



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΡΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ
ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ»**

Βασιλική Τώνη

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΡΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ
ΜΕΣΩ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ»**

Βασιλική Τώνη

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και όλη η διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ολοκληρώθηκαν με ταυτόχρονη επαγγελματική απασχόληση μου σε τομέα που δεν σχετίζεται με το αντικείμενο των σπουδών μου. Γι' αυτό, αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κύριο Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και δέχτηκε να μου αναθέσει την παρούσα διπλωματική εργασία. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κύριο Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο και την Κυρία Έλενα Κουμάκη, Διδάκτωρ της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για τον επαγγελματισμό τους, την άψογη συνεργασία τους, την καθοδήγηση και το ενδιαφέρον τους, την αμεσότητά τους αλλά και την υπομονή τους και την καλή τους διάθεση.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τη Μητέρα μου Μαργαρίτα, τον Αδερφό μου Χρήστο, το Δημήτρη και τις φίλες μου που πάντα με στηρίζουν, μου δίνουν δύναμη και πιστεύουν σ' εμένα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους από το εργασιακό μου περιβάλλον και την επιχείρηση στην οποία εργάζομαι, που όλα αυτά τα χρόνια με στήριξαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας μείωσης των αερίων θερμοκηπίου (GHG) που εκπέμπονται από τη λειτουργία εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας και της ποιότητας εκροής τους μέσω μαθηματικής προσομοίωσης.

Για τη μαθηματική προσομοίωση των λειτουργιών της ΕΕΛ χρησιμοποιείται τροποποιημένο μοντέλο που βασίζεται στο πρότυπο για συστήματα ολοκληρωμένης προσομοίωσης ΕΕΛ «Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2)» και έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τις τιμές της εκπομπής αερίων θερμοκηπίου (GHG), το δείκτη λειτουργικού κόστους (OCI) και το δείκτη ποιότητας εκροής (EQI).

Η προσομοίωση γίνεται για σταθερές συνθήκες εισερχόμενης παροχής λυμάτων στην εγκατάσταση και εξετάζεται πως επηρεάζουν την εκπομπή GHG και τους δείκτες OCI και EQI. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να ελεγχθεί μια σειρά από εφαρμογές που σχετίζονται με την επίδραση διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοση της προσομοιούμενης εγκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν α) η απόδοση της πρωτοβάθμιας καθίζησης (sr), β) το ποσοστό κατακράτησης στερεών στις μονάδες βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης και στην μονάδα αφυδάτωσης (CR), γ) οι διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στις δεξαμενές αερισμού του αερόβιου αντιδραστήρα (DO), δ) οι διαφορετικοί χρόνοι παραμονής στερεών στο σύστημα ενεργού ιλύος (SRT) και ε) η απόδοση της μονάδας επεξεργασίας των στραγγιδίων, ως προς την απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου, της μηχανικής αφυδάτωσης τα οποία ανακυκλοφορούνται στην είσοδο της εγκατάστασης.

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι:

- για τον περιορισμό της εκπομπής GHG δεν ευνοεί η αύξηση του sr ,
- για να μπορούν να λειτουργούν οι μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης με υψηλό ποσοστό κατακράτησης στερεών, που είναι το επιθυμητό, χρειάζεται να εξασφαλίζεται επαρκής ποσότητα βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα στην ανοξική δεξαμενή,
- η συγκέντρωση DO παρουσιάζει κατώτατο και ανώτατο όριο,
- δεν ευνοούν οι χαμηλοί χρόνοι SRT.

- Τέλος, η επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης πριν την επανακυκλοφορία τους στην εγκατάσταση, ευνοεί τον περιορισμό της εκπομπής GHG.

Abstract

Objective of the present thesis is to investigate the capability of the reduction of Greenhouse Gas (GHS) emissions, being produced during the operation of Wastewater Treatment Plants (WWTP), and also to optimize their operational cost and effluent quality through mathematical simulation.

Mathematical simulation of the operations of the WWTP uses a modified model based on the protocol for integrated simulation systems of WWTP “Benchmark Simulation Model No 2 (BSM2)”, which is able to estimate the level of GHG emissions, the operational cost index (OCI) and the effluent quality index (EQI).

The simulation runs for steady-state conditions regarding the influent flow rate of the wastewater and monitors whether the GHG emissions, the OCI and the EQI indexes are being affected. The mathematical model was used to evaluate a number of different scenarios which are related with the effect of several operational parameters on the plant’s performance. Specifically, it was examined the influence of a) the different percentages of solids removal through the primary sedimentation (sr), b) the different percentages of solids capture rates from thickeners and dewaterer (CR), c) the different concentrations of dissolved oxygen in the aeration tank of bioreactor (DO), d) the different sludge retention time in the activated sludge system (SRT) and e) the different ammonium nitrogen removal from the liquors recirculated from the dewaterer.

The most important conclusions of this effort are that to limit the GHG production from WWTP:

- the increase of sr percentage more than 70% is prohibited,
- it is necessary to ensure adequate concentration of biodegradable organic matter in anoxic tank to keep CR at high rates as it is desirable,
- it is necessary to keep DO concentration between a maximum and minimum limit, short SRT doesn’t help for GHG limitation.
- Finally, reduction of ammonium nitrogen from dewaterer’s water flow donates GHG reduction.

Περιεχόμενα

Περίληψη	vii
Abstract.....	ix
Περιεχόμενα.....	xi
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xviii
1. Εισαγωγή	1
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση μοντέλων προσομοίωσης της λειτουργίας ΕΕΛ και μηχανισμών παραγωγής GHG	3
2.1 Μοντέλα προσομοίωσης ΕΕΛ	3
2.1.1 Εισαγωγή.....	3
2.1.2 Μοντέλο Ενεργού Ιλύος ASM1	5
2.1.3 Μοντέλα BSM	11
2.1.4 Δείκτες εκτίμησης απόδοσης της ΕΕΛ EQI και OCI	13
2.2 Μηχανισμοί παραγωγής αερίων θερμοκηπίου (GHG) από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων	16
2.2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2.2 Μηχανισμοί παραγωγής CO ₂	17
2.2.3 Μηχανισμοί παραγωγής N ₂ O.....	20
2.2.4 Μηχανισμοί παραγωγής CH ₄	23
3. Μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης λειτουργίας Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων.....	25
3.1 Εισαγωγή	25
3.2 Περιγραφή μοντέλου	26

3.3	Δείκτες εκτίμησης απόδοσης της προσομοιούμενης ΕΕΛ EQI και OCI όπως ορίζονται στο μοντέλο.....	34
4.	Εφαρμογές του Μοντέλου Προσομοίωσης.....	35
4.1	Σενάρια.....	35
4.1.1	<i>Σενάριο 1 : Διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....</i>	<i>36</i>
4.1.2	<i>Σενάριο 2 : Διερεύνηση της επίδρασης του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης και στη μονάδα αφυδάτωσης.....</i>	<i>48</i>
4.1.3	<i>Σενάριο 3 : Διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών συγκεντρώσεων οξυγόνου στα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα.....</i>	<i>59</i>
4.1.4	<i>Σενάριο 4: Διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών χρόνων παραμονής μικροοργανισμών στο σύστημα ενεργού ιλύος.....</i>	<i>72</i>
4.1.5	<i>Σενάριο 5: Διερεύνηση της επίδρασης της η απόδοση της μονάδας επεξεργασίας των στραγγιδίων της μηχανικής αφυδάτωσης ως προς την απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου</i>	<i>83</i>
5.	Συμπεράσματα.....	92
	Βιβλιογραφικές αναφορές.....	95

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ορόσημα στην ιστορική εξέλιξη της μαθηματικής προσομοίωσης των ΕΕΛ ως ενιαία συστήματα (Πηγή: Manina et al., 2016)	3
Σχήμα 2.2: Αναλυτικά στάδια νιτροποίησης (A) και απονιτροποίησης (A,B) και παραγωγής N ₂ O (Πηγή: (Massara, et al., 2017))	23
Σχήμα 3.1: Σχεδιάγραμμα την εγκατάστασης που προσομοιώνεται από το μοντέλο	26
Σχήμα 4.1: Δείκτης ποιότητας εκροής συναρτήσει των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	37
Σχήμα 4.2: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης	38
Σχήμα 4.3: Συγκέντρωση αερίου αζώτου στην ανοξική δεξαμενή για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης	39
Σχήμα 4.4: Λόγος των μικροοργανισμών που οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο X_{AOB} προς τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς X_{BH} στην αερόβια δεξαμενή για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης	40
Σχήμα 4.5: Λόγος των μικροοργανισμών που οξειδώνουν τα νιτρώδη X_{NOB} προς τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς X_{BH} στην αερόβια δεξαμενή για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης	40
Σχήμα 4.6: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) συναρτήσει των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	41
Σχήμα 4.7: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) από όλη την ΕΕΛ για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης	42
Σχήμα 4.8: Ανάλυση άμεσων και έμμεσων εκπομπών GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης	43
Σχήμα 4.9: Εκπομπές N ₂ O στον αερόβιο αντιδραστήρα συναρτήσει του λόγου COD/N για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	43
Σχήμα 4.10: Λόγος του N ₂ O που παράγεται στην ΕΕΛ προς το TN που εισέρχεται στην ΕΕΛ για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	44
Σχήμα 4.11: Συγκέντρωση ετεροτροφικών μικροοργανισμών X_{BH} στην αερόβια δεξαμενή για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	45

Σχήμα 4.12: Δείκτης λειτουργικού κόστους συναρτήσει των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	46
Σχήμα 4.13: Ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	47
Σχήμα 4.14: Δείκτης ποιότητας εκροής συναρτήσει του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.....	49
Σχήμα 4.15: Συγκεντρώσεις των επιμέρους σωματιδιακών κλασμάτων στην έξοδο της εγκατάστασης για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.....	51
Σχήμα 4.16: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης...	51
Σχήμα 4.17: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) συναρτήσει του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.....	52
Σχήμα 4.18: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) από όλη την ΕΕΛ για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης...	53
Σχήμα 4.19: Επομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) στον βιολογικό αντιδραστήρα για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης...	54
Σχήμα 4.20: Εκπομπές N ₂ O στον αερόβιο αντιδραστήρα συναρτήσει του λόγου COD/N για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.....	55
Σχήμα 4.21: Λόγος του N ₂ O που παράγεται στην ΕΕΛ προς το TN που εισέρχεται στην ΕΕΛ για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.....	56
Σχήμα 4.22: Δείκτης λειτουργικού κόστους συναρτήσει των διαφορετικών ποσοστών κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.....	57
Σχήμα 4.23: Ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.....	58
Σχήμα 4.24: Δείκτης ποιότητας εκροής συναρτήσει της συγκέντρωσης οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα.....	60

Σχήμα 4.25: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα.....	62
Σχήμα 4.26: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) συναρτήσει της συγκέντρωσης οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα	63
Σχήμα 4.27: Ποσοστό των AOB στο σύνολο των AOB και NOB στον αερόβιο αντιδραστήρα για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου.....	65
Σχήμα 4.28: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) από όλη την ΕΕΛ για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα.....	65
Σχήμα 4.29: Ανάλυση άμεσων και έμμεσων εκπομπών GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου	66
Σχήμα 4.30: Εκπομπές N ₂ O στον αερόβιο αντιδραστήρα συναρτήσει του λόγου ΧΑΟΒ/(ΧΑΟΒ+ΧΝΟΒ) για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις DO	67
Σχήμα 4.31: Συγκέντρωση οξυγόνου στην είσοδο της ανοξικής δεξαμενής συναρτήσει των διαφορετικών συγκεντρώσεων οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα.....	69
Σχήμα 4.32: Λόγος του N ₂ O που παράγεται στην ΕΕΛ προς το TN που εισέρχεται στην ΕΕΛ για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα	69
Σχήμα 4.33: Δείκτης λειτουργικού κόστους συναρτήσει της συγκέντρωσης οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα	70
Σχήμα 4.34: Ενέργειες αερισμού (ΑΕ), άντλησης (ΡΕ), ανάμειξης (ΜΕ), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα.....	71
Σχήμα 4.35: Δείκτης ποιότητας εκροής συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα	73
Σχήμα 4.36: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές ημέρες παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα	74
Σχήμα 4.37: Συγκέντρωση των Χ _{ΑΟΒ} στο τελευταίο διαμέρισμα της αερόβιας δεξαμενής για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα	74
Σχήμα 4.38: Συγκέντρωση των Χ _{ΝΟΒ} στο τελευταίο διαμέρισμα της αερόβιας δεξαμενής για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα	75
Σχήμα 4.39: Συγκεντρώσεις των επιμέρους σωματιδιακών κλασμάτων στην έξοδο της εγκατάστασης για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στο βιολογικό αντιδραστήρα .	76

Σχήμα 4.40: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα	77
Σχήμα 4.41: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) από όλη την ΕΕΛ για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα.....	78
Σχήμα 4.42: Ανάλυση άμεσων και έμμεσων εκπομπών GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών.....	78
Σχήμα 4.43: Ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια από την αναερόβια χώνευση για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα	80
Σχήμα 4.44: Δείκτης λειτουργικού κόστους συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα.....	81
Σχήμα 4.45: Ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της λύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα	82
Σχήμα 4.46: Δείκτης ποιότητας εκροής για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου.....	84
Σχήμα 4.47: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου	85
Σχήμα 4.48: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου	86
Σχήμα 4.49: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d) από όλη την ΕΕΛ για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου	87
Σχήμα 4.50: Ανάλυση άμεσων και έμμεσων εκπομπών GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα σε ισοδύναμα Kg CO ₂ /d για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου	87
Σχήμα 4.51: Δείκτης λειτουργικού κόστους για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου	89
Σχήμα 4.52: Ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της λύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας	

των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου
..... 90

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Στοιχειομετρία και διεργασίες του ASM1(Πηγή: Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3,	7
Πίνακας 2.2: Περιγραφή συστατικών ASM1.....	8
Πίνακας 2.3: τυπικές τιμές παραμέτρων για ουδέτερο PH, θερμοκρασία 20 °C και οικιακά λύματα (Henze, Grady, Gujer, Marais, & Matsuo, 1987).....	9
Πίνακας 2.4: Επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων στην εκροή του συστήματος κατά το BSM1 και BSM2. Πηγή: (Alex, et al., 2008) (Jeppsson, et al., 2007),	12
Πίνακας 2.5: Τιμές των συντελεστών βαρύτητας του δείκτη EQI για το BSM1 και το BSM2 ..	14
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων.....	27
Πίνακας 3.2: Κινητικές των διεργασιών που συντελούνται στο σύστημα ενεργού ιλύος του μοντέλου	29
Πίνακας 3.3: Τιμές των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο.....	30
Πίνακας 4.1: COD/N στην είσοδο της δεξαμενής απονιτροποίησης για τα διαφορετικά ποσοστά απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.....	38
Πίνακας 4.2: Συγκεντρώσεις των επιμέρους σωματιδιακών κλασμάτων από τις εκροές υγρών των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών	50
Πίνακας 4.3: Συγκέντρωση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης μετά την ανακυκλοφορία των στραγγιδίων πάχυνσης και αφυδάτωσης στη ροή εισόδου, για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών	54
Πίνακας 4.4: COD/N στην είσοδο της δεξαμενής απονιτροποίησης για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης	55
Πίνακας 4.5: Συγκέντρωση ετεροτροφικών μικροοργανισμών στο τελευταίο διαμέρισμα του αερόβιου αντιδραστήρα για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης	56
Πίνακας 4.6: Μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα.....	61
Πίνακας 4.7: Μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα	62

Πίνακας 4.8: Συγκεντρώσεις των X_{AOB} και X_{NOB} για τις διαφορετικές περιπτώσεις
επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του
αμμωνιακού αζώτου 90

1. Εισαγωγή

Η ύπαρξη και λειτουργία Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) είναι απαραίτητη για την κοινωνία και το περιβάλλον καθώς, απομακρύνουν τους ρύπους των υδάτων που προέρχονται από οικιακή ή βιομηχανική χρήση πριν τη διάθεσή τους στο περιβάλλον. Η διάθεση των λυμάτων στους υδάτινους αποδέκτες χωρίς να προηγηθεί επεξεργασία θα οδηγούσε σε ρυπασμένα, μολυσμένα και βρόμικα νερά με δυσσομία. Οι συνέπειες θα ήταν να διαταραχθούν τα οικοσυστήματα και η χρήση των υδάτων να είναι απαγορευτική από τον άνθρωπο για άρδευση ή αλιεία αλλά και για αναψυχή ή αθλητισμό. Επιπλέον, θα υπήρχε ο πολύ σοβαρός κίνδυνος εξάπλωσης επιδημιών (Ανδρεαδάκης Α. Δ., 1986).

Ωστόσο, παρά την σπουδαιότητα των ΕΕΛ για τη προστασία του περιβάλλοντος, υπάρχουν και αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον από τη λειτουργία τους. Αφήνουν το δικό τους οικολογικό αποτύπωμα λόγω της κατανάλωσης ενέργειας και των αερίων θερμοκηπίου (GHG) που εκπέμπουν.

Ο πρωταρχικός στόχος των ΕΕΛ είναι ιστορικά η επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας εκροής των υδάτων με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας τους. Πλέον παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον προκειμένου να γίνεται πρόβλεψη και ελαχιστοποίηση των εκπομπών GHG (Ανδρεαδάκης Α. Δ., 1986).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η δυνατότητα μείωσης της εκπομπής GHG με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του δείκτη κόστους λειτουργίας (OCI) και του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI) μέσω μαθηματικής προσομοίωσης. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ΕΕΛ είναι ένα τροποποιημένο μοντέλο των (Σαραντόπουλος, 2015) και (Koumaki, et al., 2017) , που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του Τομέα Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Βασίζεται στο πρότυπο για συστήματα ολοκληρωμένης προσομοίωσης ΕΕΛ Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2) και αποτελείται από μονάδες προεπεξεργασίας, πρωτοβάθμιας καθίζησης, αναερόβιου αντιδραστήρα, ανοξικού αντιδραστήρα , αερόβιου αντιδραστήρα, δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης, μονάδας απολύμανσης με χρήση υποχλωριώδους νατρίου (NaCl), βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης, αναερόβιας

χώνευσης, αφυδάτωσης και επεξεργασίας στραγγιδίων. Το μοντέλο των (Σαραντόπουλος, 2015) και (Koumaki, et al., 2017) υπολογίζει τις εκπομπές των N₂O (υποξείδιο του αζώτου), CH₄ (μεθάνιο) και CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα) που είναι τα GHG που κυρίως παράγονται στην ΕΕΛ καθώς και το δείκτη ποιότητας εκροής των επεξεργασμένων υδάτων (EQI). Στην παρούσα διπλωματική έγινε η περαιτέρω τροποποίηση του μοντέλου με στόχο να υπολογίζεται επιπροσθέτως ο δείκτης λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης (OCI). Ο δείκτης OCI περιλαμβάνει το κόστος για την ενέργεια που απαιτείται για αερισμό (AE), ανάμειξη (ME), άντληση (PE), λόγω της παραγωγής ιλύος (SP), λόγω της προσθήκης άνθρακα στη βιολογική βαθμίδα (ME) και τέλος για θέρμανση της ιλύος (HEnet) στον αναερόβιο χωνευτή (Noprens, et al., 2010).

Η διάρθρωση της εργασίας γίνεται ως εξής:

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία παρουσιάζονται τα μοντέλα προσομοίωσης των λειτουργιών των ΕΕΛ καθώς και οι δείκτες εκτίμησης της απόδοσης της εγκατάστασης από την εφαρμογή διαφόρων στρατηγικών ελέγχου. Ακόμα, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μηχανισμοί εκπομπής GHG από τις ΕΕΛ.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το τροποποιημένο μοντέλο προσομοίωσης των (Σαραντόπουλος, 2015) και (Koumaki, et al., 2017) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια που εφαρμόστηκαν στο τροποποιημένο μοντέλο των (Σαραντόπουλος, 2015) και (Koumaki, et al., 2017) καθώς και η επίδραση τους στην απόδοση της εγκατάστασης και τους δείκτες λειτουργίας της.

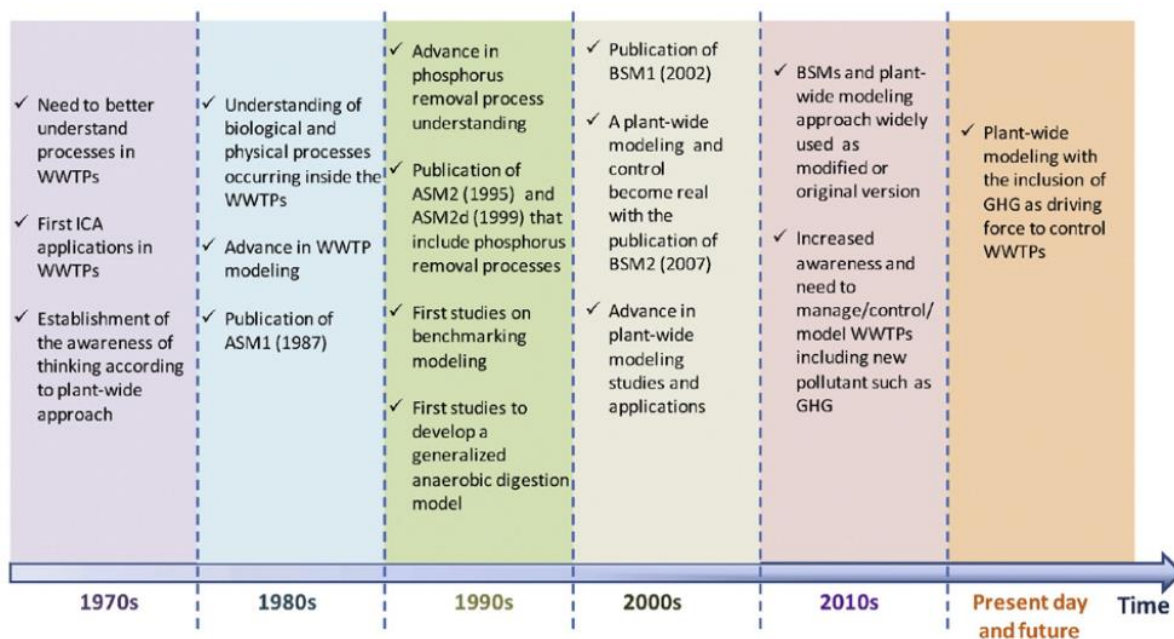
Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση μοντέλων προσομοίωσης της λειτουργίας ΕΕΛ και μηχανισμών παραγωγής GHG

2.1 Μοντέλα προσομοίωσης ΕΕΛ

2.1.1 Εισαγωγή

Από το 1970 μέχρι σήμερα η λειτουργία των ΕΕΛ έχει γίνει αντικείμενο έρευνας από την επιστημονική κοινότητα. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα ορόσημα στην ιστορική εξέλιξη της μαθηματικής προσομοίωσης των ΕΕΛ ως ενιαία συστήματα. Από την αρχή της έρευνας, που εκδηλώθηκε η ανάγκη για κατανόηση σε βάθος των διεργασιών που συντελούνται σε μια ΕΕΛ και η προσέγγιση των διαφόρων τμημάτων της ως ένα ενιαίο σύνολο, μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί τέσσερα Μοντέλα Ενεργού Ιλύος (ASM1, ASM2, ASM2d και ASM3) και δύο συστήματα ολοκληρωμένης προσομοίωσης και ελέγχου ΕΕΛ (BSM1 και BSM2). Από τη δεκαετία του 2010 έχει γίνει αντιληπτή η σπουδαιότητα της εκτίμησης των GHG που εκπέμπονται από τις ΕΕΛ και έχουν γίνει προσπάθειες ένταξής τους στα μοντέλα προσομοίωσης (Mannina, et al., 2016)



Σχήμα 2.1: Ορόσημα στην ιστορική εξέλιξη της μαθηματικής προσομοίωσης των ΕΕΛ ως ενιαία συστήματα (Πηγή: Manina et al., 2016)

Τα μοντέλα προσομοίωσης των συστημάτων ενεργού ιλύος θα πρέπει να περιλαμβάνουν τις πιο αντιπροσωπευτικές διεργασίες που συντελούνται στις μονάδες της εγκατάστασης προσομοιώνοντας και ποσοτικοποιώντας τις κινητικές και τη στοιχειομετρία της κάθε διεργασίας. Το σημαντικό στα μοντέλα προσομοίωσης δεν είναι να αναπαριστούν με ακρίβεια και με όλες τις λεπτομέρειες τις διεργασίες που συμβαίνουν σε ένα σύστημα αλλά το αποτέλεσμά τους να προσεγγίζει ικανοποιητικά το πραγματικό αποτέλεσμα (Ανδρεαδάκης & Νουτσόπουλος, 2010).

