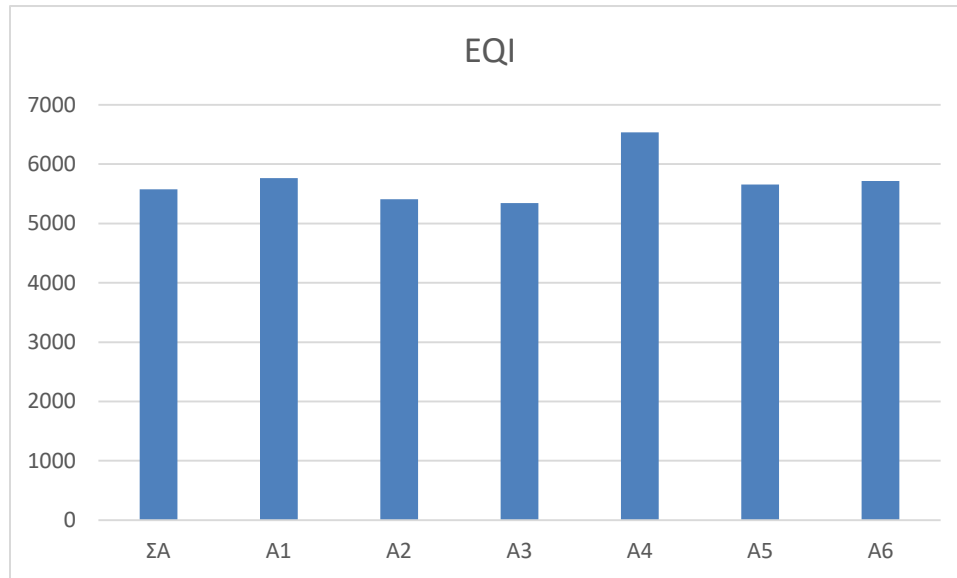


Πίνακας 4.3.1: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροή της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων A

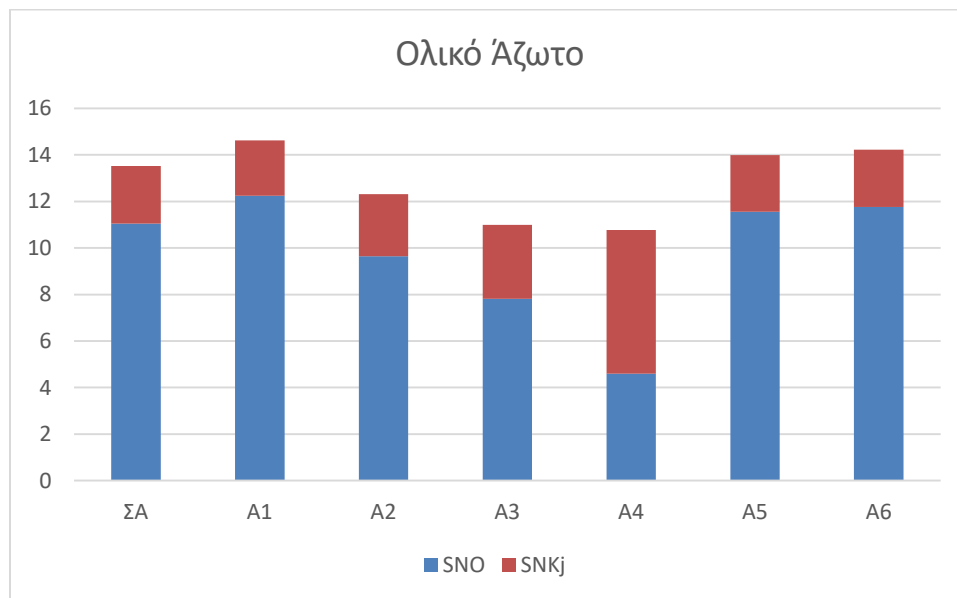
Μεταβλητές	Μονάδες Μέτρησης	Σενάριο αναφοράς	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Παροχή $Q$	$m^3/d$	20661,02	20661,02	20661,03	20661,03	20661,04	20661,02	20661,02
Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη $S_I$	$g\ COD/m^3$	28,06	28,06	28,06	28,06	28,06	28,06	28,06
Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $S_S$	$g\ COD/m^3$	0,73	0,72	0,75	0,79	0,94	0,72	0,73
Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη $X_I$	$g\ COD/m^3$	5,91	5,91	5,91	5,91	5,92	5,91	5,91
Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $X_S$	$g\ COD/m^3$	0,33	0,33	0,34	0,35	0,38	0,33	0,33
Ετεροτροφική βιομάζα $X_{B,H}$	$g\ COD/m^3$	9,89	9,89	9,89	9,89	9,89	9,89	9,89
Αυτοτροφική βιομάζα $X_{B,A}$	$g\ COD/m^3$	0,69	0,69	0,69	0,68	0,62	0,69	0,69
Σωματιδιακά μη βιοδιασπάζσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας $X_P$	$g\ COD/m^3$	3,40	3,40	3,40	3,40	3,39	3,40	3,40
Διαλυμένο οξυγόνο $S_O$	$g - COD/m^3$	1,58	2,12	1,04	0,55	0,20	1,51	1,46
Διαλυμένο νιτρικό άζωτο $S_{NO}$	$g\ N/m^3$	11,05	12,25	9,64	7,82	4,60	11,56	11,76
Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο $S_{NH}$ ( $< 4\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	0,47	0,38	0,66	1,15	4,11	0,43	0,46
Διαλυμένο οργανικό άζωτο $S_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,59	0,58	0,59	0,60	0,65	0,58	0,59
Σωματιδιακό οργανικό άζωτο $X_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Αλατότητα $S_{ALK}$	$mol\ HCO_3^-/m^3$	4,46	4,36	4,57	4,74	5,18	4,42	4,40
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά $TSS$ ( $< 30\ g\ SS/m^3$ )	$g\ SS/m^3$	15,17	15,17	15,17	15,17	15,15	15,17	15,17
Θερμοκρασία $T$	$^{\circ}C$	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86
Άζωτο Kjeldahl $S_{NKj}$	$g\ N/m^3$	2,48	2,39	2,68	3,18	6,17	2,44	2,47
Ολικό Άζωτο $N$ ( $< 18\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	13,53	14,63	12,32	11,00	10,77	14,00	14,23
$COD$ ( $< 100\ g\ COD/m^3$ )	$g\ COD/m^3$	49,02	49,01	49,04	49,07	49,20	49,01	49,02
$BOD5$ ( $< 10\ g\ BOD5/m^3$ )	$g\ BOD5/m^3$	2,79	2,79	2,80	2,81	2,84	2,79	2,79

### Δείκτης Ποιότητας Εκροής (EQI)

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.3.1 προκύπτει ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των TSS, COD και BOD παραμένουν σταθερές. Επομένως οι μεταβολές του EQI (Σχήμα 4.3.3) οφείλονται στις μεταβολές των επιμέρους συστατικών του αζώτου (Σχήμα 4.3.4).



Σχήμα 4.3.3: Δείκτες Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων Α

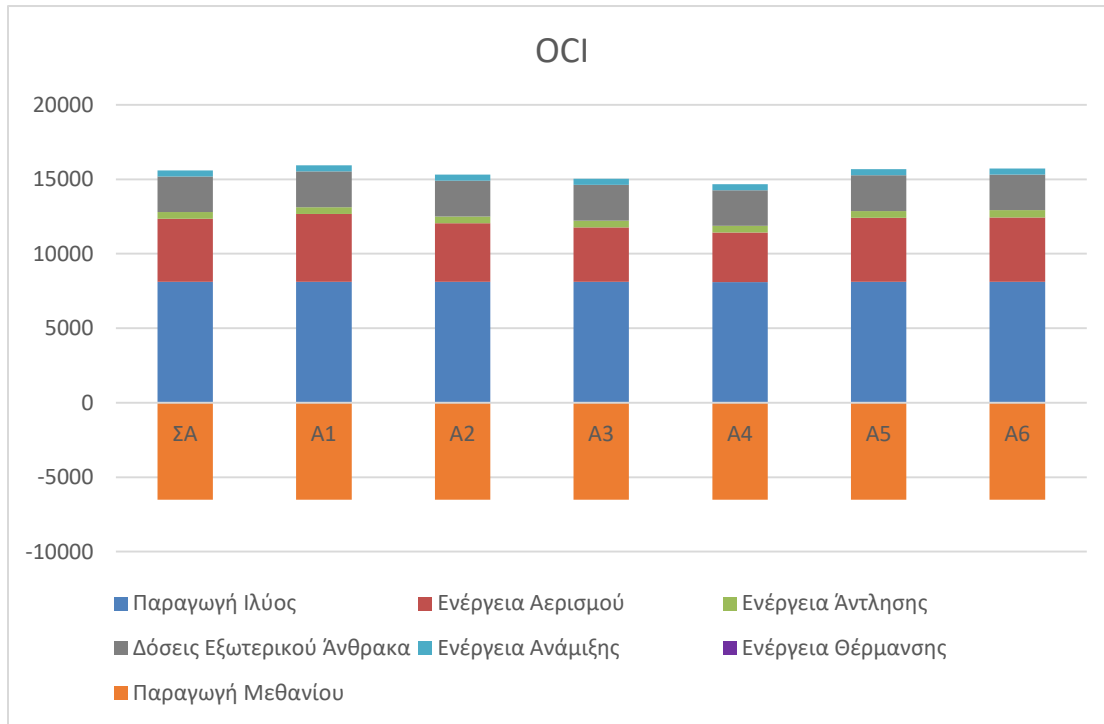


Σχήμα 4.3.4: Μέση Συγκέντρωση Ολικού Αζώτου Εκροής

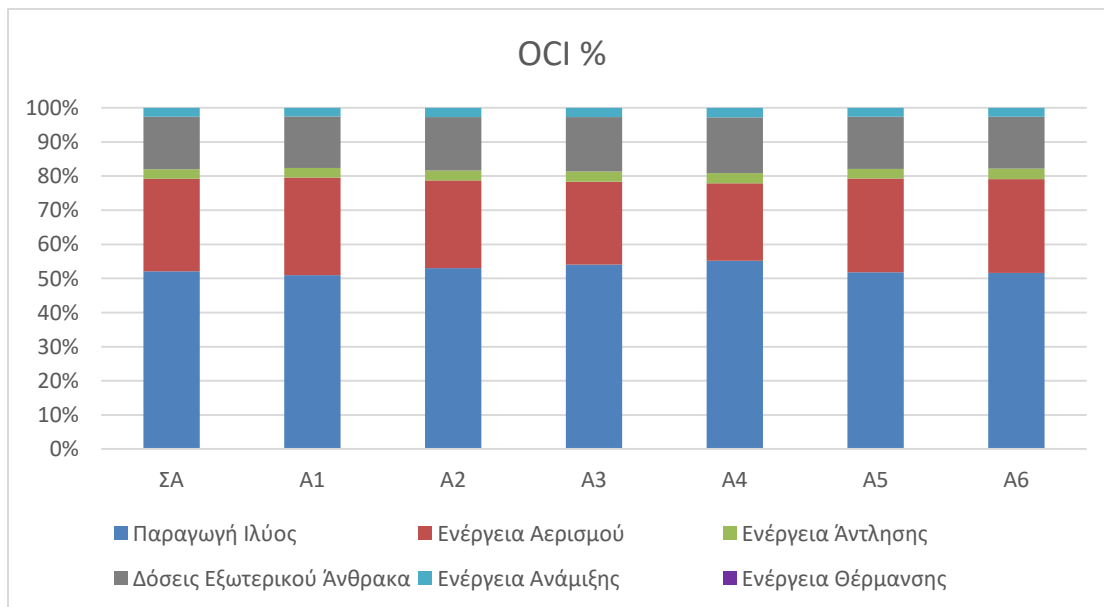
Ο Δείκτης Ποιότητας Εκροής του σεναρίου A4 είναι ο μεγαλύτερος παρόλο που έχει το λιγότερο μέσο ολικό άζωτο στην εκροή, αφού ο συντελεστής βαρύτητας του  $S_{NKj}$  για τον υπολογισμό του EQI είναι τριπλάσιος του συντελεστή του  $S_{NO}$ .

### Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους (OCI)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα επιμέρους κόστη για τη λειτουργία της εγκατάστασης, σε απόλυτες τιμές και ως επιμέρους ποσοστά (Σχήματα 4.3.5 και 4.3.6 αντίστοιχα).



Σχήμα 4.3.5: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων A



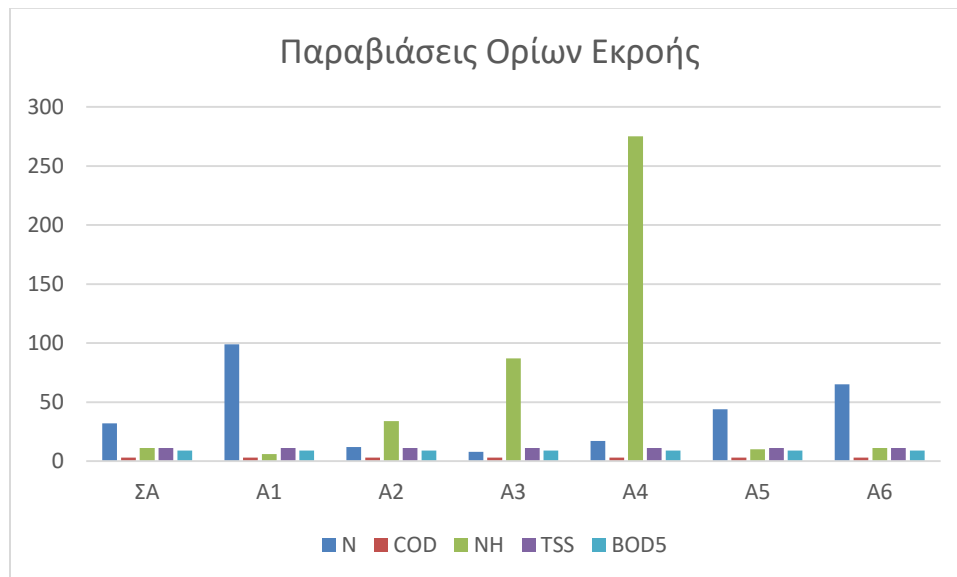
Σχήμα 4.3.6: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων A

Όπως ήταν αναμενόμενο, για να εξασφαλισθεί μεγαλύτερη (/ μικρότερη) περίσσεια οξυγόνου στα αεριζόμενα διαμερίσματα, καταναλώνεται περισσότερη (/ λιγότερη) ενέργεια κατά τον αερισμό. Δεν παρατηρείται κάποια επίδραση στα υπόλοιπα κόστη της εγκατάστασης, με εξαίρεση τη μικρή αύξηση του κόστους άντλησης στο σενάριο A6, κατά το οποίο αυξήθηκε η παροχή ανακυκλοφορίας.

Ως αποτέλεσμα, το περισσότερο κοστοβόρο σενάριο είναι το A6, ενώ το λιγότερο το A4 (ακολουθούμενο από τα A3 και A2).

### Παραβιάσεις των ορίων

Η μείωση του συνολικού κόστους στο A4, ωστόσο, φαίνεται να γίνεται σε βάρος του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο, όπως φαίνεται από τον αριθμό των παραβάσεων των ορίων, στο σχήμα 4.3.7 που ακολουθεί. Συγκεκριμένα στο σενάριο A4, το όριο των  $4 \text{ g/m}^3$  παραβιάζεται 275 φορές, αριθμός που αντιστοιχεί στο 40% του χρόνου αξιολόγησης. Στα σενάρια A3 και A2 οι αντίστοιχες παραβιάσεις είναι αυξημένες σε αριθμό μεν, εντός των αποδεκτών ορίων δε (<95% του χρόνου).



Σχήμα 4.3.7: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων A

Η μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου στα αεριζόμενα διαμερίσματα φαίνεται να εμποδίζει τη νιτροποίηση, και το αμμωνιακό άζωτο που η εγκατάσταση αδυνατεί να μετατρέψει και να απομακρύνει ως αέριο άζωτο, φεύγει με την εκροή της.

Αντίθετα στα σενάρια A1, A5 και A6, η διεργασία της νιτροποίησης δεν εμποδίζεται και το αμμωνιακό άζωτο ( $S_{NH} \downarrow$ ) μετατρέπεται σε νιτρικό άζωτο ( $S_{NO} \uparrow$ ). Χωρίς όμως να υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της διαθέσιμης οργανικής τροφής για να πραγματοποιηθεί η διεργασία της απονιτροποίησης, όλο αυτό το παραπάνω  $S_{NO}$  φεύγει με την εκροή.

Για αυτό παρατηρούνται υπερβάσεις του ορίου για το ολικό άζωτο  $N$  πιο συχνά (χωρίς ωστόσο να ξεπερνούν το 95% του χρόνου αξιολόγησης).

Ανάμεσα στα παραπάνω σενάρια ξεχωρίζει το A2, το οποίο συνδυάζει μείωση των EQI και OCI, και παράλληλα διατηρεί χαμηλά τον αριθμό των παραβιάσεων.

#### 4.4 Σειρά σεναρίων Β: Έλεγχος αποτελεσματικότητας της πρωτοβάθμιας καθίζησης

##### 4.4.1 Περιγραφή προσομοιώσεων

Κατά την προσομοίωση της λειτουργίας της πρωτοβάθμιας καθίζησης ο χρήστης μπορεί να επηρεάσει την απόδοση απομάκρυνσης της μονάδας, μεταβάλλοντας την τιμή του διορθωτικού συντελεστή  $f_{corr}$  (σχέση (3.4)). Στο σενάριο αναφοράς η τιμή αυτή είναι 0,65. Εξετάσθηκαν ακόμη οι ακόλουθες τιμές:

- ❖ Σενάριο Β1:  $f_{corr} = 0,55$
- ❖ Σενάριο Β2:  $f_{corr} = 0,75$
- ❖ Σενάριο Β3:  $f_{corr} = 0,90$

##### 4.4.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

###### Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εκροής

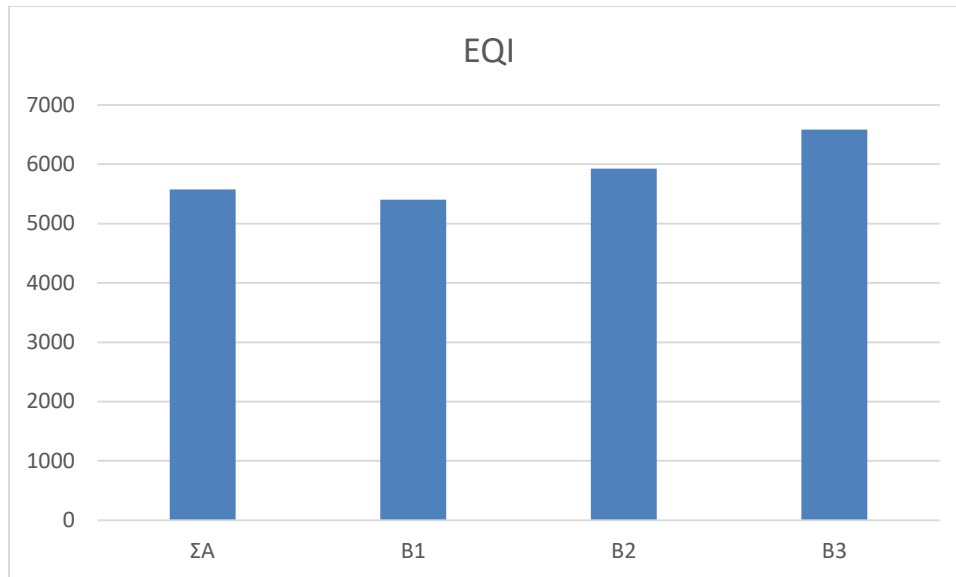
Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υγρού στην έξοδο της εγκατάστασης παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα (Πίνακας 4.4.2.1).

Πίνακας 4.4.1: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροή της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων B

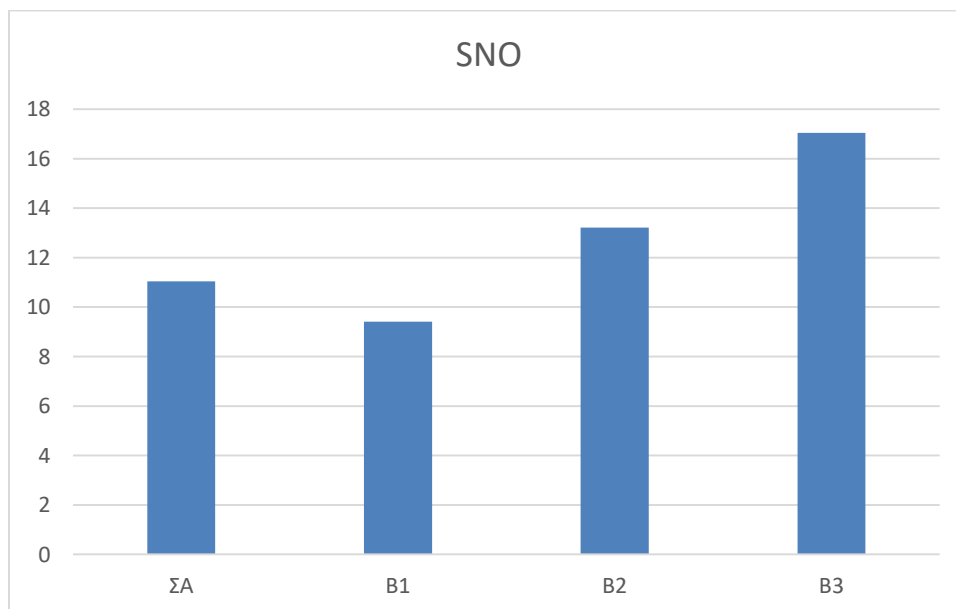
Μεταβλητές	Μονάδες Μέτρησης	Σενάριο αναφοράς	B1	B2	B3
Παροχή $Q$	$m^3/d$	20661,02	20661,02	20661,05	20661,09
Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη $S_I$	$g\ COD/m^3$	28,06	27,97	28,16	28,31
Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $S_S$	$g\ COD/m^3$	0,73	0,75	0,71	0,69
Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη $X_I$	$g\ COD/m^3$	5,91	6,53	5,44	4,66
Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $X_S$	$g\ COD/m^3$	0,33	0,35	0,32	0,31
Ετεροτροφική βιομάζα $X_{B,H}$	$g\ COD/m^3$	9,89	10,54	9,58	9,15
Αυτοτροφική βιομάζα $X_{B,A}$	$g\ COD/m^3$	0,69	0,67	0,74	0,84
Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας $X_P$	$g\ COD/m^3$	3,40	3,61	3,28	3,10
Διαλυμένο οξυγόνο $S_O$	$g - COD/m^3$	1,58	1,45	1,71	1,91
Διαλυμένο νιτρικό άζωτο $S_{NO}$	$g\ N/m^3$	11,05	9,42	13,22	17,05
Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο $S_{NH}$ ( $< 4\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	0,47	0,50	0,46	0,44
Διαλυμένο οργανικό άζωτο $S_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,59	0,60	0,58	0,57
Σωματιδιακό οργανικό άζωτο $X_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,02	0,02	0,02	0,02
Αλατότητα $S_{ALK}$	$mol\ HCO_3^-/m^3$	4,46	4,57	4,30	4,03
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά $TSS$ ( $< 30\ g\ SS/m^3$ )	$g\ SS/m^3$	15,17	16,27	14,52	13,54
Θερμοκρασία $T$	$^{\circ}C$	14,86	14,86	14,86	14,86
Άζωτο Kjeldahl $S_{NKJ}$	$g\ N/m^3$	2,48	2,62	2,40	2,29
Ολικό Άζωτο $N$ ( $< 18\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	13,53	12,04	15,62	19,34
$COD$ ( $< 100\ g\ COD/m^3$ )	$g\ COD/m^3$	49,02	50,41	48,22	47,05
$BOD5$ ( $< 10\ g\ BOD5/m^3$ )	$g\ BOD5/m^3$	2,79	2,94	2,72	2,64

### Δείκτης Ποιότητας Εκροής (EQI)

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.4.1 προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής του  $f_{corr}$  προκαλεί αύξηση της μέσης συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου  $S_{NO}$ , για αυτό και η μεταβολή του Δείκτη Ποιότητας Εκροής ακολουθεί τη μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης  $S_{NO}$  (Σχήματα 4.4.1 και 4.4.2).