Τα Μοντέλα Ενεργού Ιλύος (Activated Sludge Models, ASM) προσομοιώνουν διεργασίες που γίνονται στην βιολογική βαθμίδα της ΕΕΛ. Το Μοντέλο Ενεργού Ιλύος ASM1 περιλαμβάνει τις διεργασίες οξείδωσης του άνθρακα, τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση. Τα ASM2 και ASM2b περιλαμβάνουν επιπρόσθετα και τη βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου, ενώ το ASM3 περιλαμβάνει τις διεργασίες του ASM1 και διαφοροποιείται από αυτό προσομοιώνοντας την αποθήκευση της εύκολα διασπάσιμης οργανικής ύλης από τους μικροοργανισμούς και την ενδογενή αναπνοή (Massara, et al., 2017). Όλα τα ASM θεωρούν την νιτροποίηση σαν μια απευθείας διαδικασία αγνοώντας τα ενδιάμεσα στάδιά της και την παραγωγή N_2O από αυτά (Massara, et al., 2017).

Τα Benchmark Simulation Models (BSM) είναι πρωτόκολλα για την δημιουργία μοντέλων που προσομοιώνουν λειτουργίες των ΕΕΛ και για την αξιολόγηση της απόδοσης διαφόρων στρατηγικών ελέγχου της λειτουργίας τους (Jeppsson, et al., 2007). Συγκεκριμένα, τα BSM σχεδιάστηκαν για να παρουσιάζουν τον τρόπο ενοποίησης των επιμέρους μοντέλων λειτουργιών της ΕΕΛ όπως είναι τα Μοντέλα Ενεργού Ιλύος (ASM) και τα Μοντέλα Αναερόβιας Χώνευσης (ADM), και δίνουν τη δυνατότητα πειραματισμού και αυτοματοποίησης (Mannina, et al., 2016). Επίσης, καθορίζουν τον σχεδιασμό της ΕΕΛ δηλαδή τις μονάδες της εγκατάστασης και τα χαρακτηριστικά τους που θα προσομοιωθούν στο μοντέλο, το μοντέλο προσομοίωσης της, τα φορτία εισόδου της εγκατάστασης, τις διαδικασίες ελέγχου και τα κριτήρια αξιολόγησης των επιδόσεων που προκύπτουν από τις διαδικασίες ελέγχου π.χ. δείκτες EQI και OCI. Για όλα τα παραπάνω έχουν γίνει παραδοχές προκειμένου τα μοντέλα να είναι απλά αλλά να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα (Alex, et al., 2008).

Η χρήση των BSM βοηθάει στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών των ΕΕΛ καθώς προσδιορίζουν τις διάφορες παραμέτρους στις οποίες οφείλονται οι κακές επιδόσεις της

ΕΕΛ. Παραδείγματα κακών επιδόσεων είναι η υψηλή απαίτηση για ενέργεια ή η υψηλή τιμή του δείκτη EQI (Mannina, et al., 2016). Στην περίπτωση που γίνει προσπάθεια βελτιστοποίησης σε κάθε μονάδα ξεχωριστά, χωρίς να θεωρηθεί η εγκατάσταση ως ενιαίο σύνολο είναι σίγουρο ότι το συνολικό αποτέλεσμα της ΕΕΛ δε θα είναι το βέλτιστο που μπορεί να φτάσει η εγκατάσταση (Jeppsson, et al., 2007).

Το BSM1 δημοσιεύτηκε το 2002 και περιλαμβάνει τον αντιδραστήρα ενεργού ιλύος και τη δευτεροβάθμια καθίζηση. Το BSM2 δημοσιεύτηκε το 2007 και επεκτείνει το BSM1 περιλαμβάνοντας όλες τις μονάδες της ΕΕΛ δηλαδή περιλαμβάνει και μονάδες προεπεξεργασίας των λυμάτων, πρωτοβάθμια καθίζηση αλλά και γραμμή επεξεργασίας της ιλύος με αναερόβιο χωνευτή ιλύος (Mannina, et al., 2016) (Jeppsson, et al., 2007).

Κανένα από τα BSM δεν περιλαμβάνει διαδικασίες υπολογισμού των GHG που παράγονται στις ΕΕΛ. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ πιθανό το βέλτιστο αποτέλεσμα που προκύπτει από την προσομοίωση, λαμβάνοντας υπόψη τα υπόλοιπα κριτήρια αξιολόγησης, να μην είναι καθόλου βέλτιστο για την εκπομπή GHG (Mannina, et al., 2016).

2.1.2 Μοντέλο Ενεργού Ιλύος ASM1

Το Μοντέλο Ενεργού Ιλύος ASM1 δημοσιεύτηκε το 1987 και προσομοιώνει τις διαδικασίες της οξείδωσης του άνθρακα, της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης που συμβαίνουν στη βιολογική βαθμίδα των ΕΕΛ. Οι παραπάνω διαδικασίες εκφράζονται μέσω οκτώ διεργασιών που πραγματοποιούνται από μικροοργανισμούς. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν: την αερόβια και ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικής βιομάζας, την αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικής βιομάζας, την αποσύνθεση της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας, την αμμωνιοποίηση του οργανικού διαλυμένου αζώτου, την υδρόλυση του σωματιδιακού βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα και την υδρόλυση του σωματιδιακού βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου (Henze, Grady, Gujer, Marais, & Matsuo, 1987).

Το μοντέλο βασίζεται στο ισοζύγιο μάζας στις δεξαμενές του βιολογικού αντιδραστήρα, στις κινητικές και στη στοιχειομετρία των διεργασιών που συντελούνται σε αυτές. Η εξίσωση ισορροπίας της μάζας στην αναερόβια δεξαμενή, στην ανοξική δεξαμενή, στην αερόβια δεξαμενή και σε κάθε διαμέρισμά της είναι η εξής:

$$\text{Είσοδος}-\text{Έξοδος}+\text{Αντίδραση}=\text{Συγκέντρωση}$$

Οι όροι «Είσοδος» και «Έξοδος» είναι όροι μεταφοράς μάζας λόγω ροής ενώ ο όρος αντίδραση προκύπτει από τον στοιχειομετρικό πίνακα και πίνακα διεργασιών του ASM1(Πίνακας 2.1). Οι σειρές του Πίνακας 2.1 παρουσιάζουν τις διεργασίες της ΕΕΛ που προσομοιώνονται στο μοντέλο ενώ οι στήλες του δείχνουν τα διάφορα συστατικά του μοντέλου. Οι συγκεντρώσεις όλων των οργανικών συστατικών του μοντέλου δίνονται σε ισοδύναμες μονάδες χημικής απαίτησης οξυγόνου (COD) (Henze, Grady, Gujer, Marais, & Matsuo, 1987). Στο δεξί μέρος του πίνακα φαίνονται οι κινητικές των διεργασιών.

Πίνακας 2.1: Στοιχειομετρία και διεργασίες του ASM1(Πηγή: Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, Scientific and Technical Report No9)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Ρυθμός Διεργασιών ρ_i
	S_I	S_S	X_I	X_S	X_{BH}	X_{BA}	X_P	S_O	S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}	
1. Αερόβια Ανάπτυξη Ετεροτροφικών		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			$\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_{BH}$
2. Ανοξική Ανάπτυξη Ετεροτροφικών		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2,86Y_H}$		$-i_{XB}$			$\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2,86 \cdot Y_H} - \left(\frac{i_{XB}}{14} \right)$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) X_{BH} \rho_g$
3. Αερόβια Ανάπτυξη Αυτοτροφικών						1		$-\frac{4,57 - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$				$\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_{BA}$
4. Αποσύνθεση Ετεροτροφικών				$1 - f_p$	-1		f_p					$i_{XB} - f_p \cdot i_{XP}$		$b_H X_{BH}$
5. Αποσύνθεση Αυτοτροφικών				$1 - f_p$		-1	f_p					$i_{XB} - f_p \cdot i_{XP}$		$b_A X_{BA}$
6. Αμμωνιοποίηση Διαλυμένου Οργανικού Αζώτου										1	-1		$\frac{1}{14}$	$K_\alpha S_{ND} X_{BH}$
7. Υδρόλυση Παγιδευμένων Οργανικών		1		-1										$K_h \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + (X_S/X_{BH})} \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + n_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \} X_{BH}$
8. Υδρόλυση Παγιδευμένου Οργανικού Αζώτου											1	-1		$\rho_7 \left(\frac{X_{ND}}{X_S} \right)$
Παρατηρούμενος Ρυθμός Αντίδρασης	$r_i = \sum V_{ij} \rho_j$													

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2.1 το ASM1 περιλαμβάνει 13 συστατικά τα οποία περιγράφονται στον Πίνακα 2.2. Η ονοματολογία των συστατικών έχει προκύψει συμβολίζοντας τα σωματιδιακά στοιχεία με «X» και τα διαλυτά με «S». Ακόμα, στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές των παραμέτρων που συμμετέχουν στις κινητικές των διεργασιών για ουδέτερο PH, θερμοκρασία λυμάτων 20 °C και οικιακά λύματα.

Οι κινητικές των διεργασιών του ASM1 έχουν επιλεγεί να λειτουργούν σαν «διακόπτες» ώστε μια διεργασία να λειτουργεί ή να μην λειτουργεί ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στη δεξαμενή. Αυτό για παράδειγμα προσομοιώνει σωστά το γεγονός ότι η νιτροποίηση δεν λειτουργεί χωρίς οξυγόνο. Σε αυτή την περίπτωση το ρόλο του «διακόπτη» έχει ο όρος:

$$\frac{S_o}{K_{oA} + S_o}$$

ο οποίος όταν η τιμή του διαλυμένου O₂ είναι πολύ μικρή τείνει στο μηδέν ενώ όταν είναι μεγάλη τείνει στη μονάδα (Henze, Grady, Gujer, Marais, & Matsuo, 1987).

Πίνακας 2.2: Περιγραφή συστατικών ASM1

Συστατικά	Περιγραφή
S _I	: αδρανής διαλυμένη οργανική ύλη
S _S	: εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
X _I	: αδρανής σωματιδιακή οργανική ύλη
X _S	: αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
X _{B,H}	: Ετεροτροφική βιομάζα
X _{B,A}	: Αυτοτροφική βιομάζα
X _P	: Σωματιδιακά προϊόντα φθοράς μικροοργανισμών
S _O	: Διαλυμένο οξυγόνο

S_{NO}	:	Νιτρικό άζωτο
S_{NH}	:	Αμμωνιακό άζωτο
S_{ND}	:	Διαλυμένο βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο
X_{ND}	:	Σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο
S_{ALK}	:	Αλκαλικότητα

Πίνακας 2.3: τυπικές τιμές παραμέτρων για ουδέτερο PH, θερμοκρασία 20 °C και οικιακά λύματα (Henze, Grady, Gujer, Marais, & Matsuo, 1987).

Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
Στοιχειομετρικές Παράμετροι		
Y_A	gr δημιουργούμενου κυττάρου COD . (gr οξειδωμένου N) ⁻¹	0,07-0,28
Y_H	gr δημιουργούμενου κυττάρου COD . (gr οξειδωμένου COD) ⁻¹	0,46-0,69
f_p	Αδιάστατο	0,08
i_{XB}	gr N . (gr COD) ⁻¹ , στη βιομάζα	0,086
i_{XP}	gr N . (gr COD) ⁻¹ , στην ενδογενή μάζα	0,06
Κινητικές παράμετροι		
μ_H	d ⁻¹	3-13,2
K_S	gr COD m ⁻³	10-180
$K_{O,H}$	gr O ₂ m ⁻³	0,01-0,15
K_{NO}	gr NO ₃ -N m ⁻³	0,1-0,2
b_H	d ⁻¹	0,09-4,38

n_g	αδιάστατο	0,6-1,0
n_h	αδιάστατο	0,4
K_h	gr εύκολα βιοδιασπάσιμου COD . (gr κυττάρου COD d) ⁻¹	2,2
K_x	gr εύκολα βιοδιασπάσιμου COD . (gr κυττάρου COD) ⁻¹	0,15
μ_A	d ⁻¹	0,34-0,65
K_{NH}	gr NH ₃ -N m ⁻³	0,6-3,6
$K_{O,A}$	gr O ₂ m ⁻³	0,5-2,0
b_A	d ⁻¹	0.05-0.15
K_A	m ³ COD . (gr d) ⁻¹	0,08

Τέλος, παρουσιάζονται οι παραδοχές και οι περιορισμοί που έχουν γίνει ώστε να επιτευχθεί η προσομοίωση των διαδικασιών που συμβαίνουν στην βιολογική βαθμίδα μιας ΕΕΛ με απλότητα αλλά και με ρεαλισμό (Henze, Grady, Gujer, Marais, & Matsuo, 1987) :

- Το σύστημα λειτουργεί σε σταθερή θερμοκρασία και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται είναι οι κατάλληλες για αυτή τη θερμοκρασία.
- Η τιμή του pH είναι σταθερή και κοντά στην ουδέτερη.
- Η φύση της οργανικής ύλης είναι σταθερή παρά την αλλαγή στη συγκέντρωσή της.
- Υπάρχουν επάρκεια στα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί για την ανάπτυξή τους.
- Οι διορθωτικοί παράγοντες της απονιτροποίησης n_g και n_h θεωρούνται ότι είναι σταθεροί και με συγκεκριμένη τιμή παρότι στην πραγματικότητα η τιμή τους μπορεί να εξαρτάται από την διαμόρφωση της ΕΕΛ.
- Οι συντελεστές της νιτροποίησης παραμένουν σταθεροί.
- Η ετεροτροφική βιομάζα είναι ομοιογενής και δεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου.
- Η παγίδευση σωματιδιακής οργανικής ύλης από τη βιομάζα γίνεται στιγμιαία.

- Η υδρόλυση της βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης και του βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου γίνεται ταυτόχρονα και τον ίδιο ρυθμό.
- Το είδος του αποδέκτη ηλεκτρονίων δεν επηρεάζει την αποσύνθεση της βιομάζας.

2.1.3 Μοντέλα BSM

Το BSM1 δημοσιεύτηκε το 2002. Το μοντέλο ορίζει τα γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος που προσομοιώνει, το σχεδιασμό του, μεθόδους πιστοποίησης ότι το μοντέλο λειτουργεί σωστά πριν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου και δείκτες απόδοσης του συστήματος για τα διάφορα σενάρια.

Το σύστημα που προσομοιώνει αποτελείται από βιολογικό αντιδραστήρα και δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης. Ο βιολογικός αντιδραστήρας περιλαμβάνει δύο ανοξικές δεξαμενές και τρεις αερόβιες δεξαμενές και βασίζεται στο ASM1 για την περιγραφή των βιολογικών διεργασιών που συντελούνται. Ο όγκος κάθε ανοξικής δεξαμενής είναι 1000 m^3 ενώ ο όγκος κάθε αερόβιας δεξαμενής είναι 1333 m^3 . Στα δύο πρώτα αερόβια διαμερίσματα υπάρχει σταθερή μεταφορά οξυγόνου με συντελεστή $K_{La}=10 \text{ h}^{-1}$ ενώ στο τελευταίο διαμέρισμα η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι ελεγχόμενη στα 2 gr COD/m^3 (Alex, et al., 2008). Η προσομοίωση της λειτουργίας της δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης γίνεται μέσω του διαχωρισμού της σε δέκα ζώνες καθίζησης στις οποίες δεν συντελείται κάποια βιολογική διεργασία (Alex, et al., 2008).

Οι δείκτες απόδοσης του συστήματος για τα διάφορα σενάρια που εφαρμόζονται σύμφωνα με το BSM1 είναι ο αριθμός των παραβάσεων των ορίων εκροής, ο δείκτης ποιότητας εκροής (EQI), ο δείκτης ποιότητας εισροής (IQI) και ο δείκτης λειτουργικού κόστους (OCI). Ο αριθμός των παραβάσεων των ορίων εκροής υπολογίζεται για τη μέση τιμή των συγκεντρώσεων εκροής. Για κάθε περίπτωση έχουν ληφθεί τιμές από 7 ημέρες. Τα επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων εκροής φαίνονται στον Πίνακα 2.4 (Alex, et al., 2008).

Πίνακας 2.4: Επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων στην εκροή του συστήματος κατά το BSM1 και BSM2. Πηγή: (Alex, et al., 2008) (Jeppsson, et al., 2007),

Ρύποι	Επιτρεπτές τιμές
N_{tot}	$< 18 \text{ g N m}^{-3}$
COD_{tot}	$< 100 \text{ g COD m}^{-3}$
S_{NH}	$< 4 \text{ g N m}^{-3}$
T_{SS}	$< 30 \text{ g SS m}^{-3}$
BOD_5	$< 10 \text{ g BOD m}^{-3}$

Το BSM2 δημοσιεύτηκε το 2007 και έχει σαν βάση του το BSM1. Ωστόσο, σε αντίθεση με το BSM1 που περιλαμβάνει μόνο τον βιολογικό αντιδραστήρα και τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, το BSM2 περιλαμβάνει όλες τις μονάδες που συνθέτουν μια ΕΕΛ (Jeppsson, et al., 2007). Οι επιπλέον μονάδες που περιλαμβάνει το BSM2 σε σχέση με το BSM1 είναι οι μονάδες προεπεξεργασίας, η δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης και η γραμμή επεξεργασίας λύσος με παχυντή βαρύτητας, αναερόβιο χωνευτή, μονάδα αφυδάτωσης και η αποθηκευτική δεξαμενή για ελεγχόμενες αντλήσεις (Jeppsson, et al., 2007).

Η δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης θεωρείται ότι απομακρύνει το 50% των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) και δεν συντελείται κάποια βιολογική διεργασία σε αυτήν. Για τον βιολογικό αντιδραστήρα και τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης ισχύει ότι και για το BSM1. Ο παχυντής βαρύτητας θεωρείται ότι λειτουργεί συνεχώς και ιδανικά, απομακρύνει το 98% των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) και δεν συντελείται κάποια βιολογική διεργασία σε αυτόν. Τέλος, ο αναερόβιος χωνευτής λειτουργεί σύμφωνα με τροποποιημένο μοντέλο ADM1 των (Bastone, et al., 2002) ενώ για τη μονάδα αφυδάτωσης ισχύει ότι και για τον παχυντή βαρύτητας (Jeppsson, et al., 2007).

Υπενθυμίζεται ότι στο BSM1 η περίοδος προσομοίωσης για την εκτίμηση της απόδοσης της εγκατάστασης είναι μία εβδομάδα (Jeppsson, et al., 2007). Ένας λόγος που απαιτείται μεγαλύτερο διάστημα προσομοίωσης στο BSM2 είναι η ύπαρξη του αναερόβιου χωνευτή.

Ο αναερόβιος χωνευτής επηρεάζεται από τη θερμοκρασία των λυμάτων. Με την προσομοίωση για έναν χρόνο συμπεριλαμβάνονται όλες οι εποχικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (Σαραντόπουλος, 2015).

Οι δείκτες απόδοσης του συστήματος για τα διάφορα σενάρια που εφαρμόζονται σύμφωνα με το BSM2 είναι και πάλι ο αριθμός των παραβάσεων των ορίων εκροής που υπολογίζεται όπως στο BSM1, ο δείκτης ποιότητας εκροής (EQI) και ο δείκτης λειτουργικού κόστους (OCI) ο οποίο λαμβάνει υπόψη του δύο παραμέτρους παραπάνω από ότι στο BSM1 όπως εξηγείται αναλυτικά στην ενότητα 2.1.4 (Jeppsson, et al., 2007).

2.1.4 Δείκτες εκτίμησης απόδοσης της ΕΕΛ EQI και OCI

Οι δείκτες εκτίμησης της απόδοσης των προσομοιούμενων εγκαταστάσεων κάτω από την εφαρμογή διαφόρων στρατηγικών ελέγχου των λειτουργιών τους, απλοποιούν τον τρόπο ερμηνείας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Χωρίς τον ορισμό αυτών των δεικτών δε θα ήταν εύκολο να ερμηνευτεί ο μεγάλος όγκος αποτελεσμάτων που προκύπτει από την προσομοίωση και να γίνουν συγκρίσεις. Οι δείκτες αυτοί είναι «κλειδιά» που αντιπροσωπεύουν το σύστημα και την κατάστασή του μετά την εφαρμογή οποιουδήποτε σεναρίου (Jeppsson, et al., 2007).

Ο Δείκτης Ποιότητας Εκροής (EQI) δείχνει τα Kg ρυπαντικού φορτίου που εξέρχονται κάθε μέρα από την ΕΕΛ, μέσω της διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων της εγκατάστασης, αφού έχει προηγηθεί η επεξεργασία των λυμάτων περνώντας διαδοχικά από προεπεξεργασία, πρωτοβάθμια καθίζηση, βιολογικό καθαρισμό και δευτεροβάθμια καθίζηση. Τα Kg ρυπαντικού φορτίου που εξέρχονται από την εγκατάσταση καταλήγουν σε υδάτινους αποδέκτες.

Η σχέση υπολογισμού για το δείκτη (EQI) είναι η εξής:

$$EQI=(B_{TSS} \cdot TSS + B_{COD} \cdot COD + B_{TKN} \cdot S_{TKN} + B_{NO} \cdot S_{NO} + B_{BOD5} \cdot BOD_5) \cdot Q/1000 \quad (2.1)$$

Όπου το EQI έχει μονάδες Kg Pollution / d, οι όροι TSS, COD, S_{TKN} , S_{NO} και BOD_5 είναι εκφρασμένοι σε mg/L και η παροχή Q σε m^3/d .