Σχήμα 4.4.1: Δείκτες Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων Β

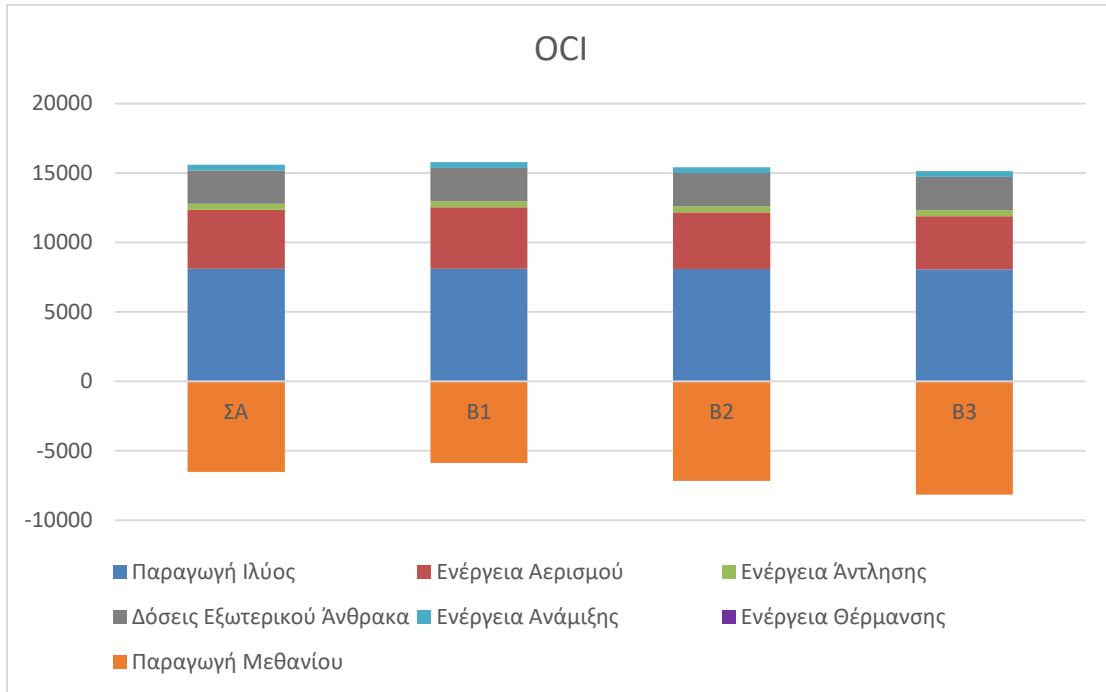


Σχήμα 4.4.2: Μέση Συγκέντρωση Νιτρικού Αζώτου Εκροής

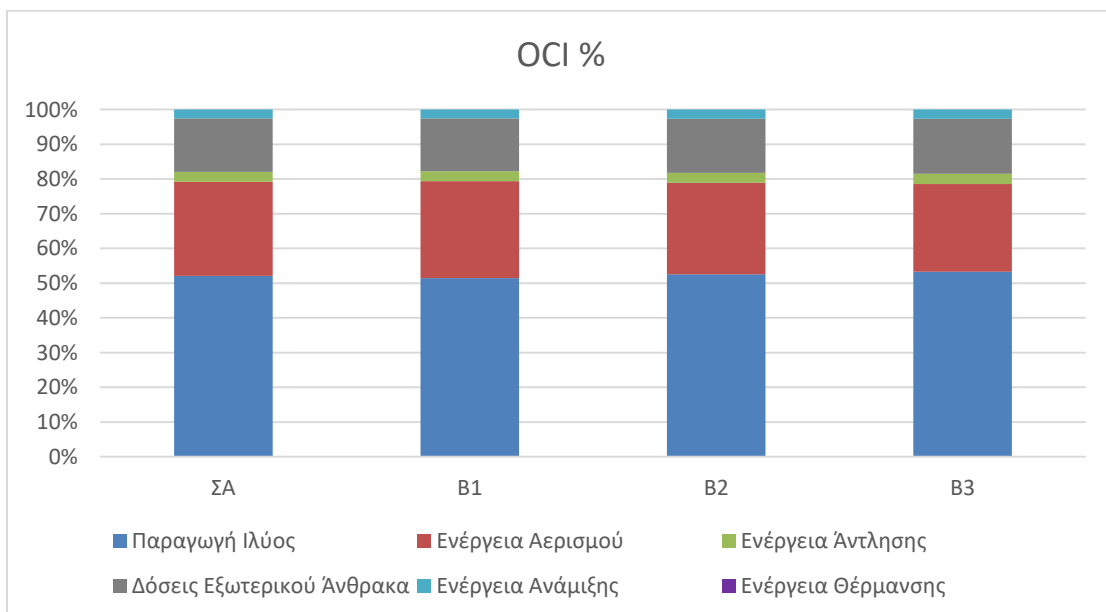


### Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους (OCI)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα επιμέρους κόστη για τη λειτουργία της εγκατάστασης, σε απόλυτες τιμές και ως ποσοστά (Σχήματα 4.4.3 και 4.4.4 αντίστοιχα).



Σχήμα 4.4.3: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων Β



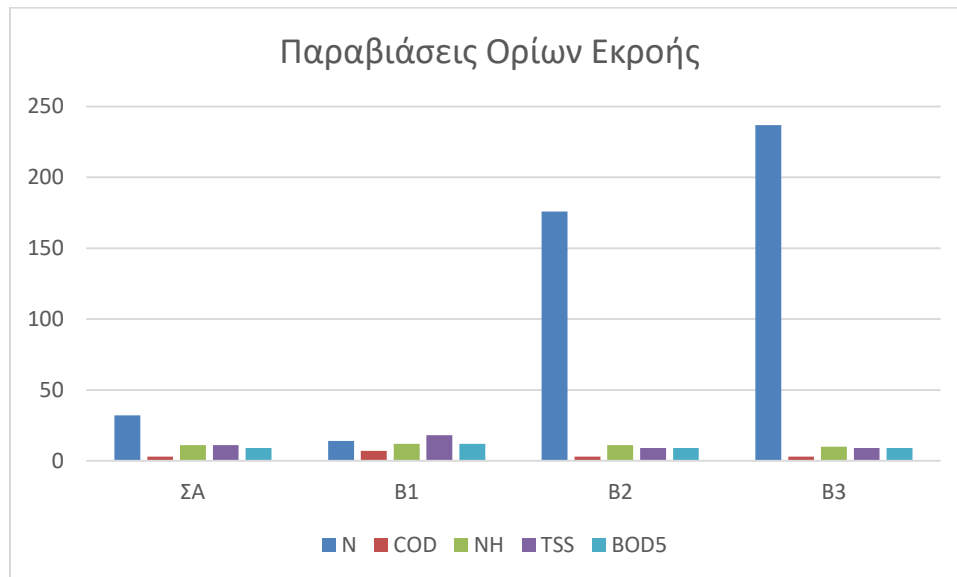
Σχήμα 4.4.4: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων Β

Ουσιαστικά στο σενάριο B1 θεωρήθηκε μικρότερη παγίδευση στερεών στην πρωτοβάθμια ιλύ, άρα περισσότερα στερεά στη βιολογική βαθμίδα. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του απαιτούμενου αερισμού στον βιολογικό αντιδραστήρα έτσι ώστε να γίνει η κατανάλωση του οργανικού φορτίου. Ως αποτέλεσμα παρατηρείται αύξηση του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης, η οποία οφείλεται τόσο στην αύξηση του αερισμού όσο και από την μείωση του παραγόμενου βιοαερίου.

Αντίστοιχα στα σενάρια B2 και B3, περισσότερα στερεά στην πρωτοβάθμια ιλύ προκάλεσαν αύξηση του παραγόμενου μεθανίου, και λιγότερα στερεά στον βιοαντιδραστήρα σημαίνουν μειωμένες απαιτήσεις σε οξυγόνο.

### Παραβιάσεις των ορίων

Το περιβαλλοντικό κόστος των φαινομενικά επικερδών σεναρίων B2 και B3 παρατηρείται στο Σχήμα 4.4.5, και συγκεκριμένα στις παραβιάσεις του ορίου για το ολικό άζωτο, οι οποίες παρατηρούνται σε ποσοστά 12% και 77% του χρόνου αξιολόγησης αντίστοιχα:



Σχήμα 4.4.5: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων Β

Με την αύξηση της απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης, περισσότερο φορτίο διέρχεται μόνο από τα έργα της ιλύος, αυξάνεται δηλαδή ο οργανικός άνθρακας που παρακάμπτει τη βιολογική βαθμίδα. Υπάρχει επομένως λιγότερος οργανικός άνθρακας διαθέσιμος για τη διεργασία της απονιτροποίησης, η οποία συνεισφέρει στην απομάκρυνση του αζώτου, για αυτό παραβιάζεται συχνότερα το όριο του αζώτου.

## 4.5 Σειρά σεναρίων Γ: Έλεγχος αποτελεσματικότητας των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης

### 4.5.1 Περιγραφή προσομοιώσεων

Για την προσομοίωση της λειτουργίας των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης, ο χρήστης επιλέγει το επιθυμητό ποσοστό απομάκρυνσης στερεών· όχι απαραίτητα κοινό για τις δύο μονάδες. Στο σενάριο αναφοράς το ποσοστό αυτό είναι 98%. Εξετάσθηκαν ακόμη τα ακόλουθα ποσοστά:

- ❖ Σενάριο Γ1: 95%
- ❖ Σενάριο Γ2: 90%

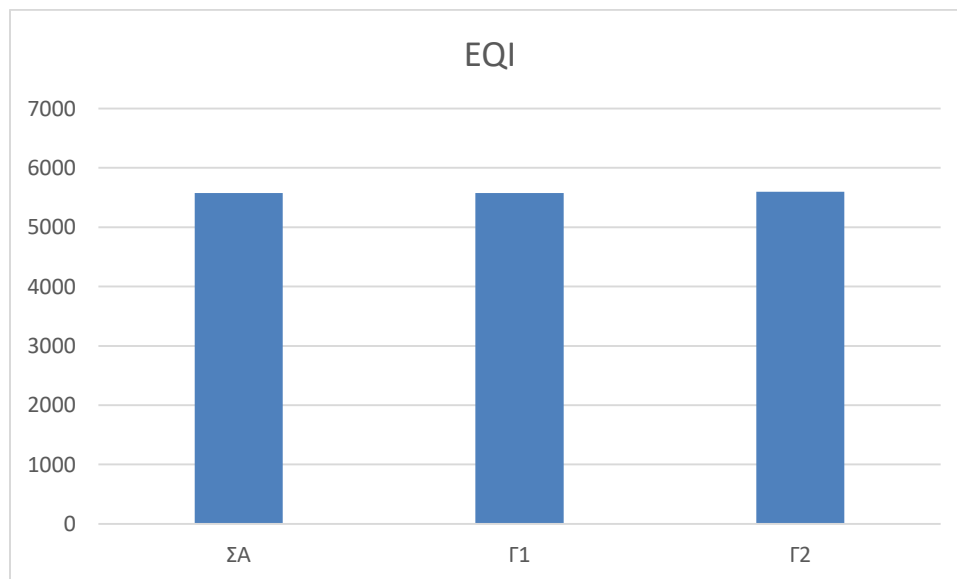
### 4.5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

#### Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εκροής

Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υγρού στην έξοδο της εγκατάστασης παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα (Πίνακας 4.5.1).