Οι συντελεστές B_{xxx} είναι συντελεστές βαρύτητας. Έχουν μονάδες g Pollution / g και μετατρέπουν τον κάθε όρο σε ισοδύναμους όρους ρύπανσης (Alex, et al., 2008). Οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας κατά το BSM1 και για το BSM2 φαίνονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Τιμές των συντελεστών βαρύτητας του δείκτη EQI για το BSM1 και το BSM2

B_{xxx} (gPollution /g)	TSS	COD	S_{TKN}	S_{NO}	BOD_5
BSM1	2,0	1,0	30,0	10,0	2,0
BSM2	2,0	1,0	20,0	20,0	2,0

Οι όροι που περιλαμβάνονται στο δείκτη EQI είναι αυτοί των οποίων η διάθεση στους υδάτινους αποδέκτες έχει τις σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις.

Για δυναμικές συνθήκες προσομοίωσης ο δείκτης EQI υπολογίζεται ως η μέση τιμή των τιμών του δείκτη κατά την περίοδο προσομοίωσης, η οποία για το BSM1 είναι μία εβδομάδα ενώ για το BSM2 είναι ένας χρόνος.

Ο Δείκτης Λειτουργικού Κόστους (OCI) είναι ένα άθροισμα από σταθμισμένους όρους κόστους της εγκατάστασης (Vrecko, Gernaey, Rosen, & Jeppsson, 2006).

Η έκφρασή του διαφέρει για το BSM1 και το BSM2.

Στο BSM1 η σχέση του OCI είναι η εξής:

$$OCI=AE+PE+5 \cdot SP+3 \cdot EC+ME \quad (2.2)$$

και έχει μονάδες d^{-1} .

Ο όρος AE είναι εκφρασμένος σε KWh/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για αερισμό στον βιολογικό αντιδραστήρα. Ο όρος PE είναι εκφρασμένος σε KWh/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για άντληση προκειμένου να γίνει η εσωτερική και εξωτερική ανακυκλοφορία και για την άντληση της περίσσειας ιλύος. Ο όρος SP εκφράζεται σε Kg TSS/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για τη διάθεση της ιλύος που παράγεται τελικά από την εγκατάσταση (Alex, et al., 2008) Ο συντελεστής του όρου SP χρησιμοποιείται για την μετατροπή του σε ισοδύναμους όρους ενέργειας. Ο όρος EC εκφράζεται σε Kg COD/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για την εξωτερική προσθήκη άνθρακα στις ανοξικές δεξαμενές ώστε να βελτιωθεί η διαδικασία της απονιτροποίησης (Alex, et al., 2008). Τέλος, ο όρος ME εκφράζεται σε KWh/d και

αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για ανάμειξη στις ανοξικές δεξαμενές προκειμένου να αποφευχθεί η καθίζηση (Alex, et al., 2008).

Παρότι το BSM1 δεν λαμβάνει υπόψη του τη γραμμή ιλύος στο σύστημα που προσομοιώνει, εντούτοις στο OCI περιλαμβάνει τους όρους που αντιστοιχούν στην επεξεργασία της ιλύος (Vrecko, Gernaey, Rosen, & Jeppsson, 2006).

Στο BSM2 η σχέση του OCI είναι η εξής:

$$OCI = AE + PE + 3 \cdot SP + 3 \cdot EC + ME - 6 \cdot MP + HE^{net} \quad (2.3)$$

Για τους όρους AE και EC ισχύει ό,τι αναφέρθηκε στην περιγραφή τους στο BSM1.

Ο όρος PE πλέον περιλαμβάνει και την απαιτούμενη ενέργεια για άντληση της ιλύος από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης και για την άντληση των στραγγιδίων από τον παχυντή και τη μονάδα αφυδάτωσης (Vrecko, Gernaey, Rosen, & Jeppsson, 2006). Ο όρος SP έχει πλέον συντελεστή 3 αντί για 5 που είχε στο BSM1 ενώ ο όρος ME πλέον περιλαμβάνει και την απαιτούμενη ενέργεια για ανάμειξη στον αναερόβιο χωνευτή.

Επιπλέον, ο δείκτης OCI για το BSM2 περιλαμβάνει δύο ακόμα όρους, το κόστος θέρμανσης του αναερόβιου χωνευτή και το οικονομικό όφελος από την ανάκτηση ενέργειας από τον αναερόβιο χωνευτή. Το οικονομικό όφελος MP εκφράζεται σε Kg CH₄/d και αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από τη μετατροπή του μεθανίου μέσω κινητήρα αερίου, το οποίο παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση. Ο συντελεστής 6 δηλώνει ότι περίπου το 50% του μεθανίου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια (Vrecko, Gernaey, Rosen, & Jeppsson, 2006).

Το κόστος θέρμανσης HE^{net} εκφράζεται σε KWh/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του αναερόβιου χωνευτή σε περίπτωση που η ανάγκη αυτή δεν καλύπτεται από τη θερμική ενέργεια που ανακτάται από το μεθάνιο που παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση (Vrecko, Gernaey, Rosen, & Jeppsson, 2006).

2.2 Μηχανισμοί παραγωγής αερίων θερμοκηπίου (GHG) από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων

2.2.1 Εισαγωγή

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη είναι αναμφισβήτητη και μάλιστα κάποιες από τις συνέπειες στην κλιματική αλλαγή είναι πρωτοφανείς σε βάθος δεκαετιών ή και χιλιετιών. Τέτοιες αλλαγές είναι η αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, η μείωση της χιονόπτωσης και του πάγου, η αύξηση της στάθμης της θάλασσας και οι αυξανόμενες συγκεντρώσεις των αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Η κύρια αιτία για την υπερθέρμανση του πλανήτη από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα είναι με 95% βεβαιότητα ο ανθρωπογενής παράγοντας (IPCC, 2013)

Τα αέρια θερμοκηπίου (GHG) συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη επειδή δημιουργούν ένα στρώμα που εμποδίζει την ακτινοβολία της θερμότητας από την επιφάνεια της γης προς την ατμόσφαιρα. Τα GHG που παράγονται κατά τη λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄) και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O).

Το δυναμικό συμβολής του κάθε αερίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Global Warming Potential, GWP) ορίζεται ως ο λόγος της θερμότητας που συγκρατείται από τη μονάδα μάζας του αερίου προς τη θερμότητα που συγκρατείται από τη μονάδα μάζας του CO₂ για κάποια χρονική περίοδο, συνήθως 100 έτη (Δημοπούλου, 2011).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα που υποδεικνύει τη σημαντικότητα του να προβλέπονται και να μειώνονται οι εκπομπές GHG από τις ΕΕΛ είναι η εκτίμηση της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (USEPA, 2006) ότι το N₂O που παράγεται από τις ΕΕΛ αντιστοιχεί στο 3% του συνολικού N₂O που παράγεται από όλες τις πηγές και κατατάσσονται ως ο έκτος σημαντικότερος παράγοντας εκπομπής GHG (Mannina, et al., 2016).

Για να επιτευχθεί η πρόβλεψη και ο περιορισμός της εκπομπής των GHG είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των σταδίων της εγκατάστασης και των διαδικασιών κατά τις οποίες παράγονται, θεωρώντας την ΕΕΛ ως ενιαίο σύστημα και όχι την κάθε μονάδα επεξεργασίας ως ξεχωριστό τμήμα.

Οι εκπομπές χωρίζονται σε άμεσες και έμμεσες. Άμεσες είναι οι εκπομπές των αερίων που παράγονται κατά τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων, κατά την παραγωγή βιοαερίου και από την κατανάλωση χημικών. Οι έμμεσες εκπομπές οφείλονται στην κατανάλωση ενέργειας από την εγκατάσταση και στην διάθεση της ιλύος (C-FOOT_CTRL, 2016).

2.2.2 Μηχανισμοί παραγωγής CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι το κυρίαρχο ανθρωπογενές αέριο θερμοκηπίου επειδή παράγεται από πολλές δραστηριότητές του. Είναι το αέριο αναφοράς συγκριτικά με το οποίο εκφράζεται το δυναμικό συμβολής του κάθε αερίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και επομένως έχει GWP ίσο με 1 (IPCC, 2013).

Συνοπτικά, στις ΕΕΛ διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) εκπέμπεται από

Άμεσες πηγές:

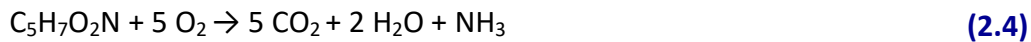
- στην ανοξική δεξαμενή από τις βιολογικές διεργασίες των ετεροτροφικών μικροοργανισμών
- στην δεξαμενή αερισμού από τις βιολογικές διεργασίες των ετεροτροφικών και αυτοτροφικών μικροοργανισμών
- στον αναερόβιο χωνευτή από το βιοαέριο που παράγεται
- κατανάλωση χημικών στη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, στην αναερόβια χώνευση, στην πάχυνση και αφυδάτωση της ιλύος και στη μονάδα απολύμανσης.

Έμμεσες πηγές:

- από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται εκτός εγκατάστασης
- από την μεταφορά της περίσσειας ιλύος στον τόπο διάθεσής της και από την αερόβια και αναερόβια αποσύνθεση της.

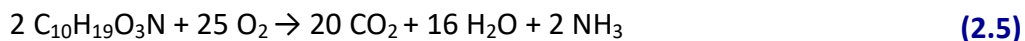
Πιο αναλυτικά, οι βιολογικές διεργασίες στην δεξαμενή αερισμού είναι η ενδογενής αποσύνθεση της βιομάζας, η ενδογενής αναπνοή και η παραγωγή βιομάζας ενώ στην ανοξική δεξαμενή είναι η απομάκρυνση του αζώτου.

Κατά την αποσύνθεση της βιομάζας για κάθε 1 Kg βιομάζας (C₅H₇O₂N) παράγονται 1,947 Kg CO₂ σύμφωνα με τη σχέση (2.4) (Δημοπούλου, 2011):



Ωστόσο, το παραγόμενο CO₂ από την παραπάνω εξίσωση δεν συνυπολογίζεται τελικά στην εκπομπή CO₂, αφού κατά την αποσύνθεση της βιομάζας παράγεται αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη, η οποία στη συνέχεια υδρολύεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη ύλη και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή CO₂.

Για την παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού απαιτείται να γίνει οξείδωση του οργανικού φορτίου (BOD) κατά την οποία παράγεται διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Συγκεκριμένα, για κάθε 1 Kg O₂ που καταναλώνεται για την οξείδωση παράγονται 1,1 Kg CO₂ σύμφωνα με τη σχέση (2.2) (Δημοπούλου, 2011):



όπου, C₁₀H₁₉O₃N η στοιχειακή σύνθεση του BOD. Επίσης, η παραπάνω σχέση (2.5) ισχύει και για την παραγωγή CO₂ λόγω ενδογενούς αναπνοής.

Η κατανάλωση O₂ για την οξείδωση του BOD και για την ενδογενή αναπνοή υπολογίζεται σύμφωνα με τον στοιχειομετρικό πίνακα του ASM1 (Πίνακας 2.1) από τη σχέση :

$$O_2 \text{ παραγ.βιομάζας} = \frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot \rho_1(I) \cdot V(I) \quad (2.6)$$

η οποία δίνει Kg O₂ ανά χρονικό βήμα για μια δεξαμενή I. Με τον όρο ρ₁ συμβολίζεται η κινητική του Πίνακας 2.1 που αντιστοιχεί στην πρώτη διεργασία του.

Επομένως, το CO₂ που παράγεται από την παραγωγή βιομάζας λόγω οξείδωσης του οργανικού φορτίου και λόγω ενδογενούς αναπνοής σε Kg ανά χρονικό βήμα για μια δεξαμενή I, είναι:

$$CO_2 \text{ παραγ.βιομάζας} = 1,1 \cdot \frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot \rho_1(I) \cdot V(I) \quad (2.7)$$

Κατά την απομάκρυνση του αζώτου, δηλαδή τη διαδικασία της απονιτροποίησης στην ανοξική δεξαμενή, γίνεται παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας κατά την οποία οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τα νιτρικά ιόντα (NO₃⁻) για την οξείδωση του οργανικού

φορτίου (BOD), εφόσον δεν υπάρχει οξυγόνο (O₂). Το αποτέλεσμα της απονιτροποίησης είναι η μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο (N₂) και η παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας και CO₂ από την οξείδωση του BOD.

Η κατανάλωση NO₃⁻ για την οξείδωση του BOD υπολογίζεται σύμφωνα με τον στοιχειομετρικό πίνακα του ASM1 (Πίνακας 2.1) από τη σχέση :

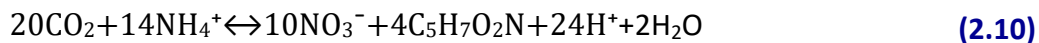
$$NO_3 \text{ απονιτροποίησης} = \frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H} \cdot \rho_2(I) \cdot V(I) \quad (2.8)$$

Για τον υπολογισμό της εκπομπής CO₂ τα νιτρικά μετατρέπονται σε ισοδύναμους όρους O₂ με αντιστοιχία 2,86 Kg NO₃⁻/Kg O₂. Επομένως, το CO₂ που παράγεται σε Kg ανά χρονικό βήμα για μια δεξαμενή I είναι:

$$CO_2 \text{ απονιτροποίησης} = 1,1 \cdot 2,86 \cdot \frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H} \cdot \rho_2(I) \cdot V(I) \quad (2.9)$$

Τέλος, στην αερόβια δεξαμενή εκτός από παραγωγή CO₂ έχουμε και σημαντική κατανάλωση του μέσω της διαδικασίας της νιτροποίησης.

Αν θεωρήσουμε ότι η νιτροποίηση γίνεται σε ένα στάδιο όπως θεωρείται στο ASM1 τότε για κάθε 4,49 Kg N που οξειδώνονται καταναλώνεται 1 Kg CO₂ σύμφωνα με τη σχέση (C-FOOT_CTRL, 2016):



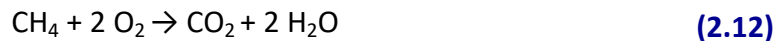
Επομένως, σύμφωνα και με τη σχέση κατανάλωσης N για τη νιτροποίηση όπως προκύπτει από το στοιχειομετρικό πίνακα του ASM1 η κατανάλωση του CO₂ σε Kg ανά χρονικό βήμα για μια δεξαμενή I προκύπτει από τη σχέση :

$$CO_2 \text{ νιτροποίησης} = -4,49 \cdot \frac{1}{Y_A} \cdot \rho_3(I) \cdot V(I) \quad (2.11)$$

Τέλος, άμεση εκπομπή του CO₂ συμβαίνει και στον αναερόβιο χωνευτή. Στον αναερόβιο χωνευτή παράγεται βιοαέριο που αποτελείται από CO₂ και CH₄. Οι αναλογίες τους στη σύνθεση του βιοαερίου κυμαίνονται από 50-75 % για το CH₄ και από 25-50 % για το CO₂. Από το βιοαέριο που παράγεται η εγκατάσταση παράγει θερμική και ηλεκτρική ενέργεια

που προκύπτει από την καύση του μεθανίου που περιέχεται στο βιοαέριο. Εκπομπές CO₂ συμβαίνουν κατά την απευθείας απελευθέρωση βιοαερίου στην ατμόσφαιρα λόγω διαρροής από τον αναερόβιο χωνευτή και ως προϊόν της καύσης του μεθανίου που περιέχει το βιοαέριο (C-FOOT_CTRL, 2016).

Η καύση του CH₄ περιγράφεται από τη σχέση (2.12). Παρατηρούμε ότι για κάθε 1 Kg CH₄ που καταναλώνεται παράγονται 2,75 Kg CO₂.



Παρότι με την καύση του CH₄ εκλύεται CO₂ στην ατμόσφαιρα τα οφέλη αντισταθμίζουν αυτήν την περιβαλλοντική επίπτωση. Παράγεται ενέργεια η οποία απαιτείται για την λειτουργία της εγκατάστασης που σημαίνει ότι αν δεν παραγόταν στην εγκατάσταση θα προερχόταν από τη συνήθη πηγή ενέργειας δηλαδή την καύση ορυκτού καυσίμου κατά την οποία εκλύεται και πάλι CO₂. Οπότε η εκπομπή του CO₂ λόγω καύσης είναι κάτι που θα συμβεί σε κάποια ποσότητα με τον έναν ή τον άλλον τρόπο. Ωστόσο, η παραγωγή ενέργειας από την καύση του CH₄ που προέρχεται από την αναερόβια χώνευση είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας σε αντίθεση με την καύση ορυκτών καυσίμων που δεν είναι. Τέλος, αν δεν καιγόταν το CH₄ θα απελευθερωνόταν στην ατμόσφαιρα και αυτό έχει μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς το CH₄ συνεισφέρει κατά πολύ περισσότερο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Chynoweth, John, & Legrand, 2001).

2.2.3 Μηχανισμοί παραγωγής N₂O

Το N₂O είναι το κρισιμότερο GHG που παράγεται από τις ΕΕΛ. Το δυναμικό συμβολής του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (GWP) είναι ίσο με 265, δηλαδή 265 φορές μεγαλύτερο από του CO₂, και η διάρκεια ζωής του στην ατμόσφαιρα είναι 114 χρόνια (Massara, et al., 2017).

Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπής του, με εκπομπές 7±1 Tg/yr όταν οι φυσικές πηγές εκπομπής είναι περίπου 15 Tg/yr (Khalil & Rasmussen, 1992). Η παγκόσμια αύξησή του κάθε χρόνο έχει εκτιμηθεί 0,31% και οι ΕΕΛ συμβάλλουν σε αυτήν την αύξηση (Zhou, Pijuan, Zeng, & Zhiguo, 2008).

Λόγω του υψηλού δυναμικού συμβολής του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ακόμα και μια χαμηλή εκπομπή του από τις ΕΕΛ συμβάλει σημαντικά στο GHG αποτύπωμα τους (Sun,

Bao, & Sun, 2014). Αύξηση 1% στην εκπομπή του N_2O από την επεξεργασία των λυμάτων σημαίνει αύξηση 30% στο αποτύπωμα άνθρακα των ΕΕΛ (Zhen, Guan, Wu, & Zhan, 2014) αναφερόμενοι στους (Law et al., (2012)).

Στην ΕΕΛ το N_2O παράγεται στον βιολογικό αντιδραστήρα κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης στην αερόβια δεξαμενή και κατά τη διαδικασία της απονιτροποίησης στην ανοξική δεξαμενή, δηλαδή τις δύο απαραίτητες διεργασίες για την απομάκρυνση του αζώτου από τα λύματα.

Κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης, με την παρουσία O_2 τα αυτοτροφικά βακτήρια που οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο (AOB) μετατρέπουν την αμμωνιακό άζωτο (NH_3) σε νιτρώδη (NO_2^-) με ενδιάμεσο στάδιο την υδροξυλαμίνη (NH_2OH). Έπειτα, τα αυτοτροφικά βακτήρια που οξειδώνουν τα νιτρώδη (NOB) πάλι με απαραίτητη την παρουσία O_2 μετατρέπουν τα NO_2^- σε νιτρικά ιόντα (NO_3^-) και ολοκληρώνεται η νιτροποίηση.

Αυτή είναι η ολοκληρωμένη νιτροποίηση (nitrification) και παραγωγή N_2O συμβαίνει κατά την οξείδωση της NH_2OH σε NO_2^- και συγκεκριμένα από το ένζυμο HAO.

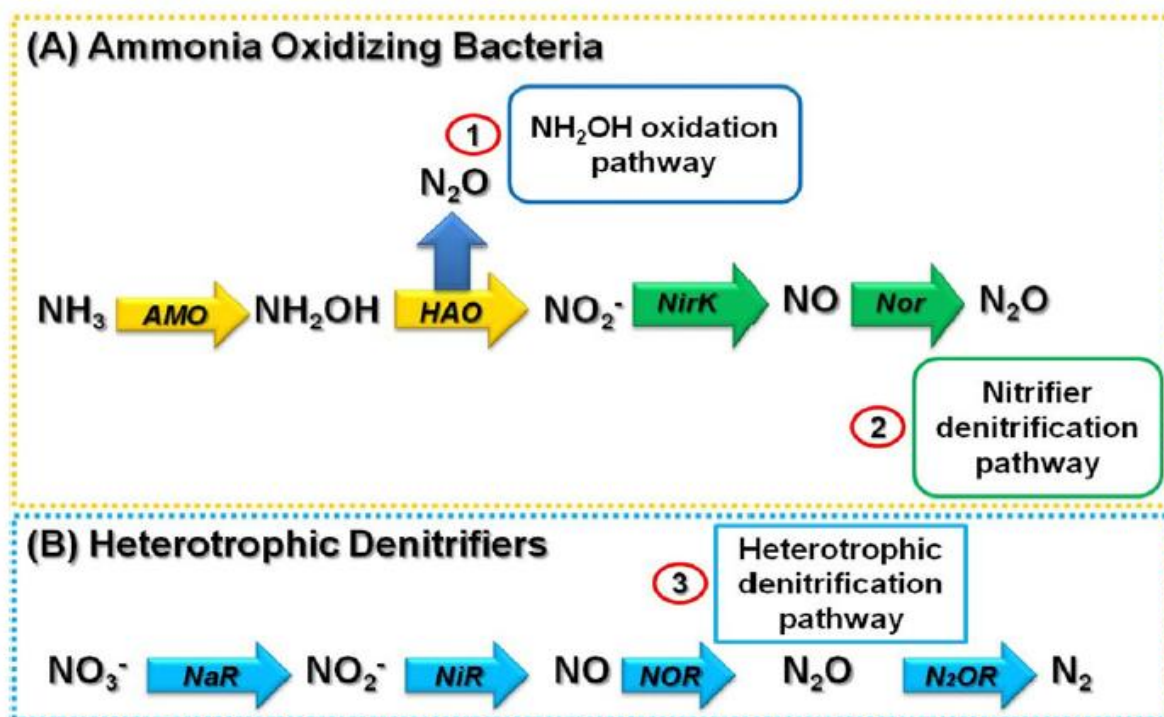
Εκτός από τη νιτροποίηση μπορεί να συμβεί και η νιτρωδοποίηση (nitritation). Η νιτρωδοποίηση πραγματοποιείται και πάλι από τα AOB και λειτουργεί σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου από ότι η νιτροποίηση. Ακόμα, στη νιτρωδοποίηση το αμμωνιακό άζωτο οξειδώνεται σε νιτρώδη (NO_2^-) και η οξείδωση σταματάει εκεί δηλαδή δεν οξειδώνονται τα NO_2^- σε NO_3^- (Massara, et al., 2017) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1(A) που δείχνει αναλυτικά τα στάδια της νιτροποίησης και απονιτροποίησης και παραγωγής N_2O .

Κατά τη νιτρωδοποίηση και πάλι μπορεί να γίνει παραγωγή N_2O κατά την οξείδωση της NH_2OH σε NO_2^- (NH_2OH oxidation pathway). Ωστόσο, με την προϋπόθεση χαμηλής συγκέντρωσης O_2 και με την υψηλή συγκέντρωση των NO_2^- λαμβάνει χώρα η απονιτροποίηση από τους νιτροποιητές και συγκεκριμένα από τα ένζυμα NirK και Nor όπως φαίνεται Σχήμα 2.1 (Nitrifier denitrification pathway). Η απονιτροποίηση από τους νιτροποιητές έχει σαν τελικό στάδιο την παραγωγή N_2O . Το μονοπάτι της απονιτροποίησης από τους νιτροποιητές αν και δε συμβάλει σημαντικά στην απομάκρυνση του αζώτου είναι σημαντικό για τις εκπομπές N_2O (Massara, et al., 2017).