#### Δείκτης Ποιότητας Εκροής (EQI)

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.5.1 προκύπτει ότι μείωση του ποσοστού απομάκρυνσης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης, προκαλεί μια μικρή αύξηση στις μέσες συγκεντρώσεις των TSS, COD και  $S_{NKj}$ . Πρόκειται όμως για μικρές μεταβολές, η επίδραση των οποίων στο Δείκτη Ποιότητας Εκροής είναι αμελητέα (Σχήμα 4.5.1):



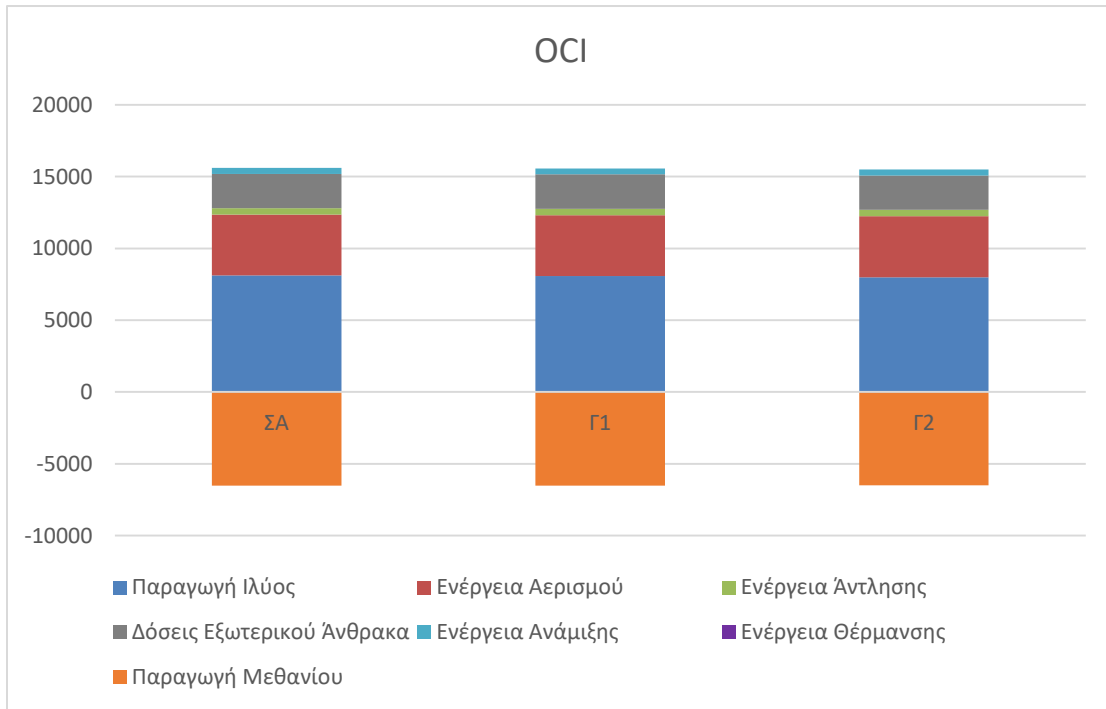
Σχήμα 4.5.1: Δείκτες Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων Γ

Πίνακας 4.5.1: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροής της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων Γ

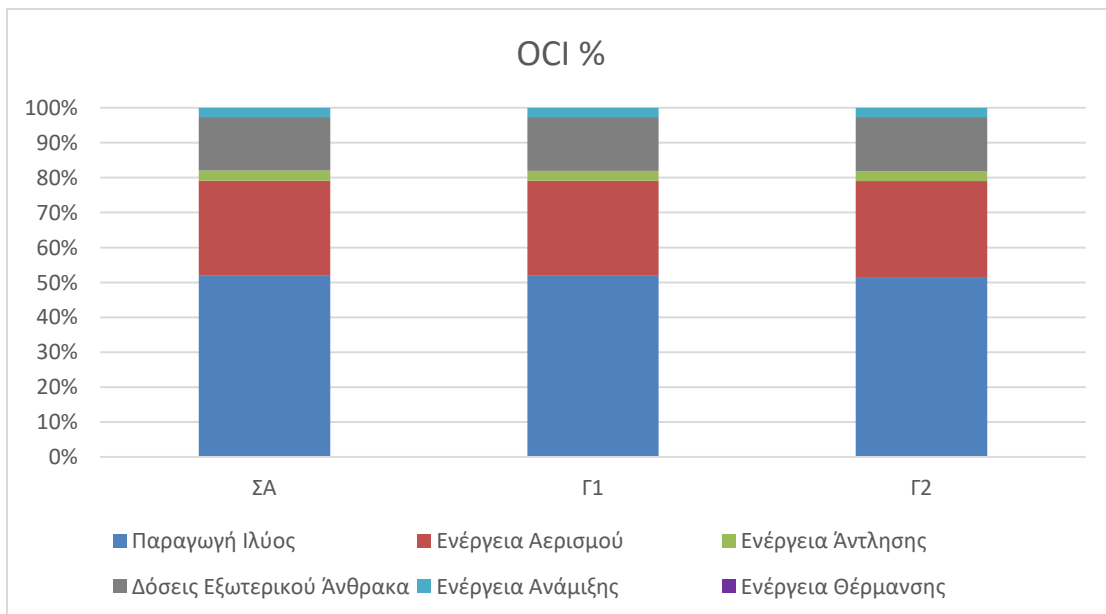
Μεταβλητές	Μονάδες Μέτρησης	Σενάριο αναφοράς	Γ1	Γ2
Παροχή $Q$	$m^3/d$	20661,02	20661,08	20661,19
Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη $S_I$	$g\ COD/m^3$	28,06	28,06	28,06
Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $S_S$	$g\ COD/m^3$	0,73	0,73	0,73
Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη $X_I$	$g\ COD/m^3$	5,91	6,21	6,77
Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $X_S$	$g\ COD/m^3$	0,33	0,33	0,33
Ετεροτροφική βιομάζα $X_{B,H}$	$g\ COD/m^3$	9,89	9,82	9,76
Αυτοτροφική βιομάζα $X_{B,A}$	$g\ COD/m^3$	0,69	0,69	0,69
Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας $X_P$	$g\ COD/m^3$	3,40	3,43	3,50
Διαλυμένο οξυγόνο $S_O$	$g - COD/m^3$	1,58	1,59	1,59
Διαλυμένο νιτρικό άζωτο $S_{NO}$	$g\ N/m^3$	11,05	10,99	10,89
Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο $S_{NH}$ ( $< 4\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	0,47	0,46	0,45
Διαλυμένο οργανικό άζωτο $S_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,59	0,58	0,58
Σωματιδιακό οργανικό άζωτο $X_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,02	0,02	0,02
Αλατότητα $S_{ALK}$	$mol\ HCO_3^-/m^3$	4,46	4,46	4,47
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά $TSS$ ( $< 30\ g\ SS/m^3$ )	$g\ SS/m^3$	15,17	15,36	15,78
Θερμοκρασία $T$	$^{\circ}C$	14,86	14,86	14,86
Άζωτο Kjeldahl $S_{NKj}$	$g\ N/m^3$	2,48	2,49	2,50
Ολικό Άζωτο $N$ ( $< 18\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	13,53	13,47	13,39
<b><math>COD</math> (<math>&lt; 100\ g\ COD/m^3</math>)</b>	<b><math>g\ COD/m^3</math></b>	<b>49,02</b>	<b>49,27</b>	<b>49,83</b>
<b><math>BOD5</math> (<math>&lt; 10\ g\ BOD5/m^3</math>)</b>	<b><math>g\ BOD5/m^3</math></b>	<b>2,79</b>	<b>2,77</b>	<b>2,76</b>

### Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους (OCI)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα επιμέρους κόστη για τη λειτουργία της εγκατάστασης, σε απόλυτες τιμές και ως ποσοστά (Σχήματα 4.5.2 και 4.5.3 αντίστοιχα).

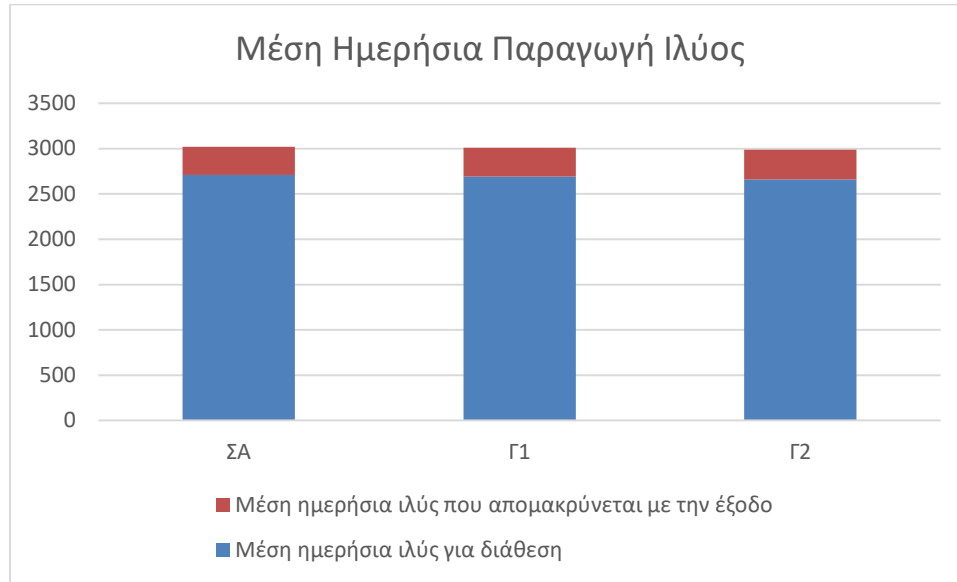


Σχήμα 4.5.2: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων Γ



Σχήμα 4.5.3: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων Γ

Μειώνοντας το ποσοστό των στερεών που απομακρύνονται με την ιλύ, όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρείται α) μια μικρή μείωση στην ποσότητα της παραγόμενης ιλύος και β) μια μικρή αύξηση στην ιλύ που φεύγει με την εκροή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.4:

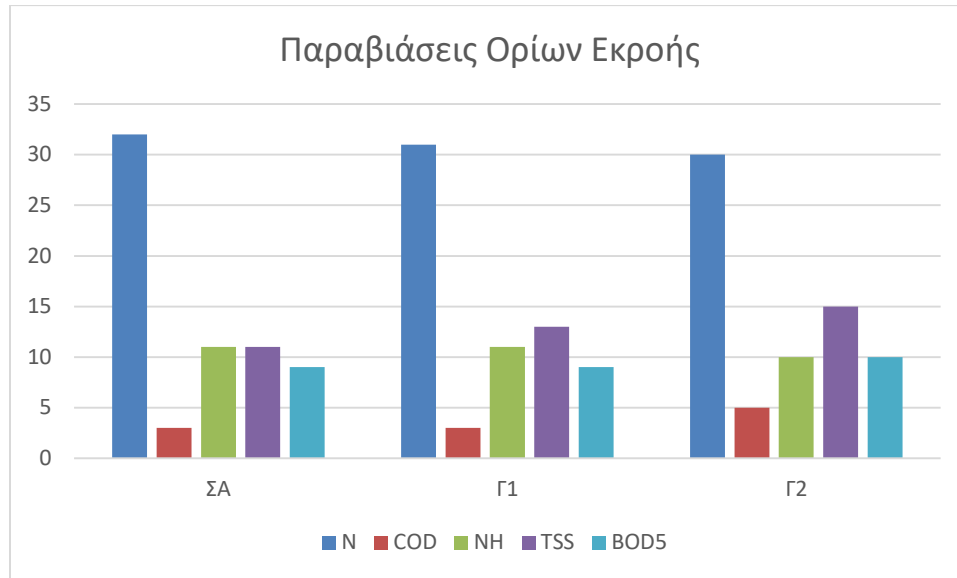


Σχήμα 4.5.4: Μέση Ημερήσια Παραγωγή Ιλύος

Η μείωση στο κόστος διαχείρισης της ιλύος λόγω αυτής της μείωσης στην ημερήσια παραγόμενη ιλύ για διάθεση, είναι ανεπαίσθητη.

### Παραβιάσεις των ορίων

Οι μεταβολές αυτής της σειράς σεναρίων δεν προκαλούν ιδιαίτερες μεταβολές στην εκροή της εγκατάστασης, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.5.5:



Σχήμα 4.5.5: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων Γ

Η αύξηση της ποσότητας της ημερήσιας ιλύος που απομακρύνεται με την εκροή, όπως είναι αναμενόμενο προκαλεί μια μικρή αύξηση στον αριθμό των ημερών που η συγκέντρωση των TSS στην έξοδο ξεπερνά τα  $30 \text{ g SS}/\text{m}^3$ .

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι εμφανές ότι μεταβολές στην απόδοση των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης δεν έχουν ουσιαστική επίδραση στους δείκτες EQI και OCI, στην παραγόμενη ιλύ και την εκροή.

## 4.6 Σειρά σεναρίων Δ: Έλεγχος αποτελεσματικότητας της αναερόβιας χώνευσης

### 4.6.1 Περιγραφή προσομοιώσεων

Στην προσομοίωση της λειτουργίας της μονάδας αναερόβιας χώνευσης, ο χρήστης μπορεί να επηρεάσει τον υδραυλικό χρόνο παραμονής αλλάζοντας τον όγκο της μονάδας. Η μέση παροχή είναι  $178,5 \text{ m}^3/\text{d}$ , και στο σενάριο αναφοράς ο όγκος της μονάδας είναι  $3400 \text{ m}^3$ , άρα ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι  $3400 \text{ m}^3/178,5 \text{ m}^3/\text{d} \cong 19 \text{ d}$ . Εξετάσθηκαν ακόμη τα ακόλουθα σενάρια:

- ❖ Σενάριο Δ1:  $2700 \text{ m}^3/178,5 \text{ m}^3/\text{d} \cong 15 \text{ d}$
- ❖ Σενάριο Δ2:  $2150 \text{ m}^3/178,5 \text{ m}^3/\text{d} \cong 12 \text{ d}$
- ❖ Σενάριο Δ3:  $1800 \text{ m}^3/178,5 \text{ m}^3/\text{d} \cong 10 \text{ d}$
- ❖ Σενάριο Δ4:  $1400 \text{ m}^3/178,5 \text{ m}^3/\text{d} \cong 8 \text{ d}$
- ❖ Σενάριο Δ5:  $1100 \text{ m}^3/178,5 \text{ m}^3/\text{d} \cong 6 \text{ d}$

### 4.6.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

#### Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εκροής

Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υγρού στην έξοδο της εγκατάστασης παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα (Πίνακας 4.6.1).

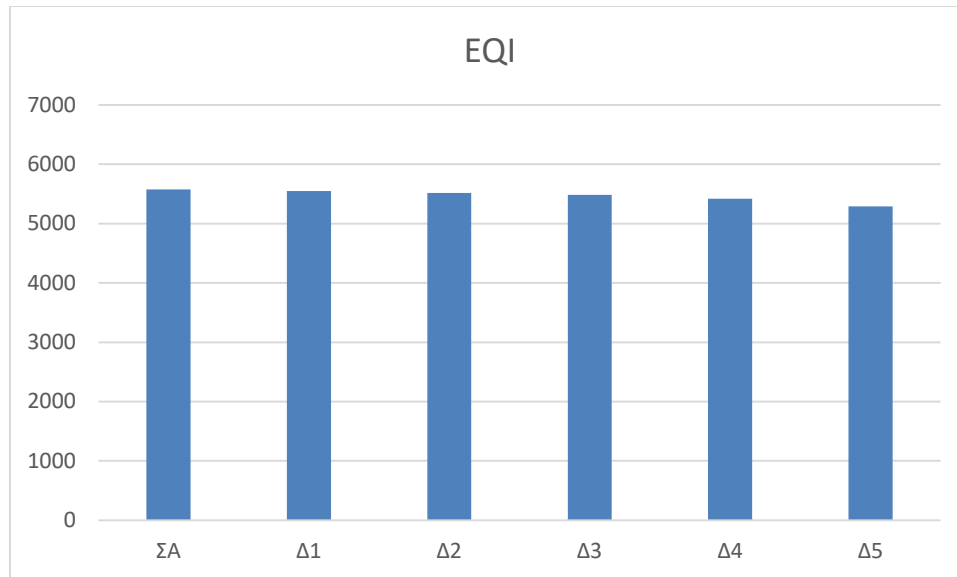


Πίνακας 4.6.1: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροή της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων Δ

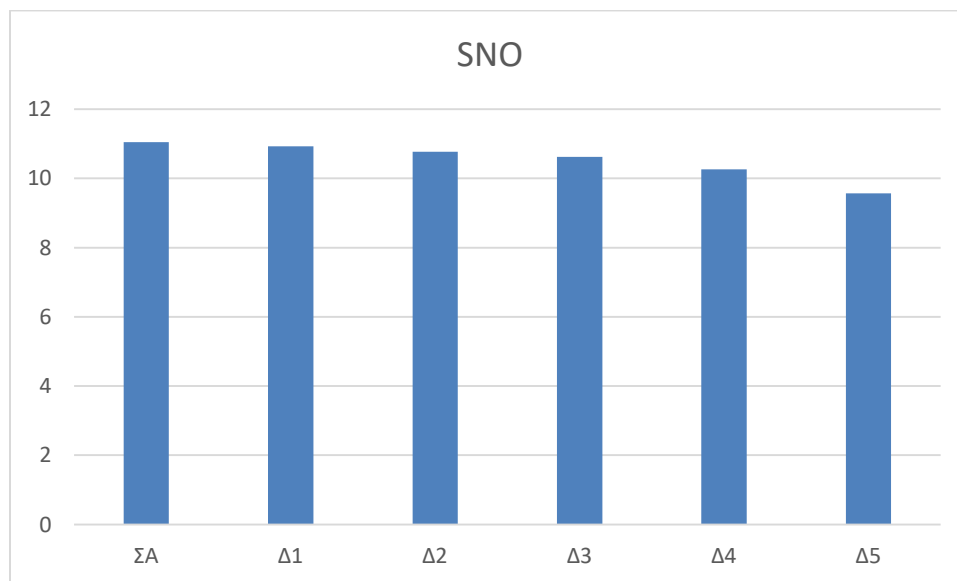
Μεταβλητές	Μονάδες Μέτρησης	Σενάριο αναφοράς	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5
Παροχή $Q$	$m^3/d$	20661,02	20660,95	20660,88	20660,82	20660,73	20660,61
Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη $S_I$	$g\ COD/m^3$	28,06	27,90	27,77	27,67	27,56	27,47
Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $S_S$	$g\ COD/m^3$	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη $X_I$	$g\ COD/m^3$	5,91	5,91	5,90	5,90	5,88	5,83
Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $X_S$	$g\ COD/m^3$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34
Ετεροτροφική βιομάζα $X_{B,H}$	$g\ COD/m^3$	9,89	9,90	9,92	9,95	10,01	10,15
Αυτοτροφική βιομάζα $X_{B,A}$	$g\ COD/m^3$	0,69	0,69	0,69	0,69	0,68	0,67
Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας $X_P$	$g\ COD/m^3$	3,40	3,40	3,41	3,42	3,44	3,48
Διαλυμένο οξυγόνο $S_O$	$g - COD/m^3$	1,58	1,57	1,57	1,56	1,55	1,51
Διαλυμένο νιτρικό άζωτο $S_{NO}$	$g\ N/m^3$	11,05	10,93	10,78	10,62	10,27	9,57
Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο $S_{NH}$ ( $< 4\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48	0,48
Διαλυμένο οργανικό άζωτο $S_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,59	0,59	0,59	0,59	0,58	0,59
Σωματιδιακό οργανικό άζωτο $X_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Αλατότητα $S_{ALK}$	$mol\ HCO_3^-/m^3$	4,46	4,46	4,48	4,49	4,51	4,56
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά $TSS$ ( $< 30\ g\ SS/m^3$ )	$g\ SS/m^3$	15,17	15,18	15,19	15,21	15,25	15,36
Θερμοκρασία $T$	°C	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86
Άζωτο Kjeldahl $S_{NKj}$	$g\ N/m^3$	2,48	2,49	2,49	2,49	2,50	2,51
Ολικό Άζωτο $N$ ( $< 18\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	13,53	13,41	13,26	13,11	12,76	12,08
$COD$ ( $< 100\ g\ COD/m^3$ )	$g\ COD/m^3$	49,02	48,87	48,75	48,68	48,63	48,69
$BOD5$ ( $< 10\ g\ BOD5/m^3$ )	$g\ BOD5/m^3$	2,79	2,79	2,80	2,80	2,82	2,85

### Δείκτης Ποιότητας Εκροής (EQI)

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.6.1 προκύπτει ότι η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης προκαλεί μείωση της μέσης συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου  $S_{NO}$ , για αυτό και η μεταβολή του Δείκτη Ποιότητας Εκροής ακολουθεί τη μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης  $S_{NO}$  (Σχήματα 4.6.1 και 4.6.2).



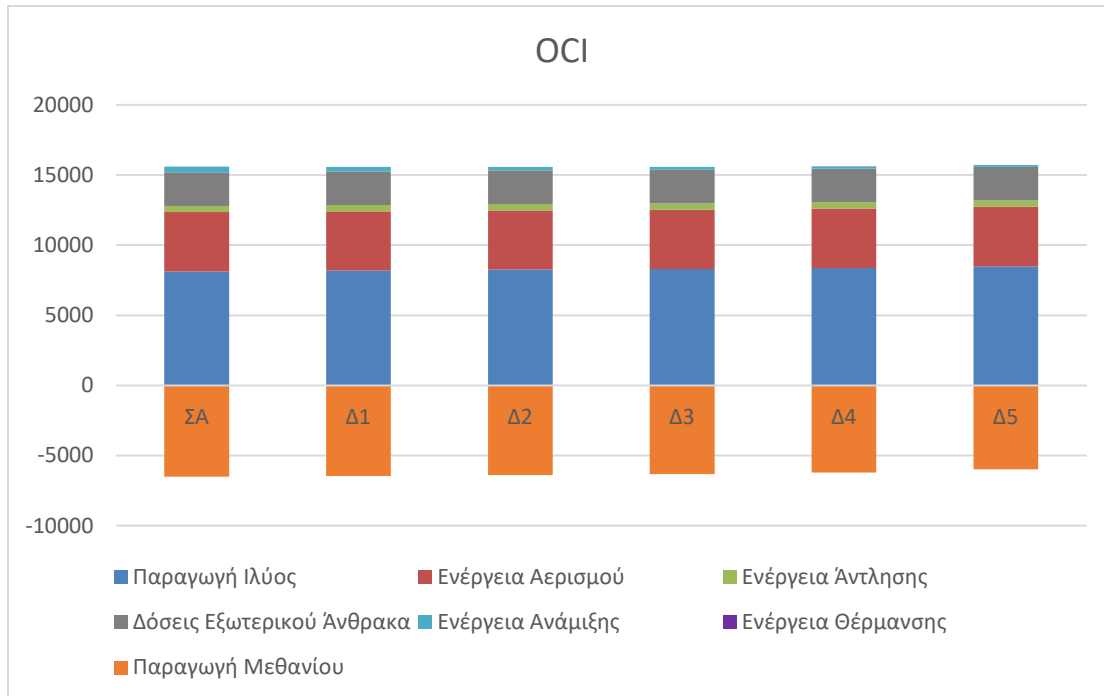
Σχήμα 4.6.1: Δείκτες Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων Δ



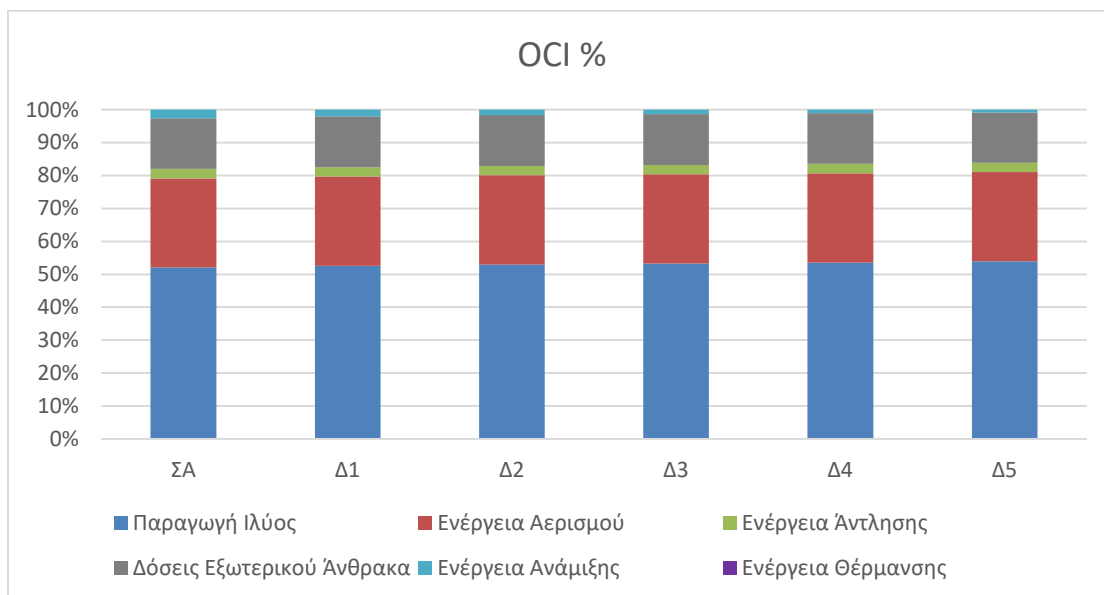
Σχήμα 4.6.2: Μέση Συγκέντρωση Νιτρικού Αζώτου Εκροής

### Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους (OCI)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα επιμέρους κόστη για τη λειτουργία της εγκατάστασης, σε απόλυτες τιμές και ως ποσοστά (Σχήματα 4.6.3 και 4.6.4 αντίστοιχα).