Επομένως, υπάρχουν δύο διαφορετικές διαδρομές παραγωγής N_2O από τους AOB και γενικά δεν είναι απλό να προσδιορίσουμε σε ποια από τις δύο οφείλεται κάθε φορά. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι για χαμηλή συγκέντρωση O_2 και υψηλή συγκέντρωση NO_2^- επικρατέστερη είναι η διαδρομή της απονιτροποίησης των νιτροποιητών ενώ η διαδρομή της οξείδωσης της NH_2OH είναι επικρατέστερη για υψηλές συγκεντρώσεις O_2 και ταυτόχρονα χαμηλές συγκεντρώσεις NO_2^- (Massara, et al., 2017) αναφερόμενοι στους (Peng et al.,(2015)) και Xie et al., (2012))).

Τέλος, N_2O παράγεται και κατά τη διαδικασία της απονιτροποίησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1(B). Η απονιτροποίηση πραγματοποιείται από τα ετεροτροφικά βακτήρια, στην ανοξική δεξαμενή δηλαδή με απουσία O_2 . Το στάδιο κατά το οποίο παράγεται N_2O είναι η οξείδωση του νιτρικού οξειδίου NO που καταλύεται από το ένζυμο NOR ενώ το κρίσιμο στάδιο είναι η μετέπειτα οξείδωση του N_2O σε αέριο άζωτο N_2 η οποία καταλύεται από το ένζυμο N_2OR .

Το ένζυμο N_2OR είναι ευαίσθητο στην ύπαρξη O_2 και με την παρουσία του μειώνεται η συγκέντρωσή του ενζύμου (Zhou, Pijuan, Zeng, & Zhiguo, 2008) με αποτέλεσμα να μην γίνεται η οξείδωση του N_2O σε N_2 . Επομένως, με παρουσία O_2 η απονιτροποίηση δεν ολοκληρώνεται αλλά σταματάει στο στάδιο που έχει δημιουργηθεί το N_2O .



Σχήμα 2.2: Αναλυτικά στάδια νιτροποίησης (A) και απονιτροποίησης (A,B) και παραγωγής N₂O (Πηγή: (Massara, et al., 2017))

Η εκτίμηση των εκπομπών N₂O από τις ΕΕΛ δεν είναι εύκολη. Είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO), η τιμή του pH, ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N) των λυμάτων. Οι εκτιμήσεις που γίνονται έχουν μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας (Tumendelger, Toyoda, & Yoshida, 2014).

2.2.4 Μηχανισμοί παραγωγής CH₄

Το CH₄ έχει δυναμικό συμβολής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (GWP) είναι ίσο με 28, δηλαδή 28 φορές μεγαλύτερο από του CO₂ (Massara, et al., 2017).

Από τις ΕΕΛ εκπέμπεται από τον αναερόβιο χωνευτή και από τη διάθεση της τελικής ιλύος, που προκύπτει αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία, σε εκτάσεις γης.

Στον αναερόβιο χωνευτή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παράγεται βιοαέριο το οποίο περιέχει 50-75% CH₄. Ένα ποσοστό του βιοαερίου που παράγεται απελευθερώνεται απευθείας στην ατμόσφαιρα λόγω διαρροής από τον αναερόβιο χωνευτή. Με αυτόν τον τρόπο η ατμόσφαιρα επιβαρύνεται με CH₄ (C-FOOT_CTRL, 2016).

Από τη διάθεση της τελικής ιλύος σε εκτάσεις γης και πάλι ο μηχανισμός εκπομπής CH₄ είναι ίδιος δηλαδή η αναερόβια χώνευση κατά την οποία παράγεται CH₄ το οποίο εκλύεται απευθείας στην ατμόσφαιρα αφού πλέον ο χώρος είναι ανοιχτός.

3. Μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης λειτουργίας Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων

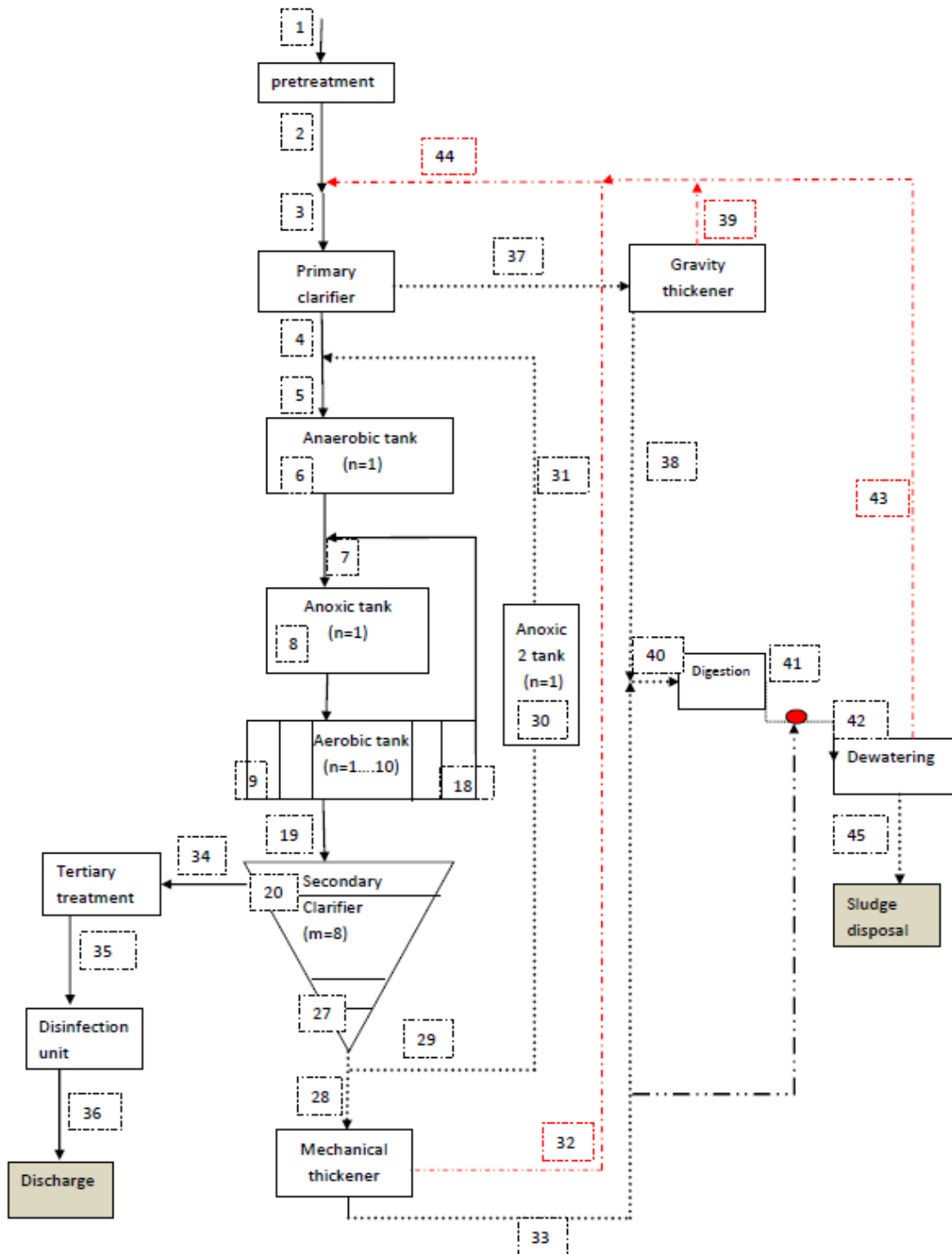
3.1 Εισαγωγή

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία για την προσομοίωση της ΕΕΛ, προκειμένου να μελετηθεί η δυνατότητα μείωσης της εκπομπής GHG με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του δείκτη κόστους λειτουργίας (OCI) και του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI), είναι ένα τροποποιημένο μοντέλο των (Σαραντόπουλος, 2015) και (Koumaki, et al., 2017), που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του Τομέα Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Βασίζεται στο πρότυπο για συστήματα ολοκληρωμένης προσομοίωσης ΕΕΛ Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2) και αποτελείται από μονάδες προεπεξεργασίας, πρωτοβάθμιας καθίζησης, αναερόβιου αντιδραστήρα, ανοξικού αντιδραστήρα, αερόβιου αντιδραστήρα, δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης, μονάδας απολύμανσης με χρήση υποχλωριώδους νατρίου (NaCl), βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης, αναερόβιας χώνευσης, αφυδάτωσης και επεξεργασίας στραγγιδίων. Για την προσομοίωση του βιολογικού αντιδραστήρα το μοντέλο στηρίζεται στο μοντέλο ενεργού ιλύος ASM1, για την προσομοίωση της δευτεροβάθμιας καθίζησης θεωρείται μονοδιάστατο μοντέλο καθίζησης που στηρίζεται στη ζωνική καθίζηση, για την προσομοίωση της αναερόβιας χώνευσης γίνεται εκτίμηση των βιολογικών διεργασιών που συντελούνται (μέσω απλουστευμένου μοντέλου, Anaerobic Digestion Model No1, ADM1) ενώ σε όλες τις υπόλοιπες μονάδες θεωρείται ισοζύγιο μαζών (Σαραντόπουλος, 2015).

Το μοντέλο των (Σαραντόπουλος, 2015) και (Koumaki, et al., 2017) υπολογίζει τις εκπομπές των GHG που κυρίως παράγονται στην ΕΕΛ, το δείκτη ποιότητας εκροής των επεξεργασμένων υδάτων (EQI) ενώ στην παρούσα διπλωματική έγινε η περαιτέρω τροποποίηση του μοντέλου με στόχο να υπολογίζεται επιπροσθέτως ο δείκτης λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης (OCI).

3.2 Περιγραφή μοντέλου

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα της εγκατάστασης που προσομοιώνεται από το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία.



Σχήμα 3.1: Σχεδιάγραμμα την εγκατάστασης που προσομοιώνεται από το μοντέλο

Στην παρούσα προσομοίωση, μελετήθηκε ένα πιο απλό σχήμα επεξεργασίας, στο οποίο δεν συμπεριλήφθηκε η ύπαρξη αναερόβιου βιοαντιδραστήρα (θέση 6) και ανοξικής δεξαμενής (θέση 30) για την επεξεργασία της ανακυκλοφορούμενης ιλύος. Στο βιολογικό αντιδραστήρα ο όγκος της ανοξικής δεξαμενής (θέση 8) είναι 7880 m^3 , στον αερόβιο αντιδραστήρα λειτουργούν 5 διαμερίσματα, τα τέσσερα πρώτα με όγκο 3716 m^3 το καθένα και το πέμπτο διαμέρισμα με 695 m^3 . Από τα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα αερίζονται μόνο τα 4 πρώτα και το πέμπτο είναι διαμέρισμα αποξυγόνωσης. Ο όγκος του αναερόβιου χωνευτή είναι 6000 m^3 . Η επιφάνεια της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι 1500 m^2 . Η επιφάνεια της δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης είναι 6000 m^2 και το ύψος της είναι $4,5 \text{ m}$. Η επιφάνεια του παχυντή βαρύτητας της πρωτοβάθμιας λάσπης είναι 100 m^2 .

Το μοντέλο εξάγει αποτελέσματα που προκύπτουν μετά από 100 ημέρες προσομοίωσης της λειτουργίας της εγκατάστασης, δηλαδή όταν πλέον έχουν επιτευχθεί σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Η παροχή εισόδου της εγκατάστασης είναι 62000 m^3 ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Η παροχή εσωτερικής ανακυκλοφορίας είναι (από τη θέση 18 στη θέση 7) 2,5 φορές μεγαλύτερη από την παροχή εισόδου ενώ η εξωτερική ανακυκλοφορία (από τη θέση 29 στη θέση 5) είναι το 80% της παροχής εισόδου. Η θερμοκρασία των λυμάτων θεωρείται $20 \text{ }^\circ\text{C}$ και το pH 7. Οι προκαθορισμένες τιμές των λειτουργικών παραμέτρων των οποίων εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής τους στην απόδοση της εγκατάστασης είναι $sr=50\%$, $CR=95\%$, $DO=2 \text{ mg/L}$ ίδια σε όλα τα αεριζόμενα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα, $SRT=10$ ημέρες και θεωρείται ότι δεν πραγματοποιείται επεξεργασία των στραγγιδίων της αφυδάτωσης.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων

Συστατικά	Περιγραφή	τιμή
Q	Εισερχόμενη παροχή λυμάτων	$62000 \text{ m}^3/\text{d}$
S_i	Αδρανής διαλυμένη οργανική ύλη	30 mg/L
S_s	Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη	140 mg/L

X_I	Αδρανής σωματιδιακή οργανική ύλη	30 mg COD/L
X_S	Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη	400 mg COD/L
$X_{B,H}$	Ετεροτροφική βιομάζα	28.8 mg COD/L
X_{AOB}	Αυτοτροφική βιομάζα που οξειδώνει το αμμωνιακό άζωτο	0.1 mg COD/L
X_{NOB}	Αυτοτροφική βιομάζα που οξειδώνει τα νιτρώδη	0.1 mg COD/L
S_O	Διαλυμένο οξυγόνο	0,1 mg/L
S_{NO}	Νιτρικό άζωτο	0 mg/L
S_{NH}	Αμμωνιακό άζωτο	40 mg/L
S_{NO_2}	Νιτρώδη	0 mg/L
S_{NO_3}	Νιτρικά	0 mg/L
S_{N_2}	Αέριο άζωτο	0 mg/L
S_{N_2O}	Υποξείδιο του αζώτου	0 mg/L
S_{NH_2OH}	υδροξυλαμίνη	0 mg/L
X_{NV}	Σωματιδιακή ανόργανη ύλη	75 mg/L
S_{ALK}	Αλκαλικότητα	500 mg/L

Για την περιγραφή των διεργασιών της νιτροποίησης και απονιτροποίησης, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα ενδιάμεσα στάδια τους και εκτιμά την παραγωγή N_2O σε αυτά τα ενδιάμεσα στάδια, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.2. Οι κινητικές που προσομοιώνουν τις διεργασίες του συστήματος ενεργού ιλύος στο μοντέλο παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 ενώ στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι τιμές των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.

Πίνακας 3.2: Κινητικές των διεργασιών που συντελούνται στο σύστημα ενεργού ιλύος του μοντέλου

Αερόβια υδρόλυση	$r_1 = K_h \frac{SO}{K_{OH} + SO} \frac{\frac{XS}{XBH}}{K_x + \frac{XS}{XBH}} XBH$
Ανοξική υδρόλυση (NO ₃)	$r_2 = K_h n_{NO3H} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + SO} \frac{SNO3}{K_{NO3} + SNO3} \frac{\frac{XS}{XBH}}{K_x + \frac{XS}{XBH}} XBH$
Ανοξική υδρόλυση (NO ₂)	$r_3 = K_h n_{NO2H} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + SO} \frac{SNO2}{K_{NO2} + SNO2} \frac{\frac{XS}{XBH}}{K_x + \frac{XS}{XBH}} XBH$
Αναερόβια υδρόλυση	$r_4 = K_h n_{fe} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + SO} \frac{SNO2}{K_{NO2} + (SNO3 + SNO2)} \frac{\frac{XS}{XBH}}{K_x + \frac{XS}{XBH}} XBH$
Αερόβια ανάπτυξη με ευκολοδιασπάσιμη οργανική ύλη (ετεροτροφικοί)	$r_5 = m_h \frac{SO}{K_{OH} + SO} \frac{SS}{K_s + SS} \frac{SNH}{K_{NH} + SNH} \frac{SALK}{K_{ALK} + SALK} XBH$
Απονιτροποίηση με ευκολοδιασπάσιμη οργανική ύλη (1 ^ο βήμα NO ₃ -> NO ₂)	$r_6 = m_h n_{NO3D} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + SO} \frac{SNO3}{K_{NO3} + SNO3} \frac{SS}{K_s + SS} \frac{SNH}{K_{NH} + SNH} \frac{SALK}{K_{ALK} + SALK} XBH$
Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μ/ων (NO ₂ -> NO)	$r_7 = m_h n_{G3} \frac{K_{OH3}}{K_{OH3} + SO} \frac{SNO2}{K_{NO2D} + SNO2} \frac{SS}{K_{S3} + SS} \frac{K_{i3NO}}{K_{i3NO} + SNO} XBH$
Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μ/ων (NO-> N ₂ O)	$r_8 = m_h n_{G4} \frac{SS}{K_{S4} + SS} \frac{SNO}{K_{NOD} + SNO} \frac{SNO^2}{K_{i4NO}} \frac{K_{OH4}}{K_{OH4} + SO} XBH$
Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μ/ων (N ₂ O -> N ₂)	$r_9 = m_h n_{G5} \frac{SS}{K_{S5} + SS} \frac{SN2O}{K_{N2OD} + SN2O} \frac{K_{OH5}}{K_{OH5} + SO} \frac{K_{i5NO}}{K_{i5NO} + SNO} XBH$
Φθορά	$r_{10} = b_h \cdot XBH$

ετεροτροφικών μ/ων	
Οξείδωση NH ₃ σε NH ₂ OH με κατανάλωση οξυγόνου	$r_{11} = q_{AOBAMO} \frac{SO}{K_{OHAOB1} + SO} \frac{SNH}{K_{NHAOB} + SNH} X_{AOB}$
Οξείδωση NH ₂ OH σε NO μαζί με κατανάλωση οξυγόνου (και ανάπτυξη AOB)	$r_{12} = m_{AOBHAO} \frac{SO}{K_{OHAOB2} + SO} \frac{SNH2OH}{K_{NH2OHAOB} + SNH2OH} \frac{SNH}{SNH + 10^{-12}} X_{AOB}$
Οξείδωση NO σε NO ₂ μαζί με κατανάλωση οξυγόνου	$r_{13} = q_{AOBHAO} \frac{SO}{K_{OHAOB2} + SO} \frac{SNO}{K_{NOAOBHAO} + SNO} X_{AOB}$
Μείωση NO σε N ₂ O μαζί με οξείδωση NH ₂ OH σε NO ₂ (N ₂ O από διαδικασία NN)	$r_{14} = q_{AOBN2ONN} \frac{SNH2OH}{K_{NH2OHAOB} + SNH2OH} \frac{SNO}{K_{NOAOBNN} + SNO} X_{AOB}$
Μείωση HNO ₂ σε N ₂ O μαζί με οξείδωση NH ₂ OH σε NO ₂ (N ₂ O από διαδικασία ND)	$r_{15} = q_{AOBN2OND} \frac{SNH2OH}{K_{NH2OHAOB} + SNH2OH} \frac{SHNO2}{K_{HNO2AOB} + SHNO2} f^{SO} X_{AOB}$
Αερόβια ανάπτυξη των NOB	$r_{16} = m_{NOB} \frac{SO}{K_{OHNOB} + SO} \frac{SNO2}{K_{NO2NOB} + SNO2} \frac{SALK}{K_{ALKNOB} + SALK} X_{NOB}$
Φθορά των AOB	$r_{17} = b_{AOB} \cdot X_{AOB}$
Φθορά των NOB	$r_{18} = b_{NOB} \cdot X_{NOB}$

Πίνακας 3.3: Τιμές των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο

Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
---------	---------	------

Στοιχειομετρικές Παράμετροι		
Y_H	gr δημιουργούμενου κυττάρου COD . (gr οξειδωμένου COD) ⁻¹	0,60
Y_{AOB}	gr δημιουργούμενου κυττάρου COD . (gr οξειδωμένου NH ₄) ⁻¹	0,18
Y_{NOB}	gr δημιουργούμενου κυττάρου COD . (gr οξειδωμένου NO ₂) ⁻¹	0,15
f_p	Αδιάστατο	0,08
i_{XB}	gr N . (gr COD) ⁻¹ , στη βιομάζα	0,086
i_{XP}	gr N . (gr COD) ⁻¹ , στην ενδογενή μάζα	0,01
i_{NXS}	gr N . (gr COD) ⁻¹ , στην αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη	0,04
i_{NSF}	gr N . (gr COD) ⁻¹ , στο ζυμώσιμο υπόστρωμα	0,03
i_{NSI}	gr N . (gr COD) ⁻¹ , στην διαλυμένη αδρανή οργανική ύλη	0,01
Κινητικές παράμετροι		
n_g	αδιάστατο	1
n_{fe}	αδιάστατο	0.4
μ_H	d ⁻¹	6
b_H	d ⁻¹	0,62
μ_{AOBHAO}	d ⁻¹	0,68
b_{AOB}	d ⁻¹	0,096
μ_{NOB}	d ⁻¹	0,68
b_{NOB}	d ⁻¹	0,096

K_h	gr εύκολα βιοδιασπάσιμου COD . (gr κυττάρου COD d) ⁻¹	3
K_S	gr COD m ⁻³	20
K_{OH}	gr O ₂ m ⁻³	0,2
K_{NH}	gr NH ₃ -N m ⁻³	0,05
K_X	d ⁻¹	0,03
n_{NO3H}	αδιάστατο	0,6
K_{NO3}	gr NO ₃ -N m ⁻³	0,5
n_{NO2H}	αδιάστατο	0,6
K_{NO2}	gr NO ₂ -N m ⁻³	0,5
K_{ALK}	gr ALK m ⁻³	0,082
n_{NO3D}	αδιάστατο	0,8
n_{G3}	αδιάστατο	0,6
K_{OH3}	gr O ₂ m ⁻³	0,1
K_{NO2D}	gr NO ₂ m ⁻³	0,2
K_{S3}	gr SS m ⁻³	20
K_{i3NO}	gr NO m ⁻³	0,5
n_{G4}	αδιάστατο	0,6
K_{S4}	gr SS m ⁻³	20
K_{NOD}	gr NO m ⁻³	0,05
K_{i4NO}	gr NO m ⁻³	0,3
K_{OH4}	gr O ₂ m ⁻³	0,1

n_{G5}	αδιάστατο	0,6
K_{s5}	gr SS m ⁻³	20
K_{N2OD}	gr N ₂ O m ⁻³	0,05
K_{OH5}	gr O ₂ m ⁻³	0,1
K_{i5NO}	gr NO m ⁻³	0,075
q_{AOBAMO}	d ⁻¹	5,2008
K_{OHAOB1}	gr O ₂ m ⁻³	1,0
K_{NHAOB}	gr NH-N m ⁻³	0,2
$K_{NOAOBHAO}$	gr NO m ⁻³	0,0003
K_{OHAOB2}	gr O ₂ m ⁻³	0,6
$K_{NH2OHAOB}$	gr NH ₂ OH m ⁻³	0,9
$q_{AOBN2ONN}$	d ⁻¹	0,0078
$K_{NOAOBNN}$	gr NO m ⁻³	0,008
$K_{HNO2AOB}$	gr HNO ₂ m ⁻³	0,004
K_{OHNOB}	gr O ₂ m ⁻³	1,2
K_{NO2NOB}	gr NO ₂ m ⁻³	0,5
K_{ALKNOB}	gr ALK m ⁻³	0,082
$K_{OHAOBND}$	gr O ₂ m ⁻³	0,5
K_{iOHAOB}	gr O ₂ m ⁻³	0,8
$q_{AOBN2OND}$	d ⁻¹	1,3008
q_{AOBHAO}	d ⁻¹	5,2008

3.3 Δείκτες εκτίμησης απόδοσης της προσομοιούμενης ΕΕΛ EQI και OCI όπως ορίζονται στο μοντέλο

EQI

Ο δείκτης ποιότητας εκροής EQI ορίστηκε στο μοντέλο προσομοίωσης όπως ακριβώς ορίζεται στην παράγραφο 2.1.4.