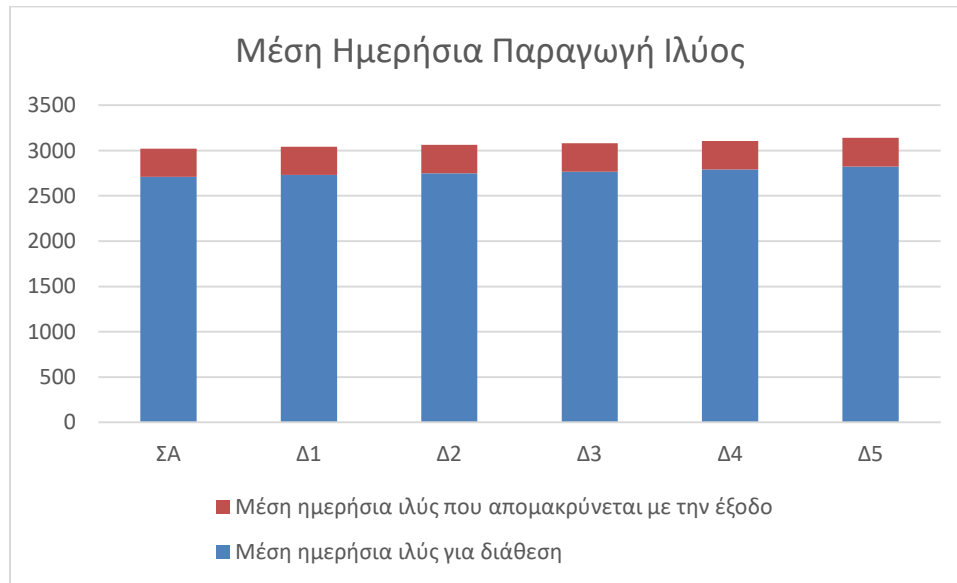


Σχήμα 4.6.3: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων Δ



Σχήμα 4.6.4: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων Δ

Η μείωση του χρόνου παραμονής στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης έχει ως αποτέλεσμα αύξηση στην ποσότητα της παραγόμενης ιλύος για διάθεση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.5:

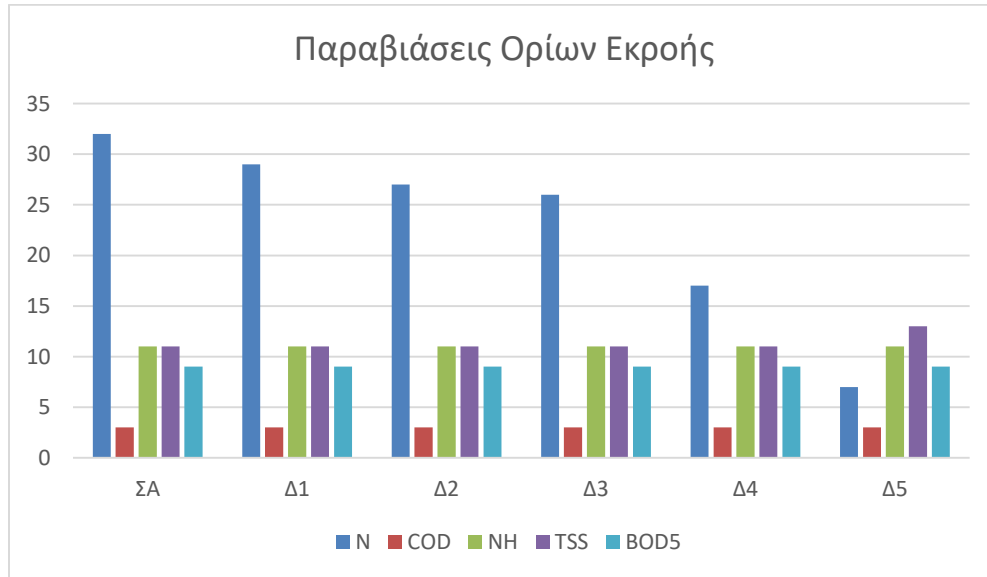


Σχήμα 4.6.5: Μέση Ημερήσια Παραγωγή Ιλύος

Πέρα από τη μικρή αύξηση στο κόστος διαχείρισης της ιλύος, μικρότερος χρόνος παραμονής στην αναερόβια χώνευση συνεπάγεται μικρότερες ανάγκες ανάμιξης, αλλά και μείωση στην παραγωγή βιοαερίου.

### Παραβιάσεις των ορίων

Όπως και ο EQI νωρίτερα, έτσι και ο αριθμός ημερών που ξεπεράστηκε το όριο του ολικού αζώτου  $N$  (Σχήμα 4.6.6) ακολουθεί τη μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου  $S_{NO}$  (Σχήμα 4.6.2). Η μείωση του χρόνου παραμονής στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης έχει ως αποτέλεσμα να ανακυκλοφορείται υγρό πλουσιότερο σε οργανικό άνθρακα, γεγονός που ευνοεί τη διεργασία της απονιτροποίησης και έχει ως αποτέλεσμα την προαναφερθείσα μείωση της μέσης συγκέντρωσης  $S_{NO}$ .

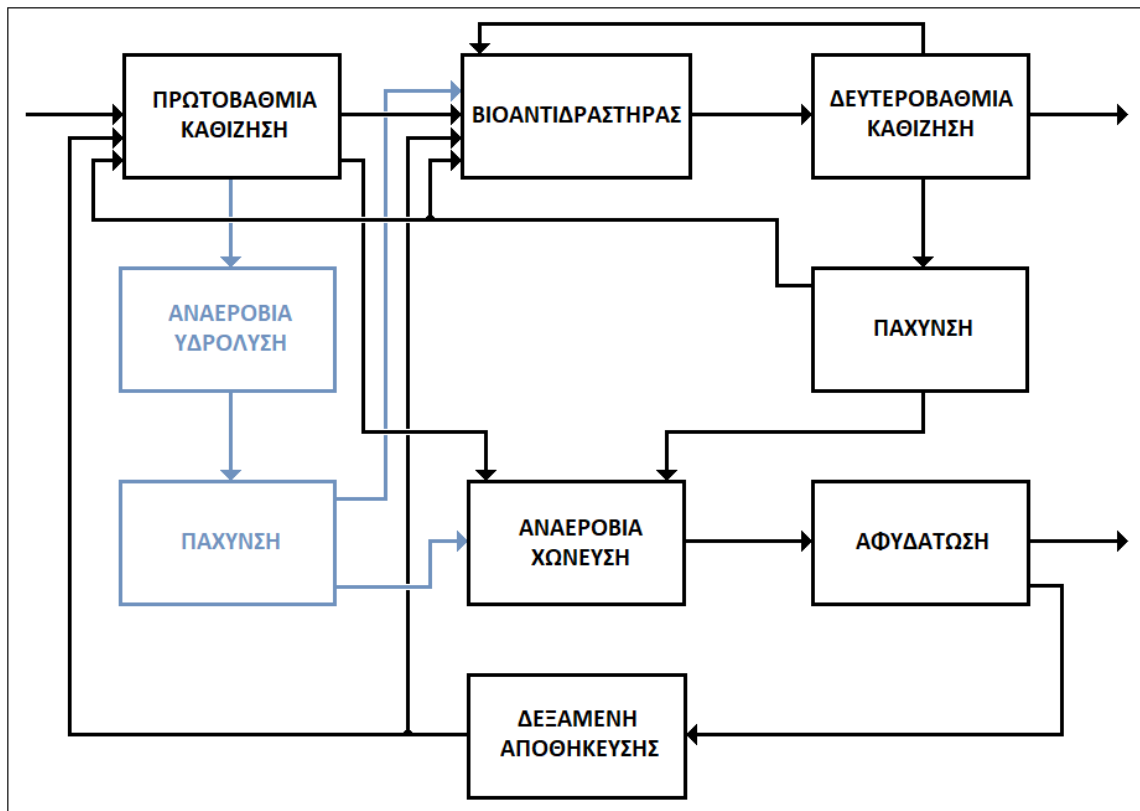


Σχήμα 4.6.6: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων Δ

**4.7 Σειρά σεναρίων E: Προσθήκη μονάδας αναερόβιας υδρόλυσης για επεξεργασία της πρωτοβάθμιας λύσος και στη συνέχεια μονάδας πάχυνσης πριν την αναερόβια χώνευση.**

#### 4.7.1 Περιγραφή προσομοιώσεων

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες σειρές σεναρίων στις οποίες μεταβαλλόταν μια λειτουργική παράμετρος τη φορά αλλά η διάταξη της εγκατάστασης παρέμενε η ίδια, σε αυτή τη σειρά σεναρίων προστίθεται μια μονάδα αναερόβιας υδρόλυσης και μια μονάδα πάχυνσης, πριν η πρωτοβάθμια λύς οδηγηθεί στην αναερόβια χώνευση, και τα στραγγίδια οδηγηθούν στα ανοξικά διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα (Σχήμα 4.7.1).



Σχήμα 4.7.1: Διάταξη Μονάδων Σειράς Σεναρίων E

Σε αυτή την παραλλαγή της κλασικής διάταξης του BSM2 εξετάστηκαν τα ακόλουθα σενάρια:

- ❖ Σενάριο E1:  $T_{\text{αναερόβιας υδρόλυσης}} = 35^{\circ}\text{C}$
- ❖ Σενάριο E2:  $T_{\text{αναερόβιας υδρόλυσης}} = 15^{\circ}\text{C}$
- ❖ Σενάριο E3:  $T_{\text{αναερόβιας υδρόλυσης}} = 35^{\circ}\text{C}$  χωρίς προσθήκη εξωτερικού άνθρακα στα ανοξικά διαμερίσματα.

#### 4.7.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στον Πίνακα 4.7.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των στραγγιδίων από τη μονάδα πάχυνσης που προστέθηκε, τα οποία οδηγούνται στο πρώτο ανοξικό διαμέρισμα.

Πίνακας 4.7.1: Συγκεντρώσεις στραγγιδίων μονάδας πάχυνσης

Μεταβλητές	Μονάδες Μέτρησης	E1	E2	E3
Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη $S_I$	$g\ COD/m^3$	34,55	31,82	34,52
Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $S_S$	$g\ COD/m^3$	25933,70	23645,44	25924,71
Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη $X_I$	$g\ COD/m^3$	515,80	218,18	514,44
Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $X_S$	$g\ COD/m^3$	143,08	135,06	142,97
Ετεροτροφική βιομάζα $X_{B,H}$	$g\ COD/m^3$	0,00	0,00	0,00
Αυτοτροφική βιομάζα $X_{B,A}$	$g\ COD/m^3$	0,00	0,00	0,00
Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας $X_P$	$g\ COD/m^3$	19,39	6,07	19,38
Διαλυμένο οξυγόνο $S_O$	$g - COD/m^3$	0,00	0,00	0,00
Διαλυμένο νιτρικό άζωτο $S_{NO}$	$g\ N/m^3$	0,00	0,00	0,00
Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο $S_{NH}$	$g\ N/m^3$	1362,02	1195,86	1360,74
Διαλυμένο οργανικό άζωτο $S_{ND}$	$g\ N/m^3$	5,04	40,11	5,05
Σωματιδιακό οργανικό άζωτο $X_{ND}$	$g\ N/m^3$	5,53	5,79	5,52
Αλατότητα $S_{ALK}$	$mol\ HCO_3^-/m^3$	92,27	80,59	92,18
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά $TSS$	$g\ SS/m^3$	508,70	269,48	507,59
Παροχή $Q$	$m^3/d$	73,31	69,23	73,34
Θερμοκρασία $T$	$^{\circ}C$	19,87	19,87	19,87

#### Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Εκροής

Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υγρού στην έξοδο της εγκατάστασης παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα (Πίνακας 4.7.2).