OCI

Ο δείκτης λειτουργικού κόστους (OCI) της προσομοιούμενης εγκατάστασης ορίστηκε στο μοντέλο από τη σχέση

$$OCI=AE+PE+3\cdot SP+ME-BIO_ELEC+HE_{net} \quad (3.1)$$

Ο όρος AE είναι εκφρασμένος σε KWh/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για αερισμό στον βιολογικό αντιδραστήρα. Ο όρος PE είναι εκφρασμένος σε KWh/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για άντληση από το σύνολο της εγκατάστασης. Ο όρος SP εκφράζεται σε Kg TSS/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για τη διάθεση της ιλύος που παράγεται τελικά από την εγκατάσταση. Ο συντελεστής του όρου SP χρησιμοποιείται για την μετατροπή του σε ισοδύναμους όρους ενέργειας. Ο όρος ME εκφράζεται σε KWh/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για ανάμειξη στις ανοξικές δεξαμενές, στον αναερόβιο χωνευτή και στη μονάδα απολύμανσης. Ο όρος ME δεν περιλαμβάνει ενέργεια ανάμειξης στον αερόβιο αντιδραστήρα καθώς θεωρείται ότι η ανάμειξη γίνεται από τις φυσαλίδες οξυγόνου κατά τον αερισμό. Ο όρος BIO_ELEC είναι εκφρασμένος σε KWh/d και αντιπροσωπεύει την ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη λειτουργία του αναερόβιου χωνευτή. Ο όρος HE_{net} είναι εκφρασμένος σε KWh/d και αντιπροσωπεύει την ενέργεια θέρμανσης που απαιτείται για τη θέρμανση του αναερόβιου χωνευτή στην περίπτωση που η ανακτώμενη θερμική ενέργεια από τη λειτουργία του δεν επαρκεί για να καλυφθούν οι ανάγκες θέρμανσής του. Τέλος, ο όρος EC δεν περιλαμβάνεται στη σχέση του OCI καθώς θεωρείται ότι δεν προσθέτουμε εξωτερικό άνθρακα στον βιολογικό αντιδραστήρα.

4. Εφαρμογές του Μοντέλου Προσομοίωσης

4.1 Σενάρια

Η απόδοση της εγκατάστασης που προσομοιώνεται από το μοντέλο και οι δείκτες λειτουργίας της εξετάστηκαν για 5 διαφορετικά σενάρια.

Στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Αύξηση του βαθμού απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης σημαίνει μικρότερη συγκέντρωση της εισερχόμενης οργανικής ύλης στο βιοαντιδραστήρα ενεργού ιλύος και μεγαλύτερη συγκέντρωση οργανικής ύλης στη γραμμή επεξεργασίας της περίσσειας ιλύος.

Στο δεύτερο σενάριο εξετάστηκε η επίδραση του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης και στη μονάδα αφυδάτωσης. Το ποσοστό κατακράτησης στερεών σε αυτές τις μονάδες επηρεάζει τη συγκέντρωση της σωματιδιακής οργανικής ύλης που μέσω της εκροής του υγρού κλάσματος επιστέφει ξανά στην εγκατάσταση για επεξεργασία.

Στο τρίτο σενάριο εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου στα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου επηρεάζει τις διεργασίες της νιτροποίησης, της απονιτροποίησης και της παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας στον βιολογικό αντιδραστήρα.

Στο τέταρτο σενάριο εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών χρόνων παραμονής των μικροοργανισμών στο σύστημα ενεργού ιλύος. Ο χρόνος παραμονής των μικροοργανισμών στο σύστημα ενεργού ιλύος επηρεάζει τη συγκέντρωση των μικροοργανισμών και κατά συνέπεια τις βιολογικές διεργασίες που συντελούνται σε αυτό.

Τέλος, στο πέμπτο σενάριο εξετάστηκε η επίδραση της επεξεργασίας των στραγγιδίων, που προκύπτουν από τη μονάδα της αφυδάτωσης, προκειμένου να απομακρυνθεί ποσοστό του αμμωνιακού αζώτου, πριν την επιστροφή τους στα ανάντη της εγκατάστασης. Η αύξηση του ποσοστού του αμμωνιακού αζώτου που απομακρύνεται από τα στραγγίδια σημαίνει

χαμηλότερη συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου που ανακυκλοφορείται προς επεξεργασία στο σύστημα ενεργού ιλύος.

4.1.1 Σενάριο 1 : Διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

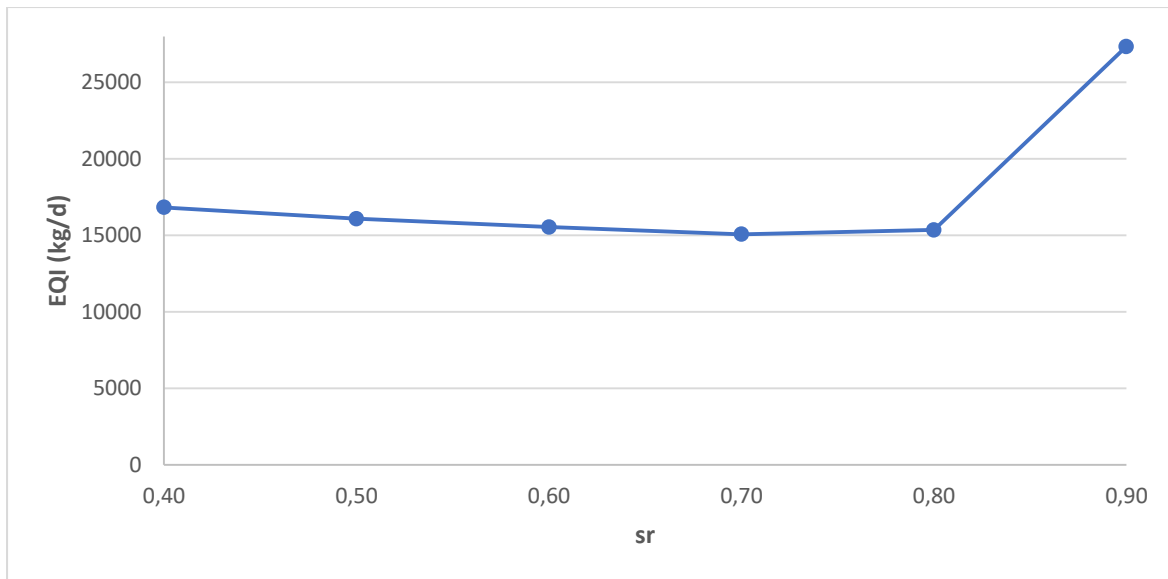
Στόχος σεναρίου

Στο παρόν σενάριο μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση του βαθμού απόδοσης της καθίζησης (solids removal, sr) για 6 διαφορετικά ποσοστά: 40% – 50% – 60% – 70% – 80% – 90%. Οι υπόλοιπες μεταβλητές και συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σταθερές.

Για την επίτευξη βαθμού απόδοσης μεγαλύτερου από 70%, 80% και 90% θεωρήθηκε ότι απαιτείται η προσθήκη χημικών (θειικό αργίλιο $Al_2(SO_4)_3$ ή τριχλωριούχος σίδηρος $FeCl_3$). Τα χημικά βοηθούν στη συσσωμάτωση και καθίζηση των αιωρούμενων στερεών που δεν έχουν την τάση να καθιζάνουν υπό κανονικές συνθήκες (Neurane, Riffat, Murthy, Peric, & Wilson, 2008). Με αυτόν τον τρόπο η πρωτοβάθμια καθίζηση γίνεται πιο αποδοτική.

Αποτελέσματα και σχολιασμός

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η σχέση του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI) συναρτήσει των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης (sr).



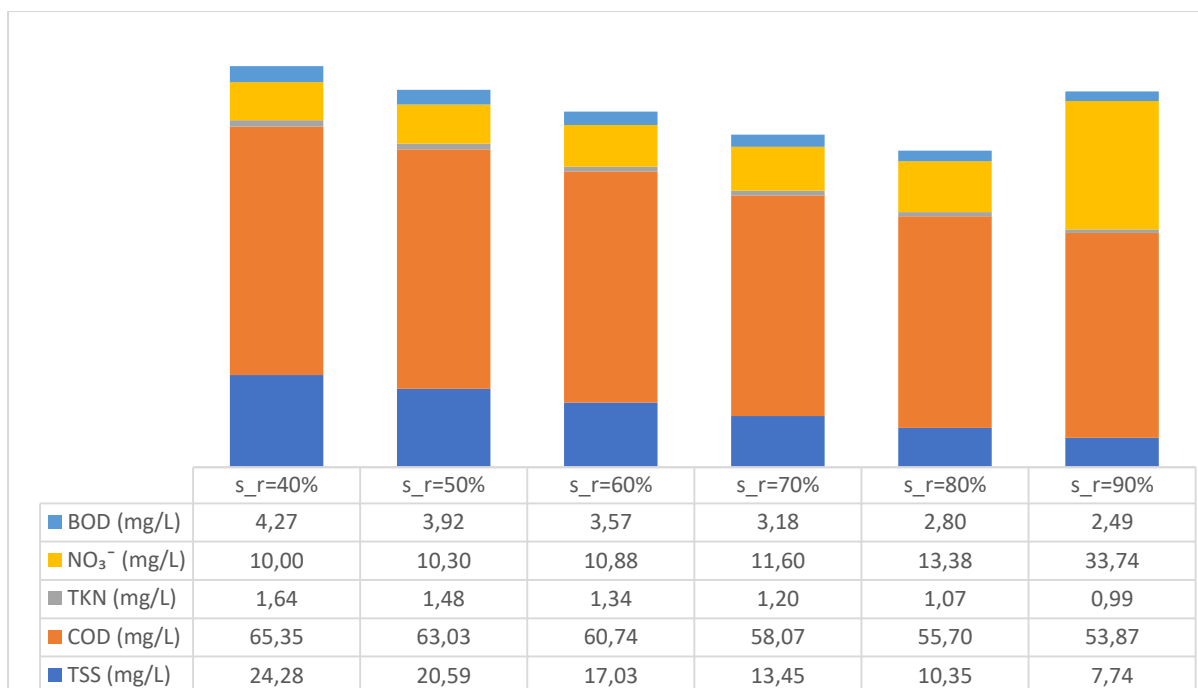
Σχήμα 4.1: Δείκτης ποιότητας εκροής συναρτήσει των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Παρατηρούμε ότι μέχρι το ποσοστό sr 70%, με την αύξηση του sr ο δείκτης EQI μειώνεται δηλαδή βελτιώνεται η απόδοση της εγκατάστασης στην απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου. Στο ποσοστό sr 80% παρατηρούμε μια μικρή αύξηση του δείκτη EQI και έπειτα, στο ποσοστό sr 90% παρατηρούμε πολύ μεγάλη αύξηση του δείκτη EQI.

Το Σχήμα 4.2 δείχνει τις συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τα διαφορετικά ποσοστά του sr. Η αιτία που αυξάνεται ο δείκτης EQI είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των NO_3^- στην έξοδο της εγκατάστασης.

Με την αύξηση του sr μειώνεται ο λόγος COD/N στον βιολογικό αντιδραστήρα όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1 που δείχνει τις τιμές του λόγου COD/N για τα διαφορετικά ποσοστά απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης.

Με τον περιορισμό της οργανικής ύλης στη δεξαμενή αερισμού περιορίζεται η ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας. Κατά συνέπεια η παραγωγή αυτοτροφικής βιομάζας, που δεν επηρεάζεται από τη μείωση της οργανικής ύλης, ευνοείται αφού είναι λιγότερος ο ανταγωνισμός ως προς το διαλυμένο οξυγόνο (DO) από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Ακόμα, λόγω του διαθέσιμου DO για τους αυτοτροφικούς μικροοργανισμούς ευνοείται η ολοκλήρωση της νιτροποίησης δηλαδή, η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου (NH_3) σε νιτρικά (NO_3^-) και όχι η διακοπή της στο στάδιο που έχουν παραχθεί τα NO_2^- .



Σχήμα 4.2: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Πίνακας 4.1: COD/N στην είσοδο της δεξαμενής απονιτροποίησης για τα διαφορετικά ποσοστά απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

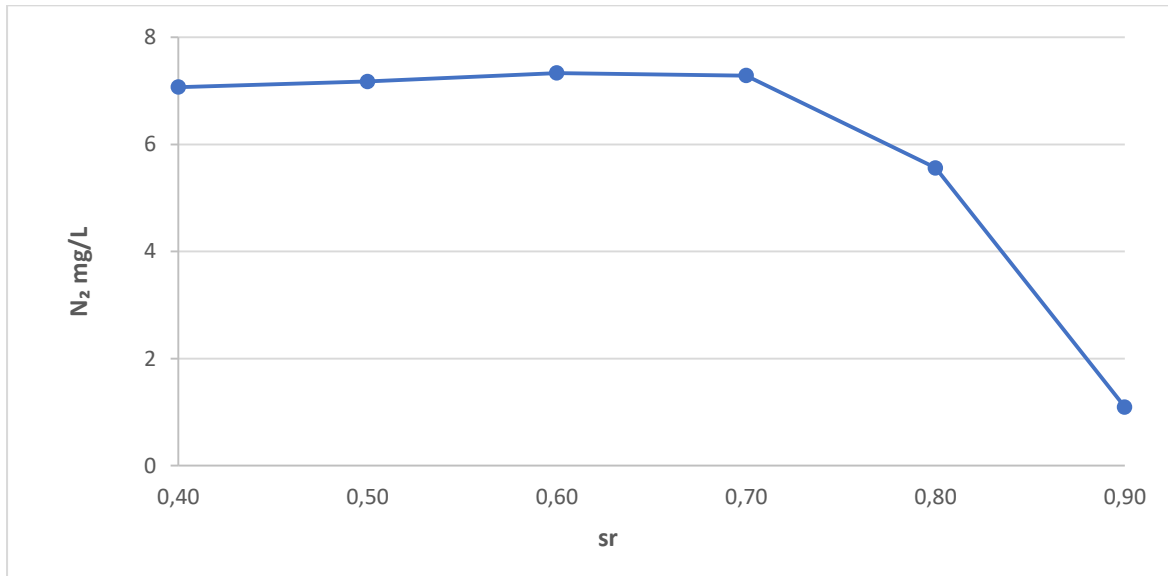
Θέση 7	sr					
	40%	50%	60%	70%	80%	90%
COD/N	17.44	17.05	16.55	15.74	14.91	12.58

Όσον αφορά στην ανοξική δεξαμενή λόγω της μείωσης της διαθέσιμης οργανικής ύλης με την αύξηση του ποσοστού sr εμποδίζεται η ολοκλήρωση της απονιτροποίησης δηλαδή η μετατροπή των NO₃⁻ σε αέριο άζωτο (N₂).

Μέχρι το ποσοστό sr 70% οι διεργασίες στον βιολογικό αντιδραστήρα φαίνεται να λειτουργούν ικανοποιητικά παρά τη μείωση του λόγου COD/N. Για ποσοστό sr 80% φαίνεται να μην ολοκληρώνεται η απονιτροποίηση αλλά χωρίς συσσώρευση νιτρικών ενώ για ποσοστό sr 90% φαίνεται και πάλι να μην ολοκληρώνεται η απονιτροποίηση με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται νιτρικά τα οποία δεν απονιτροποιούνται σε αέριο άζωτο.

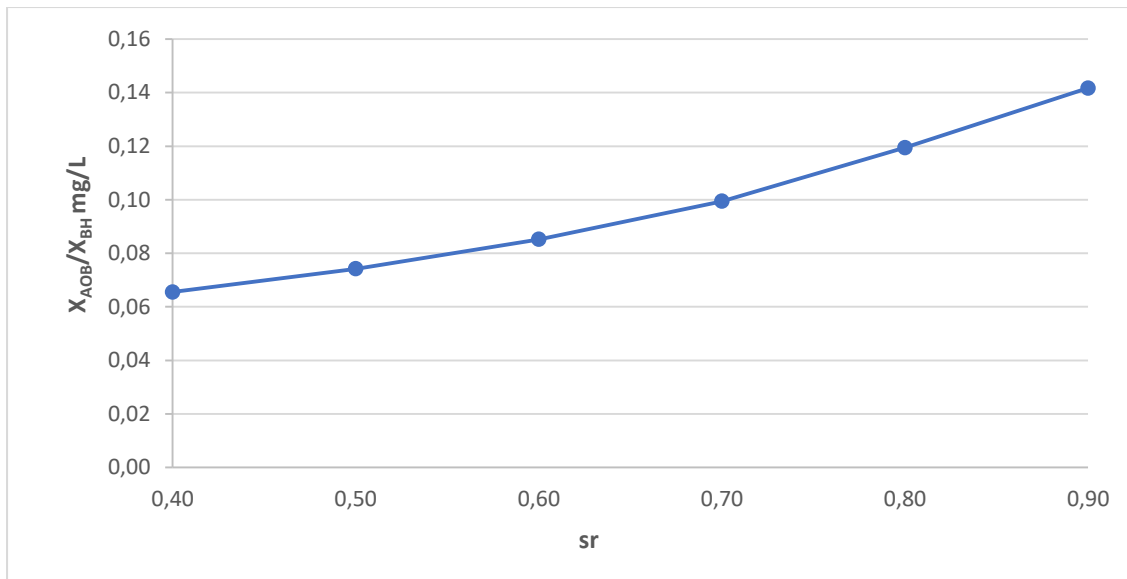
Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του N₂ στην ανοξική δεξαμενή για τα διαφορετικά ποσοστά sr. Παρατηρείται ότι μέχρι το ποσοστό sr 70% η απονιτροποίηση φαίνεται να λειτουργεί αφού αυξάνεται η συγκέντρωση N₂. Αντίθετα, για ποσοστό sr 80%

φαίνεται να αναχαιτίζεται μερικώς η απονιτροποίηση αφού η συγκέντρωση N_2 μειώνεται ενώ για sr 90% φαίνεται να αναχαιτίζεται ακόμα περισσότερο.

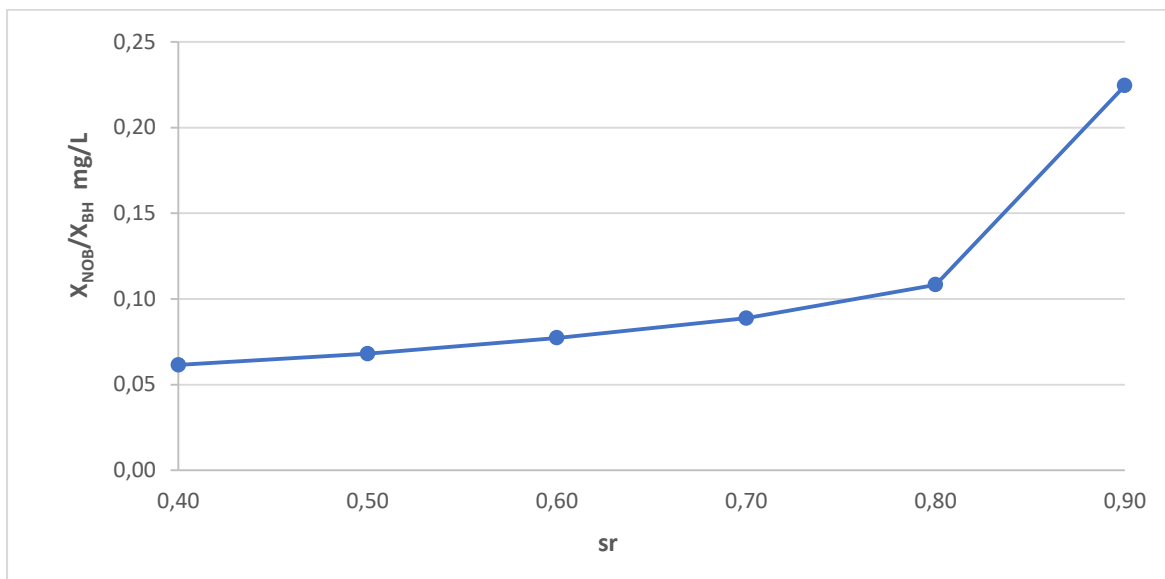


Σχήμα 4.3: Συγκέντρωση αερίου αζώτου στην ανοξική δεξαμενή για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Τέλος, στο Σχήμα 4.4 και στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι λόγοι των συγκεντρώσεων των X_{AOB} και X_{NOB} αντίστοιχα προς τη συγκέντρωση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών στην αερόβια δεξαμενή. Παρατηρούμε την αύξηση των λόγων των νιτροποιητών προς τα ετεροτροφικά βακτήρια με την αύξηση του sr, τη σημαντική αύξηση του λόγου των X_{NOB}/X_{BH} για sr 80% και την πολύ μεγάλη αύξηση του λόγου των X_{NOB}/X_{BH} για sr 90%.

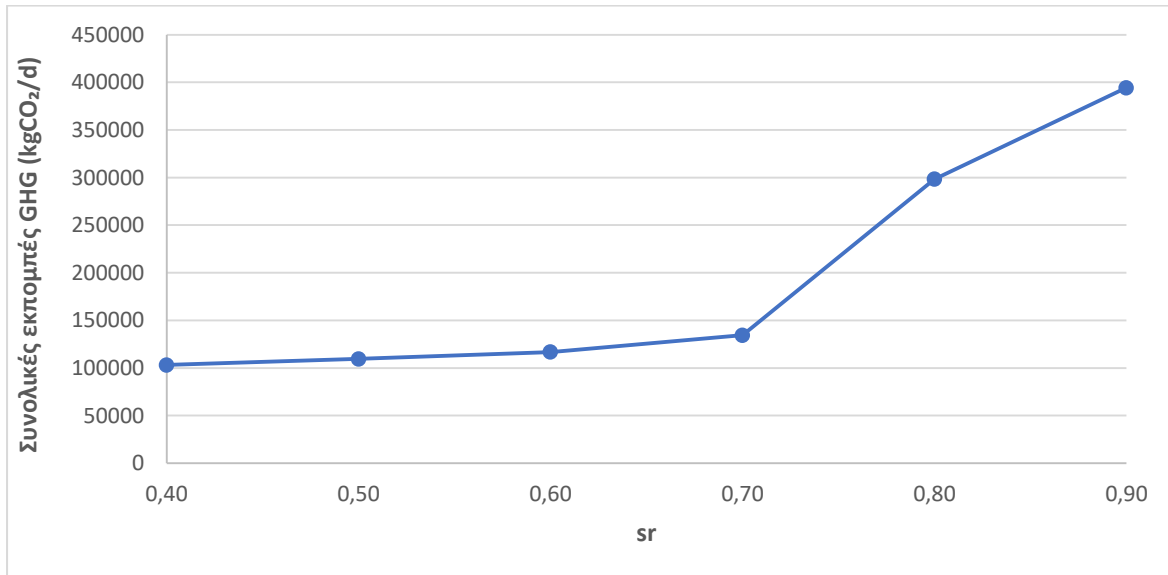


Σχήμα 4.4: Λόγος των μικροοργανισμών που οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο X_{AOB} προς τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς X_{BH} στην αερόβια δεξαμενή για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης



Σχήμα 4.5: Λόγος των μικροοργανισμών που οξειδώνουν τα νιτρώδη X_{NOB} προς τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς X_{BH} στην αερόβια δεξαμενή για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Στο Σχήμα 4.6 αποτυπώνεται η σχέση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από την ΕΕΛ συναρτήσει των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης (sr).



Σχήμα 4.6: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) συναρτήσει των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

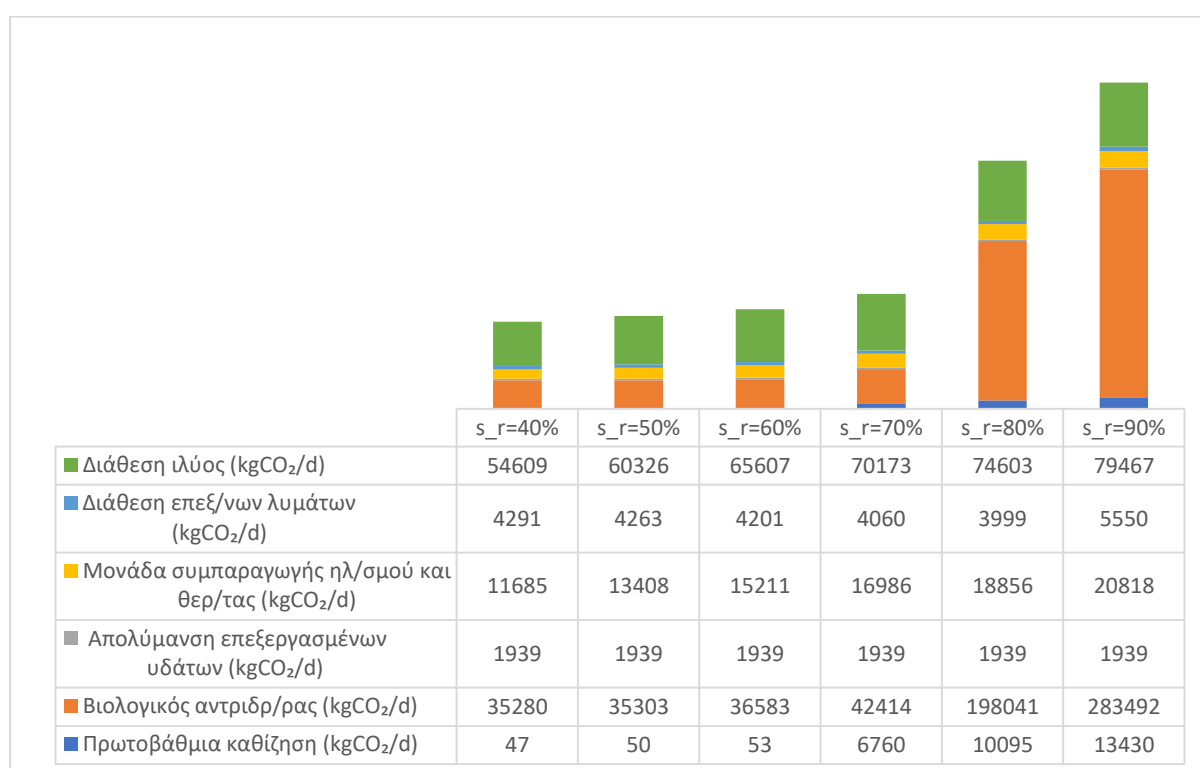
Παρατηρούμε ότι οι εκπομπές GHG αυξάνονται με την αύξηση του βαθμού απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Ωστόσο, για ποσοστό sr 80% και 90% η αύξηση είναι πολύ μεγάλη συγκριτικά με τα άλλα ποσοστά του sr, με τη μεγαλύτερη τιμή να σημειώνεται για sr 90%.

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) από όλη την ΕΕΛ για τα διαφορετικά ποσοστά sr. Η σημαντικότερη συνεισφορά στην αύξηση των GHG είναι του βιολογικού αντιδραστήρα. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι για ποσοστά sr 70%, 80% και 90% οι εκπομπές GHG σε ισοδύναμους όρους CO₂ λόγω ενίσχυσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης με χρήση χημικών είναι σημαντικές.

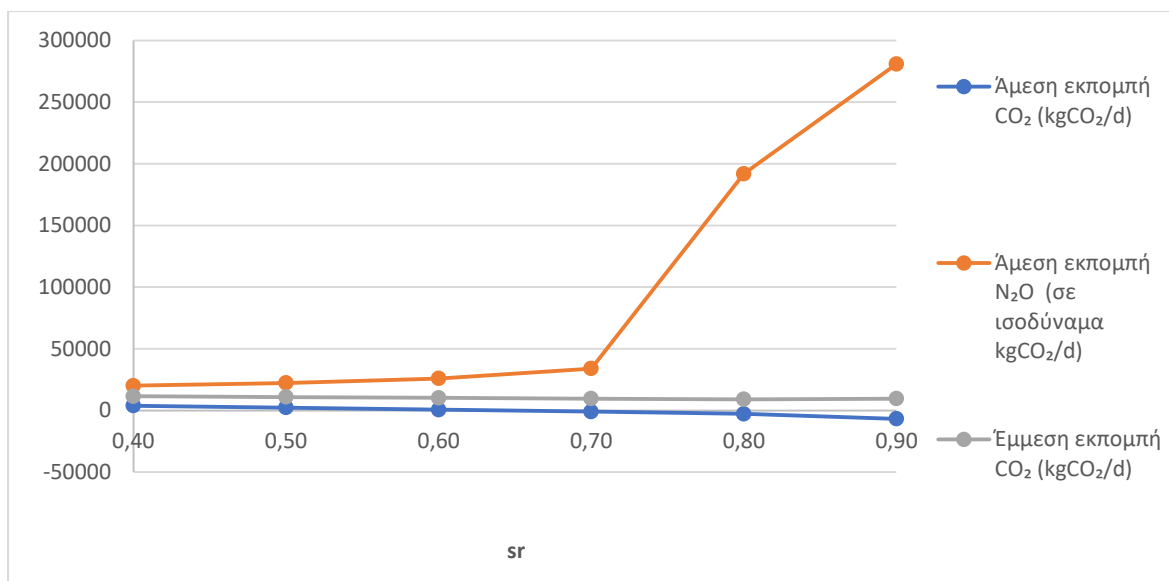
Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται αναλυτικά οι άμεσες και έμμεσες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) στον βιολογικό αντιδραστήρα για τα διαφορετικά ποσοστά sr. Είναι φανερό ότι η αύξηση των GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα οφείλεται στην αύξηση της εκπομπής N₂O. Οι αρνητικές τιμές της εκπομπής CO₂ στην αερόβια δεξαμενή που φαίνονται στο Σχήμα 4.8 οφείλονται στο ότι η κατανάλωση του από τους αυτοτροφικούς

μικροοργανισμούς κατά τη νιτροποίηση είναι περισσότερη από την παραγωγή του λόγω ανάπτυξης ετεροτροφικής βιομάζας.

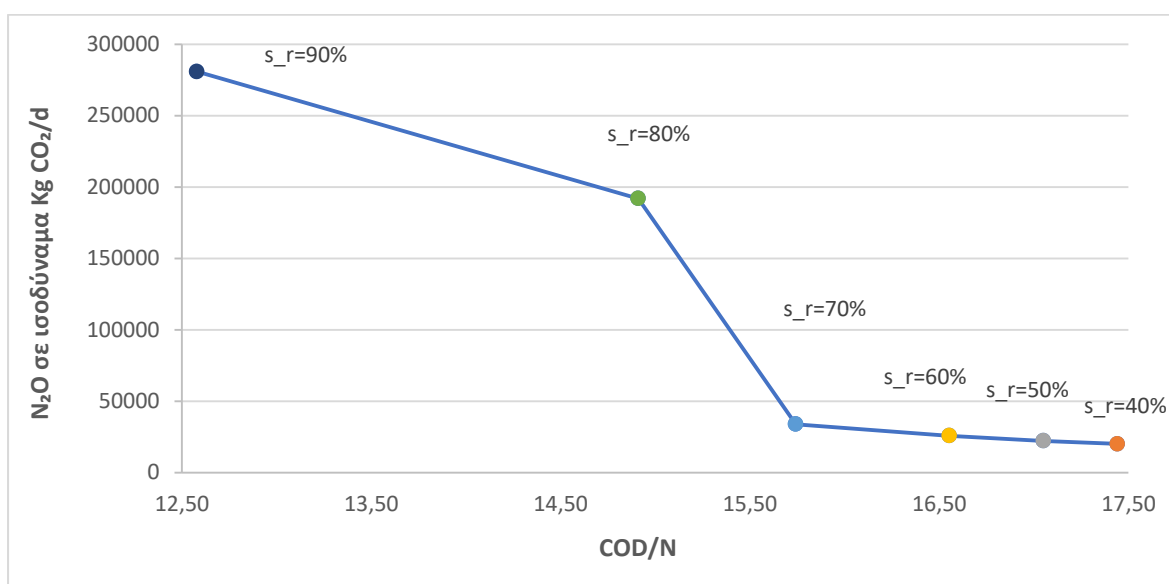
Η αύξηση του N₂O στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του ποσοστού sr συμβαίνει κυρίως στην ανοξική δεξαμενή λόγω της μείωσης του λόγου COD/N. Η μείωση της διαθέσιμης οργανικής ύλης στην ανοξική δεξαμενή έχει ως αποτέλεσμα να μην ολοκληρώνεται η απονιτροποίηση οπότε παράγονται N₂O τα οποία με την αναχαιτίση της απονιτροποίησης δεν μετατρέπονται σε αέριο άζωτο (N₂) και έτσι συσσωρεύονται. Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι εκπομπές N₂O στον αερόβιο αντιδραστήρα συναρτήσει του λόγου COD/N για τα διαφορετικά ποσοστά sr.



Σχήμα 4.7: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) από όλη την ΕΕΛ για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης



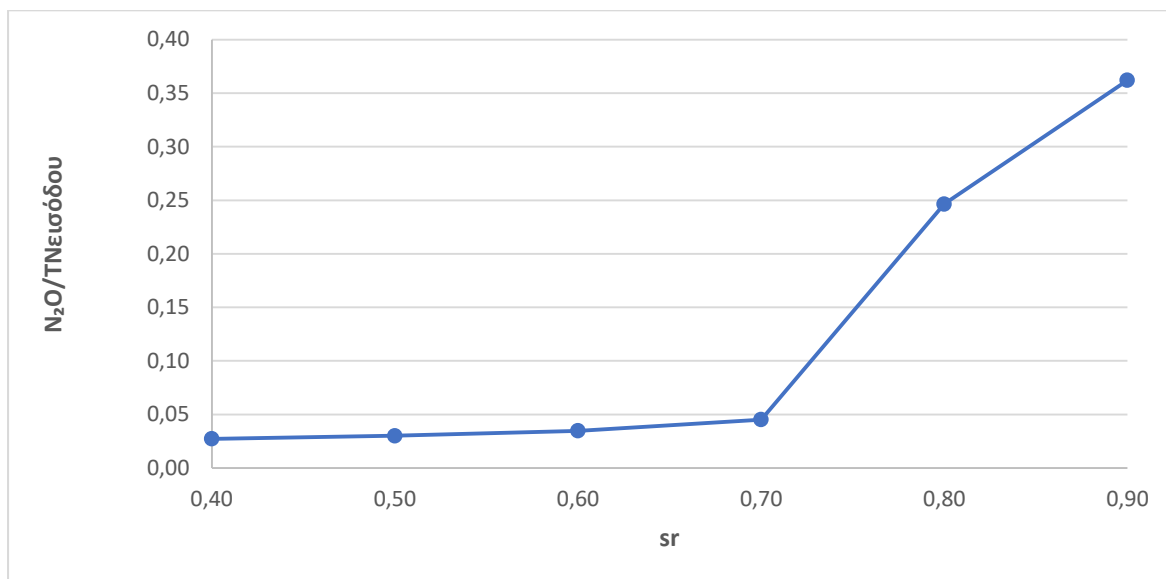
Σχήμα 4.8: Ανάλυση άμεσων και έμμεσων εκπομπών GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα σε ισοδύναμα Kg CO₂/d για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης



Σχήμα 4.9: Εκπομπές N₂O στον αερόβιο αντιδραστήρα συναρτήσεως του λόγου COD/N για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

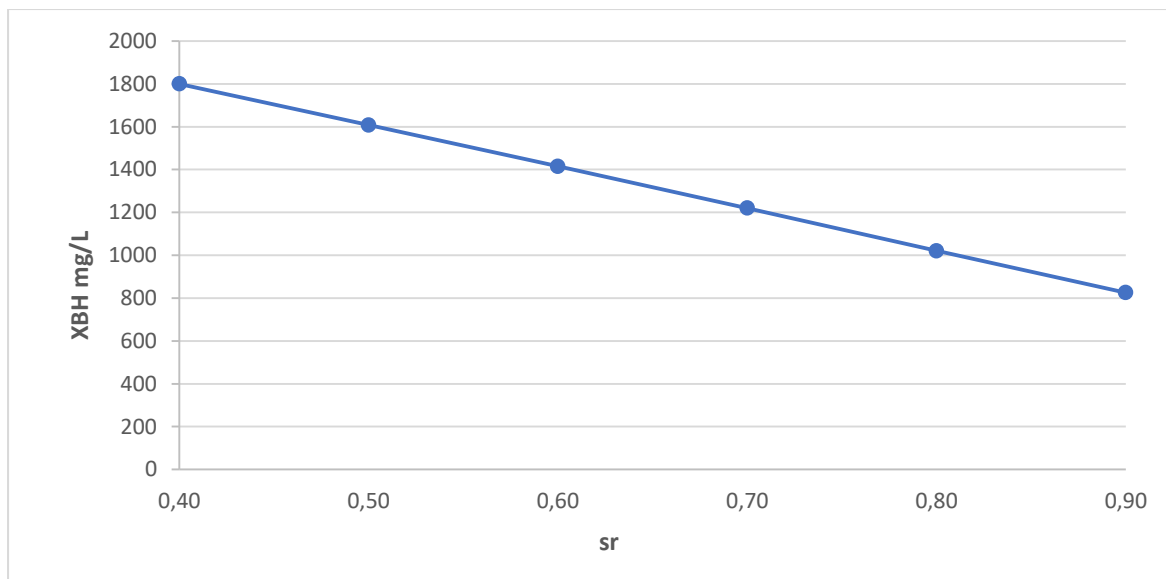
Τέλος, στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ο λόγος του παραγόμενου N₂O στην ΕΕΛ προς το ολικό άζωτο (TN) που εισέρχεται στην εγκατάσταση με τα λύματα συναρτήσεως των διαφορετικών ποσοστών sr. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του sr αυξάνεται ο λόγος N₂O/TN εισόδου που σημαίνει ότι αυξάνεται το ποσοστό του εισερχόμενου αζώτου που απομακρύνεται από την εγκατάσταση σαν N₂O παρά σαν N₂. Για sr 80% και 90% ο λόγος

N_2O /ΤΝεισόδου αυξάνεται πολύ σημαντικά σε σύγκριση με τις τιμές που αντιστοιχούν στα υπόλοιπα ποσοστά sr. Η μεγαλύτερη τιμή του σημειώνεται για sr 90%.



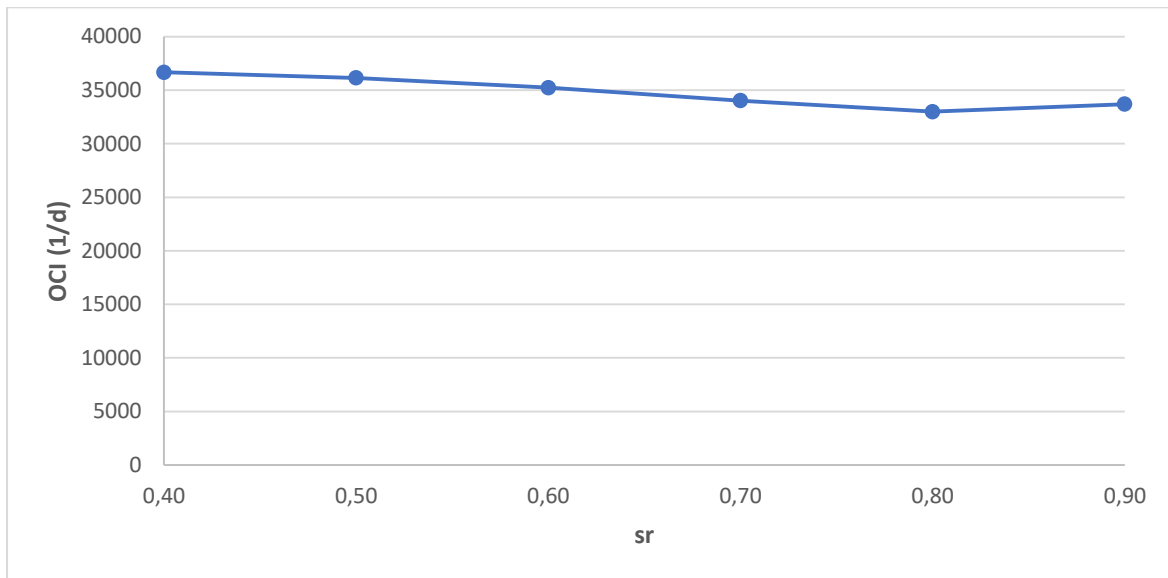
Σχήμα 4.10: Λόγος του N_2O που παράγεται στην ΕΕΛ προς το TN που εισέρχεται στην ΕΕΛ για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Αντίθετα με τις εκπομπές N_2O , οι εκπομπές CO_2 στον βιολογικό αντιδραστήρα μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού sr. Αυτό αποδίδεται στη μείωση του φορτίου οργανικού άνθρακα που εισέρχεται στη βιολογική βαθμίδα το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής CO_2 . Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η μείωση της συγκέντρωσης των X_{BH} στο τελευταίο διαμέρισμα του αερόβιου αντιδραστήρα (θέση 12) για τα διαφορετικά ποσοστά sr.



Σχήμα 4.11: Συγκέντρωση ετεροτροφικών μικροοργανισμών X_{BH} στην αερόβια δεξαμενή για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Στο Σχήμα 4.12 αποτυπώνεται η σχέση του δείκτη λειτουργικού κόστους (OCI) συναρτήσει των διαφορετικών ποσοστών sr.

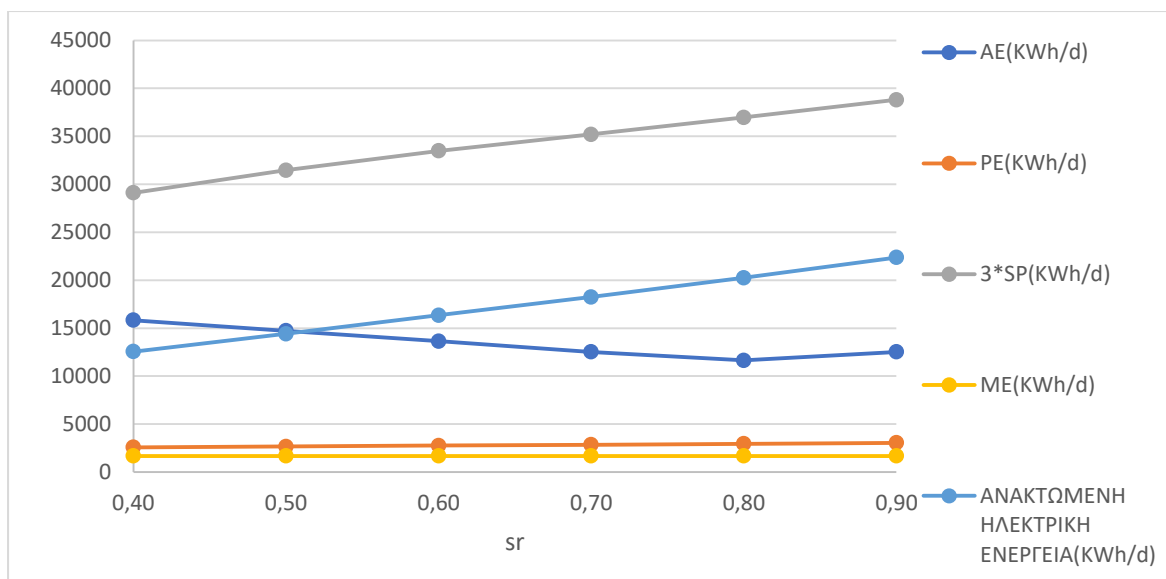


Σχήμα 4.12: Δείκτης λειτουργικού κόστους συναρτήσει των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Παρατηρούμε ότι από το ποσοστό sr 40% μέχρι το ποσοστό sr 80% η τιμή του δείκτη OCI μειώνεται. Για το ποσοστό sr 90% η τιμή του δείκτη OCI αυξάνεται.

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζονται οι ενέργειες που συνθέτουν το δείκτη OCI δηλαδή, οι ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τα διαφορετικά ποσοστά sr.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13 με την αύξηση του sr αυξάνεται το κόστος για διάθεση της τελικής ιλύος (3*SP) που προκύπτει στο τέλος της επεξεργασίας. Ωστόσο με την αύξηση του sr, αυξάνεται και η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από την χώνευση της ιλύος στον αναερόβιο χωνευτή. Ακόμα, με την αύξηση του sr μειώνεται η ενέργεια που απαιτείται για αερισμό (AE) στην αερόβια δεξαμενή. Η μείωση της απαιτούμενης AE οφείλεται στο ότι με περιοριστικό παράγοντα την οργανική ύλη όσο αυξάνεται ο sr μειώνεται η ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας. Οι ενέργειες ανάμειξης και άντλησης παρουσιάζουν μικρή διακύμανση.



Σχήμα 4.13: Ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης

Συγκεντρωτικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για την επίδραση, στην απόδοση της εγκατάστασης και τους δείκτες λειτουργίας, των διαφορετικών βαθμών απόδοσης της πρωτοβάθμιας καθίζησης στην απομάκρυνση στερεών:

- Για ποσοστό sr από 40% μέχρι 70% ο δείκτης EQI μειώνεται. Για ποσοστό sr 80% και 90% ο δείκτης EQI αυξάνεται λόγω αναχαίτισης της απονιτροποίησης εξ' αιτίας της μείωσης του λόγου COD/N.
- Με την αύξηση του ποσοστού sr έχουμε αύξηση της εκπομπής GHG. Οφείλεται κυρίως στην αύξηση των N₂O στο βιολογικό αντιδραστήρα από την ατελή απονιτροποίηση εξ' αιτίας της μείωσης του λόγου COD/N.
- Με την αύξηση του sr μέχρι το ποσοστό 80% ο δείκτης OCI μειώνεται εξ' αιτίας της αύξησης της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας, από την αξιοποίηση του βιοαερίου που παράγεται από την αναερόβια χώνευση της ιλύος, και τις χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για αερισμό, αφού η συγκέντρωση των αιωρούμενων στέρεων στη δεξαμενή αερισμού μειώνεται. Για ποσοστό sr 90% ο δείκτης OCI αυξάνεται εξ' αιτίας της αύξησης της απαιτούμενης ενέργειας για διάθεση της τελικής ιλύος.

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων το βέλτιστο ποσοστό απομάκρυνσης στερεών κατά την πρωτοβάθμια καθίζηση κυμαίνεται μεταξύ 40% και 70%.

Το ποσοστό sr 80% απορρίπτεται λόγω υψηλών εκπομπών GHG. Το ποσοστό sr 90% απορρίπτεται λόγω υψηλών εκπομπών GHG και απαγορευτικής συγκέντρωσης NO_3^- στην έξοδο της εγκατάστασης.