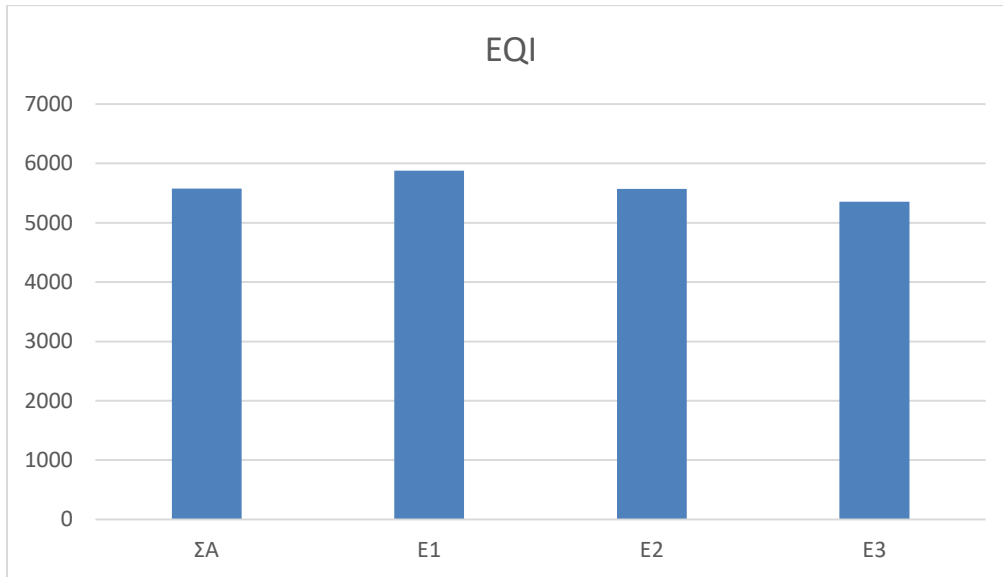
Πίνακας 4.7.2: Μέσες συγκεντρώσεις στην εκροή της εγκατάστασης για τη σειρά σεναρίων E

Μεταβλητές	Μονάδες Μέτρησης	Σενάριο αναφοράς	E1	E2	E3
Παροχή $Q$	$m^3/d$	20661,02	20660,99	20660,96	20659,22
Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη $S_I$	$g\ COD/m^3$	28,06	28,03	28,10	28,02
Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $S_S$	$g\ COD/m^3$	0,73	0,80	0,79	0,78
Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη $X_I$	$g\ COD/m^3$	5,91	7,37	6,70	6,49
Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη $X_S$	$g\ COD/m^3$	0,33	0,47	0,44	0,40
Ετεροτροφική βιομάζα $X_{B,H}$	$g\ COD/m^3$	9,89	16,70	14,84	13,14
Αυτοτροφική βιομάζα $X_{B,A}$	$g\ COD/m^3$	0,69	0,80	0,75	0,71
Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας $X_P$	$g\ COD/m^3$	3,40	5,29	4,82	4,36
Διαλυμένο οξυγόνο $S_O$	$g - COD/m^3$	1,58	1,12	1,16	1,25
Διαλυμένο νιτρικό άζωτο $S_{NO}$	$g\ N/m^3$	11,05	6,31	6,53	6,98
Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο $S_{NH}$ ( $< 4\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	0,47	0,75	0,70	0,62
Διαλυμένο οργανικό άζωτο $S_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,59	0,63	0,63	0,62
Σωματιδιακό οργανικό άζωτο $X_{ND}$	$g\ N/m^3$	0,02	0,03	0,27	0,02
Αλατότητα $S_{ALK}$	$mol\ HCO_3^-/m^3$	4,46	4,82	5,18	4,76
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά $TSS$ ( $< 30\ g\ SS/m^3$ )	$g\ SS/m^3$	15,17	22,98	20,66	18,83
Θερμοκρασία $T$	$^{\circ}C$	14,86	14,86	14,86	14,86
Άζωτο Kjeldahl $S_{NKj}$	$g\ N/m^3$	2,48	3,57	3,29	3,02
Ολικό Άζωτο $N$ ( $< 18\ g\ N/m^3$ )	$g\ N/m^3$	13,53	9,88	9,82	10,00
$COD$ ( $< 100\ g\ COD/m^3$ )	$g\ COD/m^3$	49,02	59,47	56,43	53,91
$BOD5$ ( $< 10\ g\ BOD5/m^3$ )	$g\ BOD5/m^3$	2,79	4,44	3,99	3,57

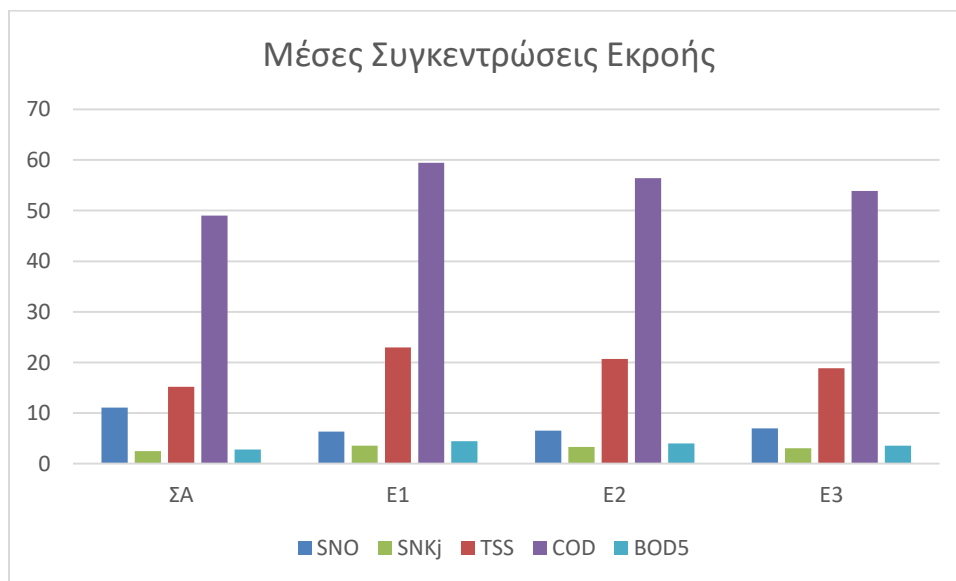


### Δείκτης Ποιότητας Εκροής (EQI)

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.7.1 προκύπτει ότι, σε αντίθεση με τις προηγούμενες σειρές σεναρίων που άλλαζαν μόνο τα συστατικά του αζώτου, εδώ μεταβάλλονται και τα πέντε συστατικά που καθορίζουν την τιμή του Δείκτη Ποιότητας Εκροής. Στα σχήματα 4.7.2 και 4.7.3 φαίνεται ότι η μεταβολή του Δείκτη Ποιότητας Εκροής ακολουθεί τις μεταβολές των  $S_{NKj}$ , TSS, COD και BOD. Το νιτρικό άζωτο  $S_{NO}$  παρουσιάζει αντίθετη μεταβολή και στα τρία σενάρια.



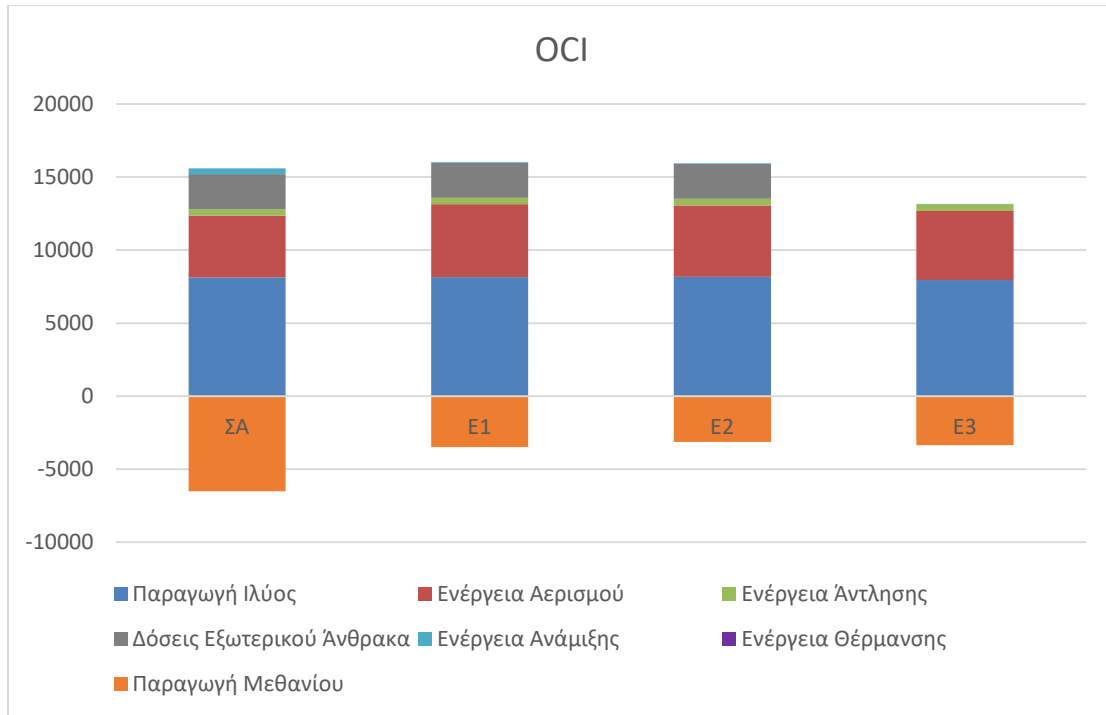
Σχήμα 4.7.2: Δείκτης Ποιότητας Εκροής Σειράς Σεναρίων Ε



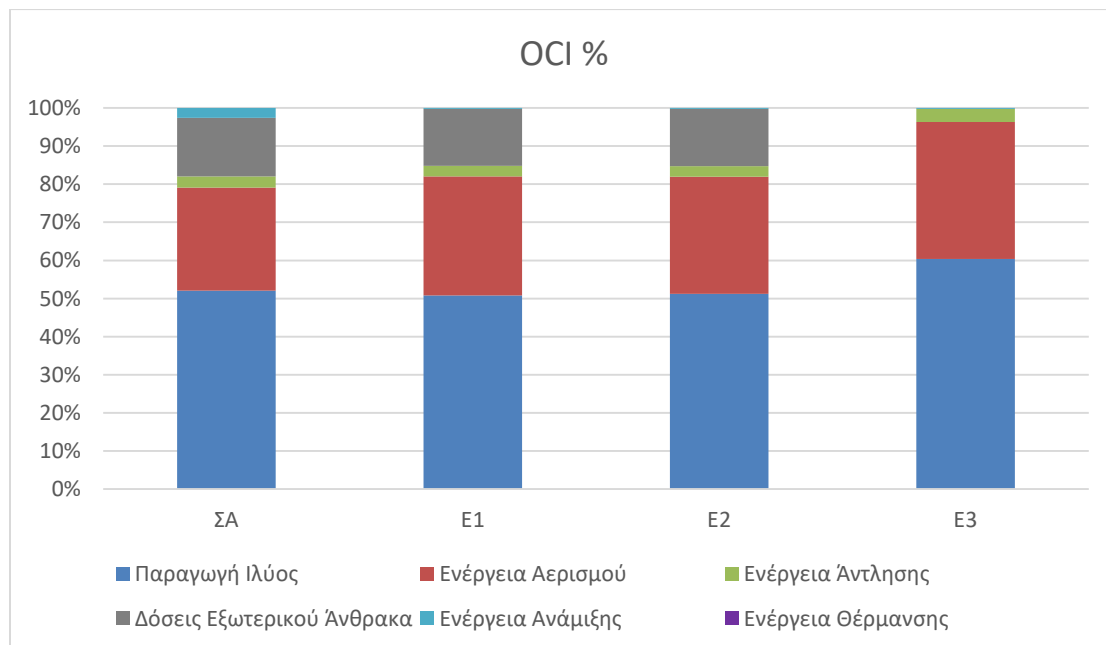
Σχήμα 4.7.3: Μέσες Συγκεντρώσεις Εκροής

### Δείκτης Ολικού Λειτουργικού Κόστους (OCI)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα επιμέρους κόστη λειτουργίας της εγκατάστασης, σε απόλυτες τιμές και ως ποσοστά (Σχήματα 4.7.4 και 4.7.5).