Ανάμεσα στα βέλτιστα ποσοστά 40% - 70% , όσο αυξάνεται το ποσοστό sr έχουμε καλύτερη ποιότητα εκροής EQI και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος OCI αλλά υψηλότερη εκπομπή GHG. Όσο το ποσοστό sr μειώνεται έχουμε λιγότερες εκπομπές GHG αλλά αυξάνεται το λειτουργικό κόστος και υποβιβάζεται η ποιότητα εκροής των λυμάτων με αύξηση των αιωρούμενων στερεών από 10 mg/L σε 24 mg/L. Επομένως, το δίλημμα εστιάζεται κυρίως ανάμεσα στο χαμηλό λειτουργικό κόστος OCI ή την χαμηλή εκπομπή αερίων θερμοκηπίου GHG.

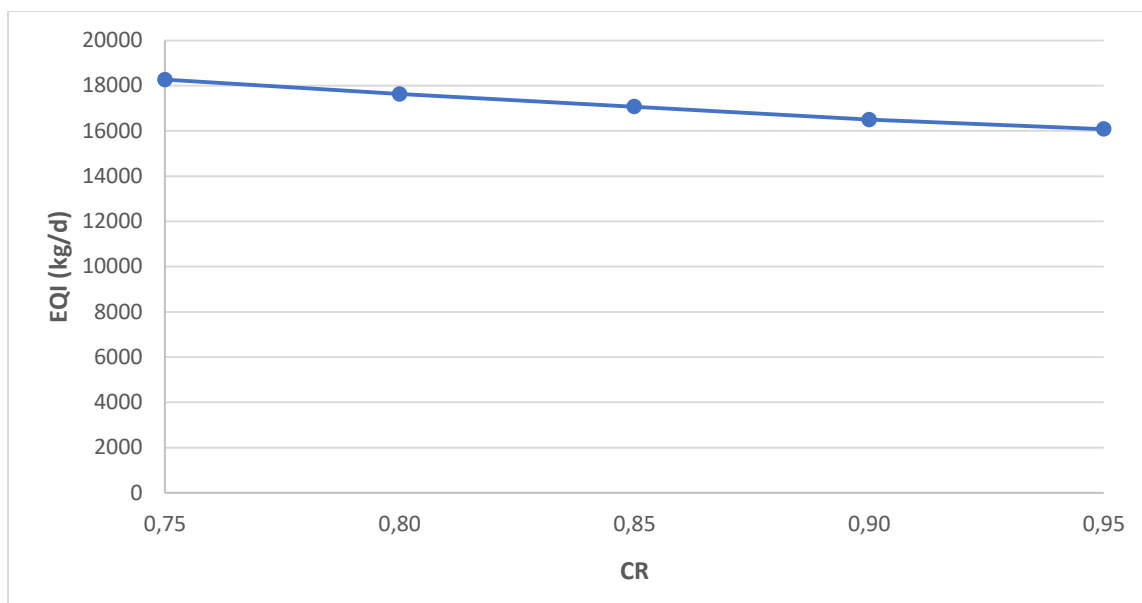
4.1.2 Σενάριο 2 : Διερεύνηση της επίδρασης του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης και στη μονάδα αφυδάτωσης

Στόχος σεναρίου

Στο παρόν σενάριο μελετήθηκε η επίδραση του ποσοστού κατακράτησης των στερεών στις μονάδες βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης και στη μονάδα αφυδάτωσης (ίδιο ποσοστό κατακράτηση στερεών κάθε φορά και στις τρεις μονάδες για κάθε εξεταζόμενο σενάριο). Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση του ποσοστού κατακράτησης στερεών (capture rate, CR) για 5 διαφορετικά ποσοστά: 75% – 80% – 85% – 90% – 95%. Οι υπόλοιπες μεταβλητές και συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σταθερές.

Αποτελέσματα και σχολιασμός

Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η σχέση του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI) συναρτήσει του ποσοστού κατακράτησης στερεών (CR) στις μονάδες βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης και στη μονάδα αφυδάτωσης.



Σχήμα 4.14: Δείκτης ποιότητας εκροής συναρτήσει του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό CR ο EQI παρουσιάζει βελτίωση δηλαδή είναι λιγότερα τα Kg του ρυπαντικού φορτίου με τα οποία επιβαρύνονται οι υδάτινοι αποδέκτες από τη διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων. Επιτυγχάνοντας μεγαλύτερο ποσοστό κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης επιτυγχάνεται καλύτερος διαχωρισμός των στερεών από τα υγρά που συνθέτουν την ιλύ. Επομένως, μειώνεται η συγκέντρωση των στερεών που περιέχονται στην εκροή της εγκατάστασης αλλά και η συγκέντρωση των στερεών που ανακυκλοφορούνται στην είσοδο της ΕΕΛ μέσω της γραμμής των στραγγιδίων. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των επιμέρους σωματιδιακών κλασμάτων στο σύνολο των στραγγιδίων των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης (θέση 44) που θα καταλήξουν ανάντη της εγκατάστασης για επεξεργασία.

Παρατηρούμε ότι μειώνονται οι συγκεντρώσεις όλων των σωματιδιακών κλασμάτων με την αύξηση του CR. Ωστόσο, είναι σημαντική η μείωση της συγκέντρωσης των μη βιοδιασπάσιμων οργανικών στερεών (XI) καθώς και των ανόργανων στερεών (XNV). Η παγίδευσή τους από την ιλύ, που συμβαίνει και κατά την πάχυνση και αφυδάτωση, είναι ο μόνος τρόπος απομάκρυνσής τους από το σύστημα αφού είναι αδρανή στερεά που περνούν μέσα από το σύστημα ενεργού ιλύος και παραμένουν αναλλοίωτα (Ανδρεαδάκης & Νουτσόπουλος, 2010).

Ακόμα, στον Πίνακα 4.2 παρατηρούμε ότι μειώνεται σημαντικά και η συγκέντρωση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (XS) με την αύξηση του CR. Τα XS που επιστέφουν στα ανάντη της εγκατάστασης για επεξεργασία μετατρέπονται στο σύστημα ενεργού ιλύος σε εύκολα βιοδιασπάσιμη ύλη (SS) και έπειτα χρησιμοποιούνται από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς για την παραγωγή βιομάζας. Επομένως δεν σημαίνει ότι με χαμηλό CR περιμένουμε απαραίτητως να επιβαρυνθεί η εκροή του συστήματος από υψηλή συγκέντρωση XS.

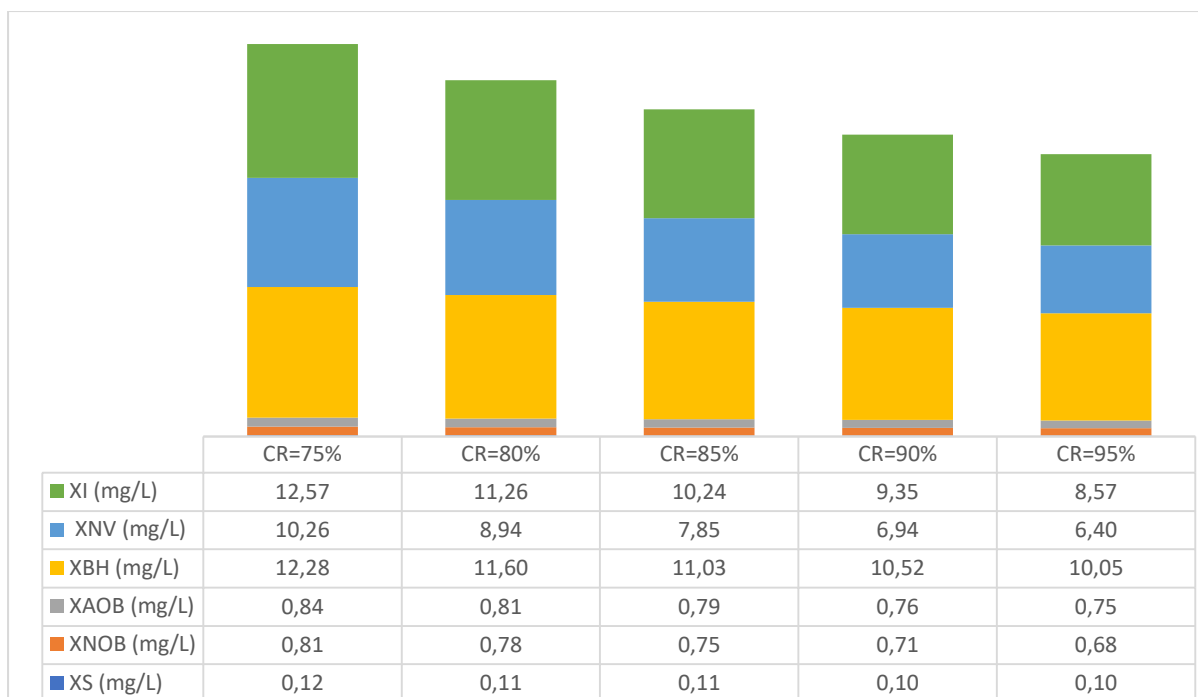
Πίνακας 4.2: Συγκεντρώσεις των επιμέρους σωματιδιακών κλασμάτων από τις εκροές υγρών των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών

ανακυκλοφορία στραγγιδίων	CR				
	75%	80%	85%	90%	95%
XI (mg/L)	1059	825	606	395	193
XS (mg/L)	2748	2224	1685	1133	570
XBH (mg/L)	641	507	375	246	121
ΧΑΟΒ (mg/L)	36	28	21	14	7
ΧΝΟΒ (mg/L)	34	27	20	13	7
XNV (mg/L)	1499	1149	827	529	259
TSS (mg/L)	4681	3692	2733	1798	891
VSS (mg/L)	3182	2543	1906	1268	632

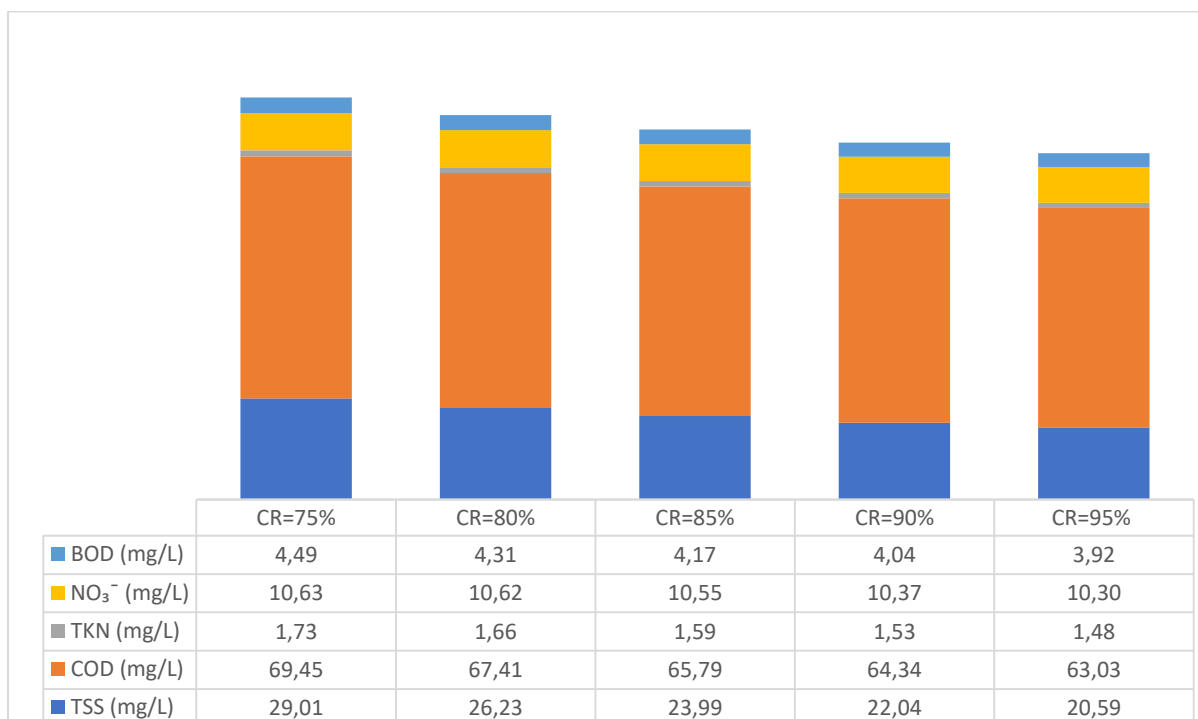
Στο Σχήμα 4.15, παρουσιάζονται τα επιμέρους σωματιδιακά κλάσματα στην τελική εκροή (θέση 34). Με βάση τα στοιχεία αυτά διαπιστώνεται ότι η βελτίωση του EQI με την αύξηση του CR οφείλεται κυρίως στη μειωμένη συγκέντρωση των μη βιοδιασπάσιμων οργανικών στερεών (XI) καθώς και των ανόργανων στερεών (XNV). Μειωμένη συγκέντρωση παρουσιάζουν και οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί (XBH)

Στο Σχήμα 4.16 στο οποίο παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τα διαφορετικά ποσοστά CR, παρατηρούμε ότι η μείωση του EQI οφείλεται στη μείωση των TSS και COD. Οι δύο αυτοί όροι είναι οι μόνοι από τους όρους του EQI που περιλαμβάνουν τα αδρανή στερεά XI. Ο όρος BOD που δεν περιλαμβάνει τα αδρανή αλλά περιλαμβάνει τα XBH παρουσιάζει πολύ μικρή διακύμανση για τα διαφορετικά ποσοστά του CR.

Επομένως, η βελτίωση του δείκτη EQI με την αύξηση του ποσοστού CR οφείλεται κυρίως στην απομάκρυνση των αδρανών στερεών XI και XNV.

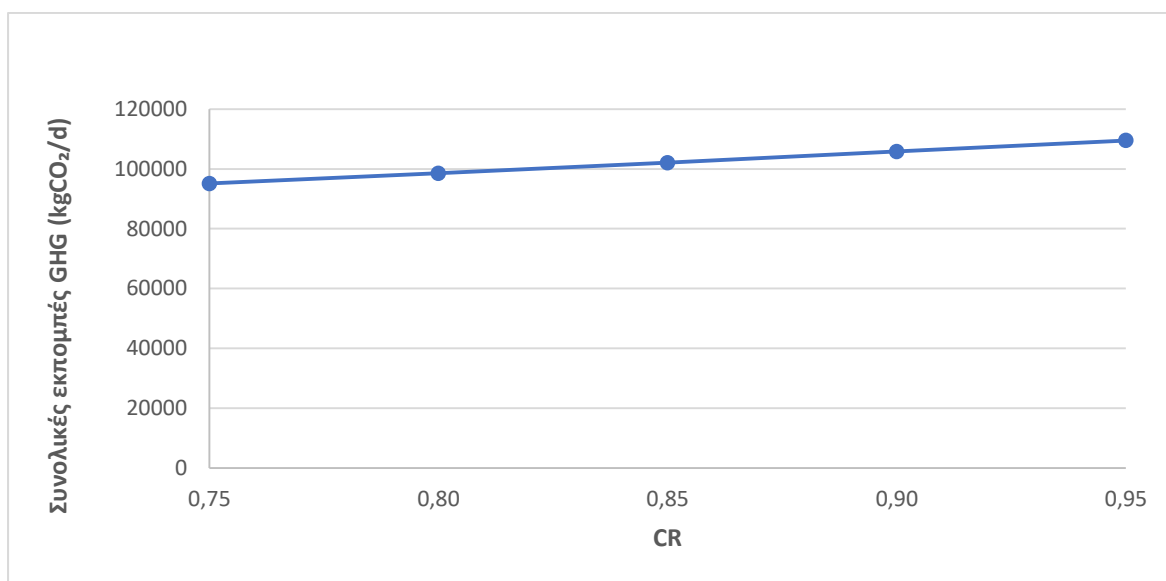


Σχήμα 4.15: Συγκεντρώσεις των επιμέρους σωματιδιακών κλασμάτων στην έξοδο της εγκατάστασης για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης



Σχήμα 4.16: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

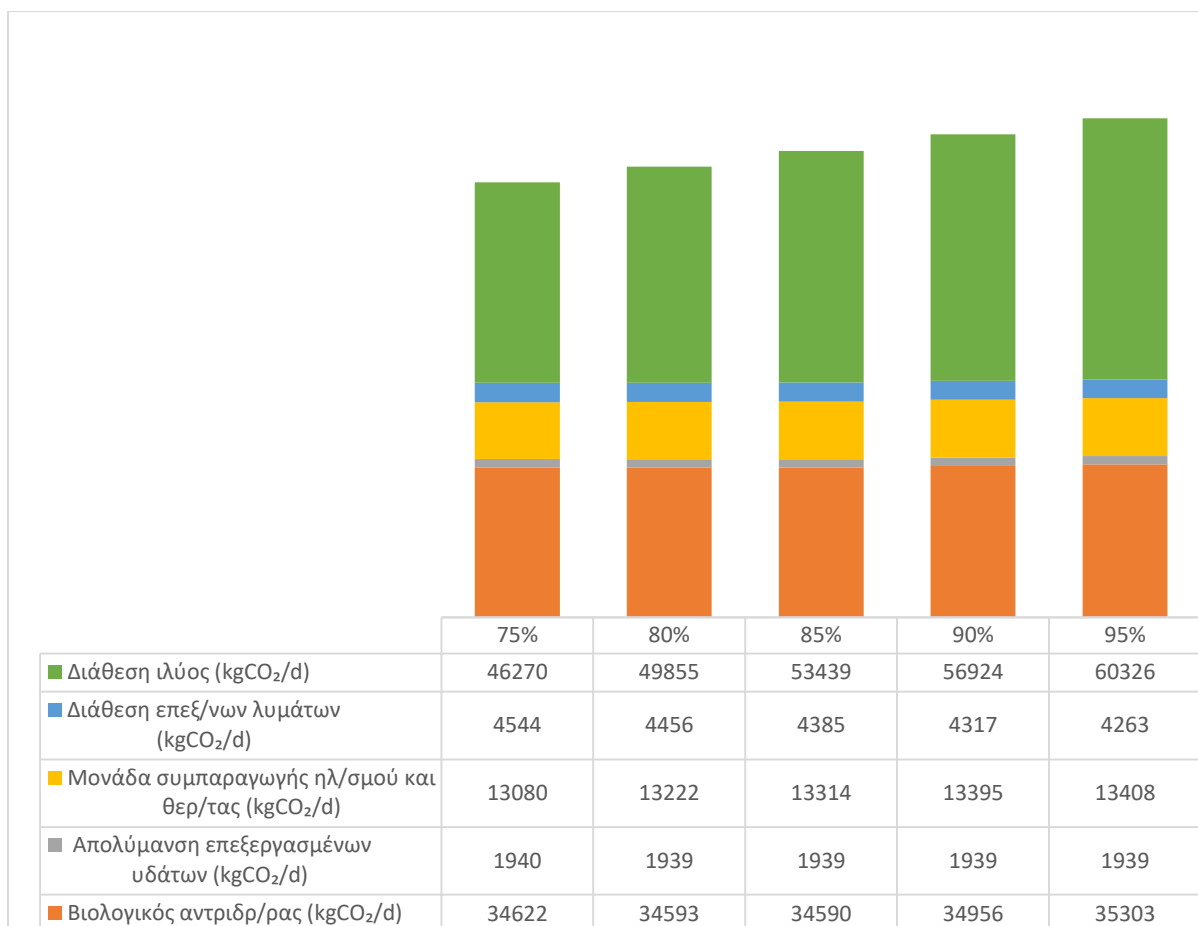
Στο Σχήμα 4.17 αποτυπώνεται η σχέση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από την ΕΕΛ συναρτήσει του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.



Σχήμα 4.17: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) συναρτήσει του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του ποσοστού CR αυξάνονται οι εκπομπές GHG. Η βασική αιτία για την αύξηση των εκπομπών GHG είναι η αύξηση της ποσότητας της ιλύος προς διάθεση που προκύπτει στο τέλος της επεξεργασίας. Στο Σχήμα 4.18 απεικονίζονται οι σημαντικότερες εκπομπές GHG σε ισοδύναμα KgCO₂/d από όλη την ΕΕΛ για τα διαφορετικά ποσοστά του CR. Με την αύξηση του CR αυξάνεται η ποσότητα της ιλύος που απομακρύνεται από την εγκατάσταση όπως είναι αναμενόμενο αφού, αύξηση του CR σημαίνει καλύτερος διαχωρισμός των στερεών από τα υγρά που συνθέτουν την ιλύ. Αυτό συνεπάγεται αύξηση των εκπομπών GHG, και ειδικότερα του CH₄ που δημιουργείται από την αποσύνθεση της ιλύος, όταν εκείνη διατίθεται στο έδαφος.

Η δεύτερη σημαντικότερη συνεισφορά στην εκπομπή GHG είναι του βιολογικού αντιδραστήρα με περίπου 1000 Kg ισοδύναμου CO₂/d περισσότερες εκπομπές στο μεγαλύτερο ποσοστό του CR 95% σε σχέση με το μικρότερο ποσοστό του 75% (Σχήμα 4.18).

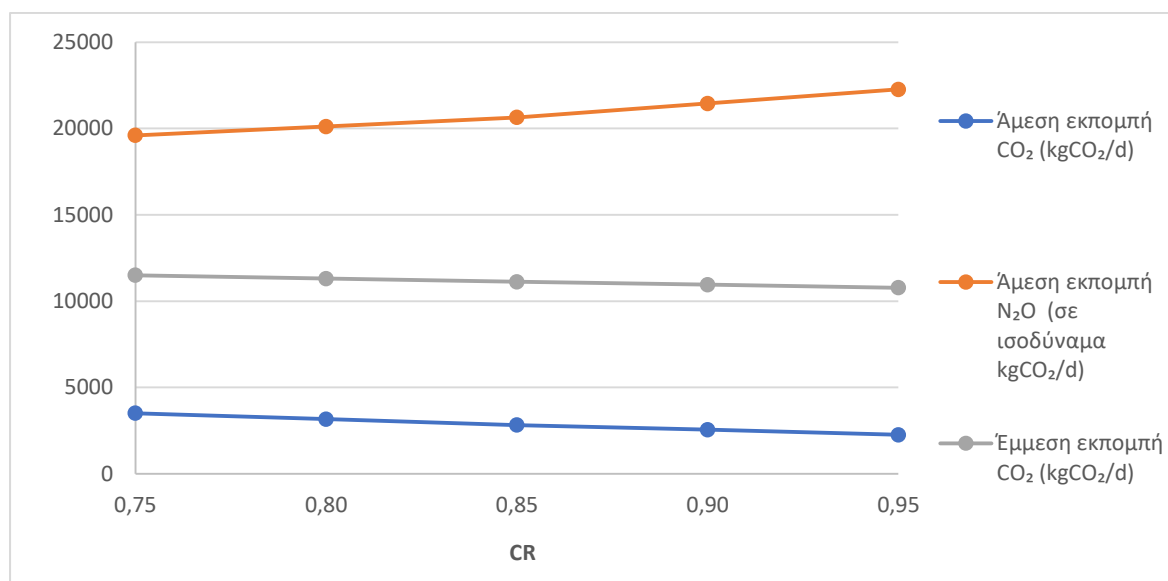


Σχήμα 4.18: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) από όλη την ΕΕΛ για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

Η αύξηση των GHG οφείλεται αποκλειστικά στην αύξηση του N₂O αφού η άμεση και η έμμεση εκπομπή CO₂ μειώνονται στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του CR όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19 που δείχνει τις επομπές GHG, σε ισοδύναμα Kg CO₂/d, στον βιολογικό αντιδραστήρα για τα διαφορετικά ποσοστά CR στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης. Εκτός από υψηλότερη εκπομπή GHG με την αύξηση του CR έχουμε και δυσμενέστερη σύνθεση των GHG που εκπέμπονται από τον βιολογικό αντιδραστήρα καθώς αυξάνεται το ποσοστό τους σε N₂O.