Σχήμα 4.7.4: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους Σειράς Σεναρίων E

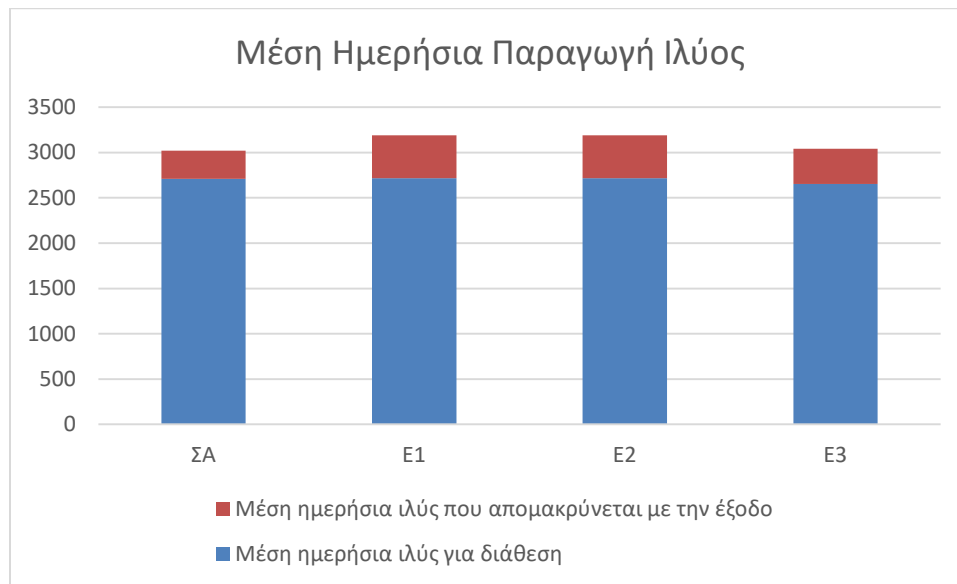


Σχήμα 4.7.5: Δείκτες Ολικού Λειτουργικού Κόστους (%) Σειράς Σεναρίων E

Με την παρεμβολή έργων πρωτοβάθμιας ιλύος πριν τη μονάδα αναερόβιας χώνευσης, η ενέργεια από το παραγόμενο βιοαέριο μειώθηκε στο μισό. Η ενέργεια που απαιτείται για ανάμιξη σχεδόν μηδενίστηκε.

Στο σενάριο E3, όπου θεωρήθηκε ότι τα ανοξικά διαμερίσματα λειτουργούν αποκλειστικά με πτητικά λιπαρά οξέα (Volatile Fatty Acids – VFAs) από τη μονάδα πάχυνσης που προστέθηκε, μηδενίστηκε το κόστος για εξωτερικό άνθρακα. Αντίθετα το κόστος αερισμού αυξήθηκε καθώς επανακυκλοφορείται στο σύστημα αρκετός άνθρακας.

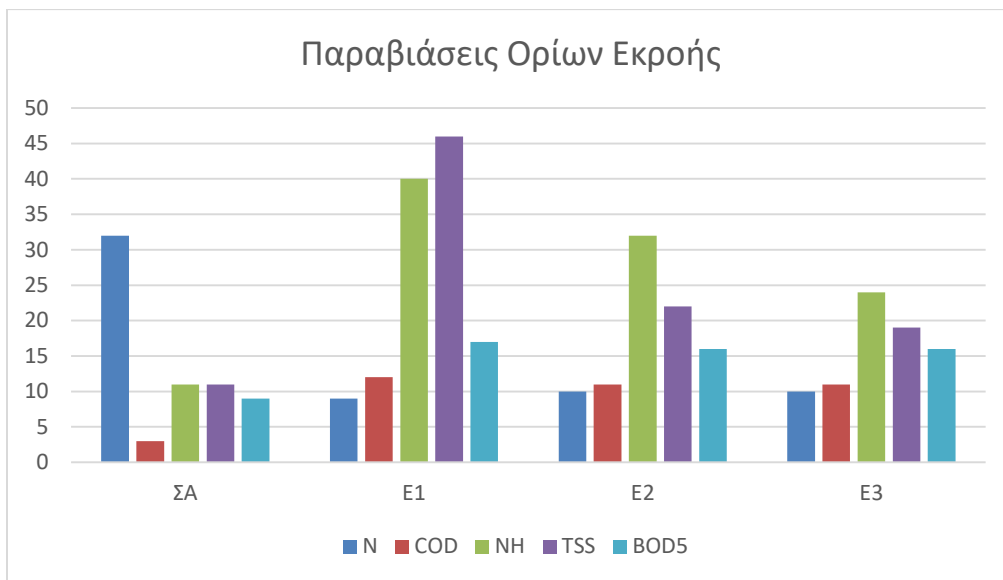
Το κόστος διαχείρισης της ιλύος δε μεταβάλλεται, καθώς η μέση ποσότητα ιλύος για διάθεση παρέμεινε σταθερή, όπως φαίνεται το σχήμα 4.7.6:



Σχήμα 4.7.6: Μέση Ημερήσια Παραγωγή Ιλύος

## Παραβιάσεις των ορίων

Οι μεταβολές στις παραβιάσεις των ορίων εκροής παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7.7 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.7.7: Παραβιάσεις Ορίων Εκροής Σειράς Σεναρίων E

Με την αύξηση – σχεδόν στο διπλάσιο στο σενάριο E1 – της ιλύος που απομακρύνεται με την εκροή, αυξήθηκαν και οι ημέρες που η εκροή δε συμμορφώνεται με τα όρια για TSS, COD και BOD.

Με τη νέα διάταξη παρατηρείται λιγότερο ολικό άζωτο στην εκροή, αφού με την προσφορά VFAs στα ανοξικά διαμερίσματα, ευνοείται η απονιτροποίηση. Μια τέτοια λύση ενδείκνυται όταν το άζωτο είναι κρίσιμο στην εκροή. Ωστόσο δεν πρόκειται για μια οικονομική λύση· πέρα από το αυξημένο κόστος λειτουργίας, υπάρχει και το κόστος κατασκευής των πρόσθετων μονάδων. Τέλος υπάρχει και το περιβαλλοντικό κόστος, καθώς η μείωση των παραβιάσεων για το ολικό άζωτο γίνεται σε βάρος όλων των υπόλοιπων ορίων εκροής.

## 5 Συμπεράσματα

---

Στην παρούσα διπλωματική, με τη χρήση του Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2), προσομοιώθηκαν διάφορα σενάρια λειτουργίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων. Εξετάσθηκαν μεταβολές στο βιοαντιδραστήρα, στη μονάδα πρωτοβάθμιας καθίζησης, στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης καθώς και στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης. Ακόμη εξετάστηκε μια εναλλακτική διάταξη, με προσθήκη μονάδας αναερόβιας υδρόλυσης και μονάδας πάχυνσης για την επεξεργασία της πρωτοβάθμιας ιλύος πριν την αναερόβια χώνευση.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Η απόδοση της μονάδας πρωτοβάθμιας καθίζησης έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργία ολόκληρης της εγκατάστασης. Αυξημένη απόδοση (π.χ. 75%) διασφαλίζει μειωμένο κόστος λειτουργίας, οδηγώντας όμως ταυτόχρονα σε μείωση του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα που οδηγείται στη βιολογική βαθμίδα και επομένως στα ανοξικά διαμερίσματα με αποτέλεσμα τη μείωση της απονιτροποίησης και την καταγραφή υψηλότερων συγκεντρώσεων νιτρικών στην εκροή.
2. Η απόδοση ως προς την κατακράτηση στερεών των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης έχει μικρή επίδραση στους βασικούς δείκτες αξιολόγησης της λειτουργίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.
3. Μείωση του ολικού αζώτου στην εκροή μπορεί να επιτευχθεί με μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (μέχρι  $1 \text{ mg/l}$ ) στα αεριζόμενα διαμερίσματα του βιολογικού αντιδραστήρα, με μείωση της απόδοσης της μονάδας πρωτοβάθμιας καθίζησης και με μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής της αναερόβιας χώνευσης. Αν η διάταξη περιλαμβάνει μονάδα αναερόβιας υδρόλυσης, μείωση του ολικού αζώτου στην εκροή μπορεί να επιτευχθεί με τροφοδότηση των ανοξικών διαμερισμάτων με πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs) από τη μονάδα αναερόβιας υδρόλυσης.
4. Η μόνη λύση για την ταυτόχρονη επίτευξη μείωσης του ολικού αζώτου, μείωσης του Δείκτη Ποιότητας Εκροής (EQI) και μείωσης του Δείκτη Ολικού Λειτουργικού Κόστους (OCI), χωρίς την αύξηση των παραβιάσεων των ορίων εκροής είναι η μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο βιολογικό αντιδραστήρα στα  $1,5 \text{ mg/l}$ .

5. Μείωση του αμμωνιακού αζώτου στην εκροή μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο βιολογικό αντιδραστήρα, ώστε μέσω της νιτροποίησης να μετατρέπεται σε σε νιτρικό άζωτο.
6. Μείωση του χρόνου παραμονής στερεών στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης οδηγεί σε αύξηση τόσο της ιλύος για διάθεση, όσο και της ιλύος που απομακρύνεται με την εκροή.
7. Με την προσθήκη μίας μονάδας υδρόλυσης για την πρωτοβάθμια ιλύ εξασφαλίζεται επαρκής εύκολα βιοδιασπάσιμος οργανικός άνθρακας για την υποβοήθηση της απονιτροποίησης στη γραμμή επεξεργασίας των λυμάτων οδηγώντας έτσι σε μείωση του λειτουργικού κόστους λόγω αποφυγής της ανάγκης χρήσης χημικών. Βέβαια η ύπαρξη των παραπάνω μονάδων σημαίνει αυξημένο κόστος κατά την κατασκευή της εγκατάστασης. Ταυτόχρονα όμως μειώνεται η παραγωγή βιοαερίου, το εύρος της μείωσης της οποίας χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

## Βιβλιογραφία

---

- Alex, Jens, et al. "Benchmark simulation model no. 1 (BSM1)." Report by the IWA Taskgroup on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs (2008): 19-20.
- Alex, Benedetti, et al. "Benchmark simulation model no. 2 (BSM2)."
- Batstone, Damien j., et al. "The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1)." *Water science and technology* 45.10 (2002): 65-73.
- Gujer, Willi, and Mogens Henze. "Activated sludge modelling and simulation." *Water Science and Technology* 23.4-6 (1991): 1011-1023.
- Henze, Mogens, et al. "Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3." (2000).
- Jeppsson, Ulf. "A general description of the IAWQ activated sludge model No. 1. " IEA, Lund (1997).
- Jeppsson, Ulf, et al. "Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies." *Water Science and Technology* 56.8 (2007): 67-78.
- Takács, Imre, Gilles G. Patry, and Daniel Nolasco. "A dynamic model of the clarification-thickening process ." *Water research* 25.10 (1991): 1263-1271
- Van Loosdrecht, M. C. M., et al. "Twenty-five years of ASM1: past, present and future of wastewater treatment modelling." *Journal of Hydroinformatics* 17.5 (2015): 697-718.
- Vrecko, Darko, et al. "Benchmark simulation model No 2 in Matlab-Simulink: towards plant-wide WWTP control strategy evaluation" *Water Science and Technolog* 54.8 (2006): 65-72.

Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ. "Περιγραφή μοντέλου IAWQ." Σημειώσεις για το μάθημα: Προχωρημένες μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, ΔΠΜΣ Επιστήμης και Τεχνολογίας Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.

Ιωαννίδης Χ. " Μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών των λυμάτων στην απόδοση εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων μέσω μαθηματικής προσομοίωσης." Διπλωματική Εργασία Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Τομέα Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ (2019).

Κόκκινος Β. Η. "Ανάπτυξη Μαθηματικού Μοντέλου Αναερόβιας Χώνευσης Ιλύος." Μεταπτυχιακή εργασία στο Διεπιστημονικό- Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» ΕΜΠ (2017).

Σαραντόπουλος Β. "Ανάπτυξη και Εφαρμογή Ολοκληρωμένου Μοντέλου Προσομοίωσης Λειτουργίας Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων." Διπλωματική Εργασία Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Τομέα Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ (2015).