Μεγαλύτερο ποσοστό CR σημαίνει καλύτερος διαχωρισμός των στερεών από τα υγρά που συνθέτουν την ιλύ. Επομένως, μειώνεται το ποσοστό των οργανικών στερεών που περιέχουν τα στραγγίδια των μονάδων πάχυνσης και αφυδάτωσης οι οποίες ανακυκλοφορούνται στην είσοδο της εγκατάστασης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερο επίπεδο οργανικού άνθρακα στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του CR. Έχει παρατηρηθεί ότι χαμηλά επίπεδα οργανικού άνθρακα στη δεξαμενή

απονιτροποίησης έχουν σαν αποτέλεσμα η απονιτροποίηση να διακόπτεται στο σημείο που παράγεται N_2O σαν ενδιάμεσο προϊόν (Itokawa, Hanaki, & Matsuo, 2001), (Kampschreur, Temmink, Kleerebezem, Jetten, & van Loosdrecht, 2009)



Σχήμα 4.19: Επομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) στον βιολογικό αντιδραστήρα για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (XS) στην είσοδο της πρωτοβάθμιας δεξαμενή καθίζησης, μετά την ανακυκλοφορία των στραγγιδίων πάχυνσης και αφυδάτωσης (θέση 3) για τα διαφορετικά ποσοστά CR. Παρατηρούμε μείωση της συγκέντρωσης XS με την αύξηση του CR.

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου COD/N στην είσοδο της δεξαμενής απονιτροποίησης (θέση 7) για τα διαφορετικά ποσοστά CR. Παρατηρούμε ότι ο λόγος μειώνεται με την αύξηση του CR.

Πίνακας 4.3: Συγκέντρωση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης μετά την ανακυκλοφορία των στραγγιδίων πάχυνσης και αφυδάτωσης στη ροή εισόδου, για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών

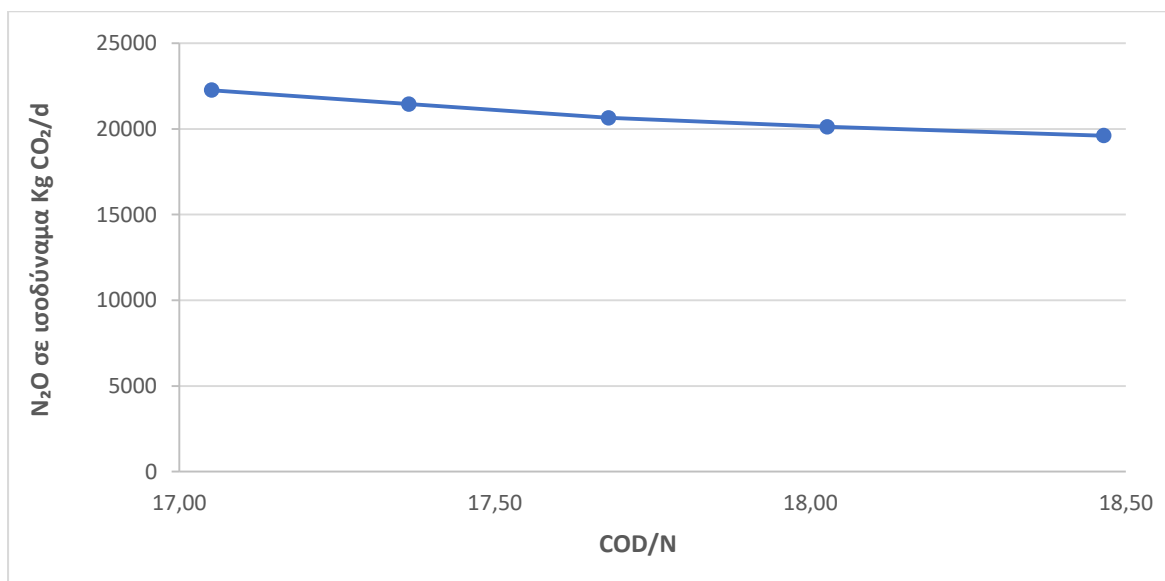
θέση 3	CR				
	75%	80%	85%	90%	95%
XS (mg/L)	472	454	437	420	405

Πίνακας 4.4: COD/N στην είσοδο της δεξαμενής απονιτροποίησης για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

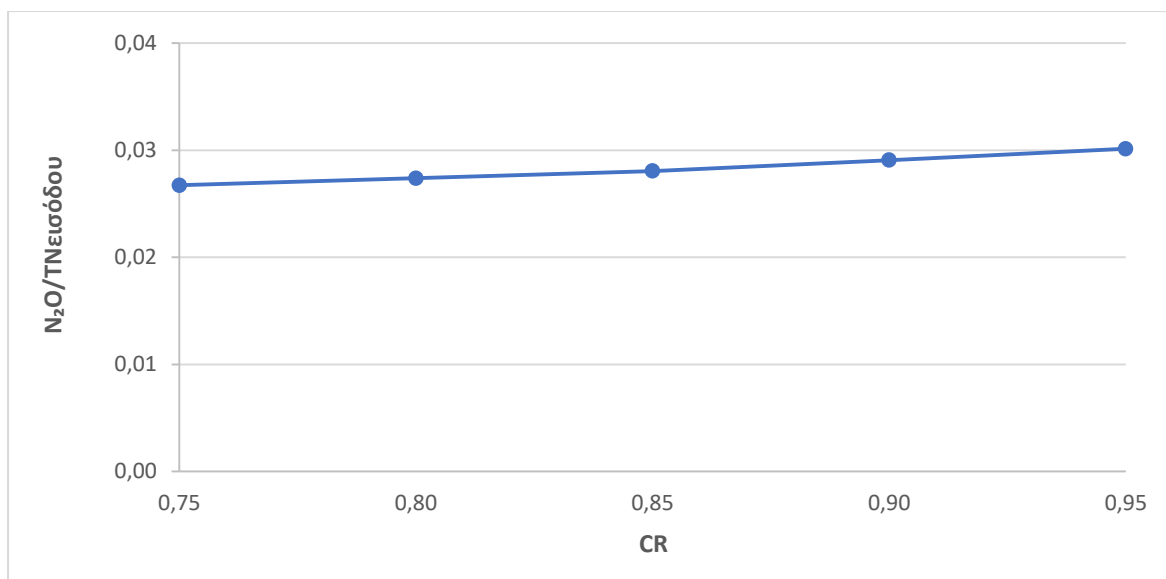
θέση 7	CR				
	75%	80%	85%	90%	95%
COD/N	18.47	18.03	17.68	17.36	17.05

Επομένως, η αύξηση της παραγωγής N_2O στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του CR φαίνεται να οφείλεται στη λιγότερο αποδοτική απονιτροποίηση στην ανοξική δεξαμενή λόγω του μειωμένου λόγου COD/N. Στο Σχήμα 4.20 φαίνεται η αύξηση των εκπομπών N_2O στον βιολογικό αντιδραστήρα με τη μείωση του λόγου COD/N.

Ακόμα, στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται ο λόγος του παραγόμενου N_2O στην ΕΕΛ προς το ολικό άζωτο (TN) που εισέρχεται στην εγκατάσταση με τα λύματα συναρτήσει των διαφορετικών ποσοστών CR. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του CR αυξάνεται ο λόγος N_2O /TNεισόδου που σημαίνει ότι αυξάνεται το ποσοστό του εισερχόμενου αζώτου που απομακρύνεται από την εγκατάσταση σαν N_2O παρά σαν N_2 .



Σχήμα 4.20: Εκπομπές N_2O στον αερόβιο αντιδραστήρα συναρτήσει του λόγου COD/N για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης



Σχήμα 4.21: Λόγος του N₂O που παράγεται στην ΕΕΛ προς το TN που εισέρχεται στην ΕΕΛ για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

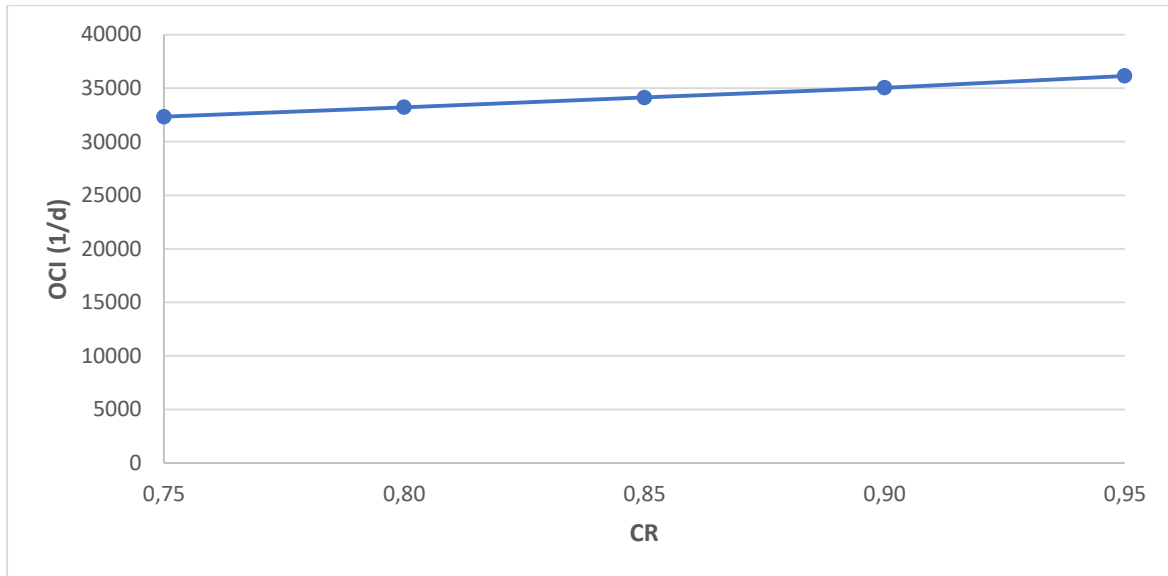
Τέλος, η μείωση της παραγωγής CO₂ στον βιολογικό αντιδραστήρα (Σχήμα 4.19) με την αύξηση του CR οφείλεται η μεν άμεση, στη μικρότερη παραγωγή βιομάζας η δε έμμεση, στη μείωση της ενέργειας αερισμού που απαιτείται.

Λόγω της λιγότερης διαθέσιμης βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του CR, γίνεται λιγότερη παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5 που δείχνει τη συγκέντρωση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH) στο τελευταίο διαμέρισμα του αερόβιου αντιδραστήρα (θέση 12) για τα διαφορετικά ποσοστά CR. Παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση μειώνεται όσο αυξάνεται ο CR. Κατά την παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας, παράγεται CO₂ από την οξείδωση του οργανικού άνθρακα. Επομένως, λιγότερη παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας σημαίνει λιγότερη οξείδωση οργανικού άνθρακα και τελικά λιγότερη άμεση παραγωγή CO₂.

Πίνακας 4.5: Συγκέντρωση ετεροτροφικών μικροοργανισμών στο τελευταίο διαμέρισμα του αερόβιου αντιδραστήρα για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

θέση 12	CR				
	75%	80%	85%	90%	95%
XBH (mg/L)	1820	1762	1708	1656	1608

Στο Σχήμα 4.22 αποτυπώνεται η σχέση του δείκτη λειτουργικού κόστους (OCI) συναρτήσει των διαφορετικών ποσοστών CR στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης



Σχήμα 4.22: Δείκτης λειτουργικού κόστους συναρτήσει των διαφορετικών ποσοστών κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

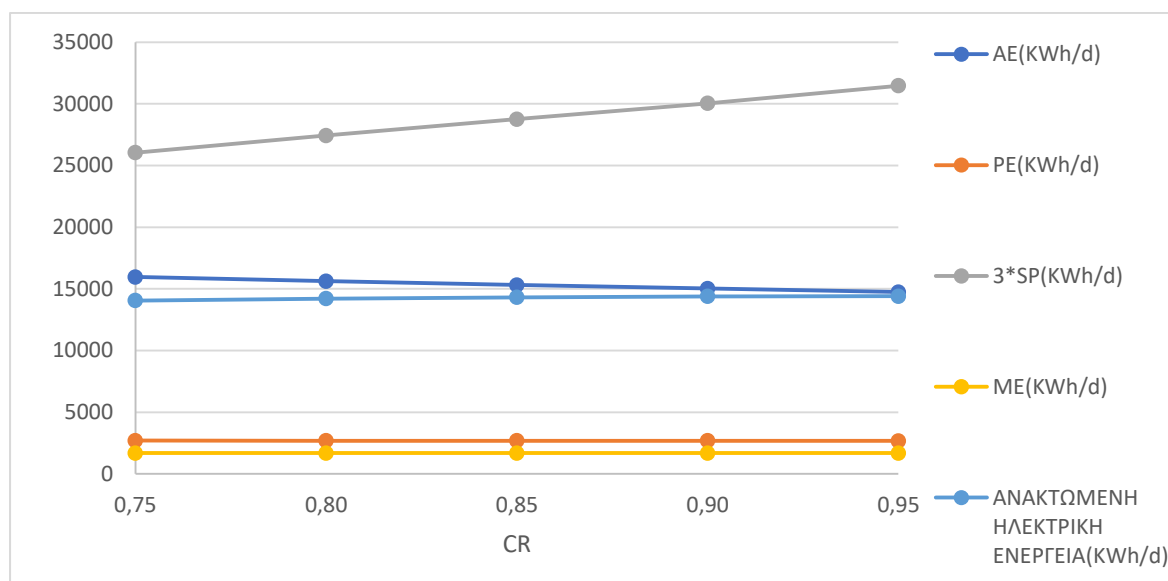
Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του ποσοστού CR αυξάνεται και ο δείκτης OCI.

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται οι ενέργειες που συνθέτουν το δείκτη OCI δηλαδή, οι ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμιξης (ME), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τα διαφορετικά ποσοστά CR στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης.

Παρατηρείται σημαντική αύξηση της ενέργειας που απαιτείται για τη διάθεση της παραγόμενης ιλύος μετά το πέρας της επεξεργασίας των λυμάτων από την εγκατάσταση. Επίσης, παρατηρείται μικρή μείωση της ενέργειας αερισμού και μικρή αύξηση της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ενέργειες ανάμιξης και άντλησης παραμένουν σχεδόν σταθερές.

Επομένως, εύκολα διακρίνεται ότι η αύξηση του δείκτη OCI με την αύξηση του ποσοστού CR οφείλεται κυρίως στην αύξηση του ενεργειακού κόστους για την διάθεση της ιλύος και δεν αντισταθμίζεται από τη μείωση του ενεργειακού κόστους για αερισμό και την αύξηση της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μείωση του ενεργειακού κόστους για αερισμό οφείλεται στη μικρότερη παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας λόγω της λιγότερης διαθέσιμης οργανικής ύλης στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του CR.



Σχήμα 4.23: Ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τα διαφορετικά ποσοστά κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης

Συγκεντρωτικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για την επίδραση, στην απόδοση της εγκατάστασης και τους δείκτες λειτουργίας, του ποσοστού κατακράτησης στερεών στις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης:

- Με την αύξηση του CR βελτιώνεται ο δείκτης EQI κυρίως λόγω της μείωσης των αιωρούμενων στερεών, συνεπώς και του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα, που διαφεύγουν μέσω της τελικής εκροής της ΕΕΛ στους υδάτινους αποδέκτες. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης των αδρανών στερεών που απομακρύνονται από την εγκατάσταση μέσω της ιλύος.
- Με την αύξηση του CR αυξάνονται οι εκπομπές GHG από την ΕΕΛ. Η αύξηση οφείλεται πρωτίστως στην παραγωγή CH₄ από την αυξημένη ποσότητα ιλύος που παράγεται και οδηγείται προς διάθεση στο έδαφος και δευτερευόντως στην παραγωγή N₂O στον βιολογικό αντιδραστήρα λόγω αναχαίτισης της απονιτροποίησης.
- Στην ανοξική δεξαμενή με την αύξηση του CR μειώνεται ο λόγος COD/N και αυξάνονται οι εκπομπές N₂O.

- Στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του CR μειώνεται ο λόγος COD/N και μειώνονται οι εκπομπές CO₂, οι οποίες κυρίως οφείλονται στην παραγωγή βιομάζας.
- Με την αύξηση του CR αυξάνεται ο δείκτης OCI λόγω αύξησης του ενεργειακού κόστους για διάθεση της ιλύος και δεν αντισταθμίζεται από τη μείωση του ενεργειακού κόστους για αερισμό και τη μικρή αύξηση της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Επομένως, συμπεραίνουμε ότι είναι επιθυμητή η επίτευξη όσο γίνεται μεγαλύτερου ποσοστού κατακράτησης στερεών από τις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης, ώστε να επωφεληθούμε τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας αυτών των μονάδων, αλλά με ταυτόχρονη προσπάθεια εξασφάλισης βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα στον βιολογικό αντιδραστήρα π.χ. μέσω υδρόλυσης της πρωτοβάθμιας ιλύος, για την αποφυγή αναχαίτισης της απονιτροποίησης στην ανοξική δεξαμενή και τον περιορισμό των εκπομπών N₂O που είναι και το κρισιμότερο GHG που εκπέμπεται από την εγκατάσταση.

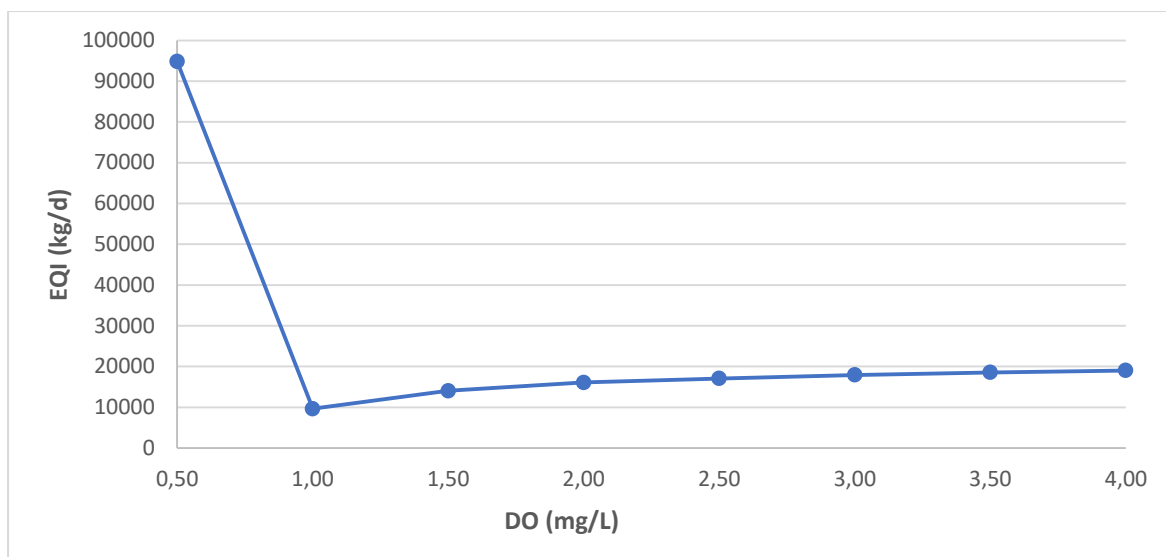
4.1.3 Σενάριο 3 : Διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών συγκεντρώσεων οξυγόνου στα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα

Στόχος σεναρίου

Στο παρόν σενάριο μελετήθηκε η επίδραση της διαφορετικής συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στα αερόβια διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση της παρουσίας διαλυμένου οξυγόνου (dissolved oxygen, DO) σε 8 διαφορετικές συγκεντρώσεις: 0,5 – 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 – 3,0 – 3,5 – 4,0 mg DO/L. Οι υπόλοιπες μεταβλητές και συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σταθερές.

Αποτελέσματα και σχολιασμός

Στο Σχήμα 4.24 αποτυπώνεται η σχέση του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI) συναρτήσεως της συγκέντρωσης DO στην αερόβια δεξαμενή του βιολογικού αντιδραστήρα. Η συγκέντρωση DO είναι ίδια και στα τέσσερα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα.



Σχήμα 4.24: Δείκτης ποιότητας εκροής συναρτήσει της συγκέντρωσης οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

Παρατηρούμε ότι για συγκέντρωση DO 0,50 mg/L ο δείκτης ποιότητας εκροής EQI είναι 9 φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για συγκέντρωση DO 1 mg/L.

Αυτό οφείλεται στο ότι η συγκέντρωση DO 0,50 mg/L δεν επαρκεί για την πραγματοποίηση της νιτροποίησης στη δεξαμενή αερισμού του βιολογικού αντιδραστήρα δηλαδή την οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου (NH_3) σε νιτρώδη (NO_2^-) και νιτρικά ιόντα (NO_3^-).

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.6, που δείχνει τη μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου για τις διάφορες συγκεντρώσεις DO στον αερόβιο αντιδραστήρα, η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου είναι σχεδόν αμετάβλητη πριν την είσοδο (θέση 8) και μετά την έξοδο των λυμάτων από την αερόβια δεξαμενή (θέση 19) για συγκέντρωση DO 0,50 mg/L. Επίσης, για την ίδια συγκέντρωση DO στον Πίνακα 4.7 παρατηρούμε ότι στην έξοδο των λυμάτων από την αερόβια δεξαμενή (θέση 19) δεν υπάρχουν νιτρικά (ως αποτέλεσμα της αδυναμίας νιτροποίησης).

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ποιότητα εκροής να είναι δυσμενής (θέση 34) λόγω της υψηλής συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου η οποία αποτυπώνεται στον όρο TKNe του EQI.

$$(\text{EQI}=(2.0*\text{TSS}+1.0*\text{COD}+30.0*\text{TKN}_e+10.0*\text{SNO}_3+2.0*\text{BOD})*Q \quad \text{kg pollution/d}).$$

Στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις DO στον αερόβιο αντιδραστήρα. Για συγκέντρωση DO 0,50

mg/L είναι φανερό ότι τον καθοριστικό ρόλο για την υψηλή τιμή του δείκτη EQI έχει η τιμή του TKNe.

Πίνακας 4.6: Μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

Αμμωνιακό άζωτο NH ₃ (mg/L)	DO (mg/L)							
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
8	48,67	12,08	11,13	10,66	10,43	10,23	10,09	10,00
19	46,28	0,12	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
34	46,28	0,12	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02

Στη συγκέντρωση DO 1 mg/L αντιστοιχεί η μικρότερη τιμή του δείκτη EQI. Από τη συγκέντρωση αυτή και μέχρι τη συγκέντρωση DO 4 mg/L παρατηρούμε ότι αυξάνεται ο δείκτης με μέγιστη τιμή 2 φορές μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στη συγκέντρωση DO 1 mg/L.

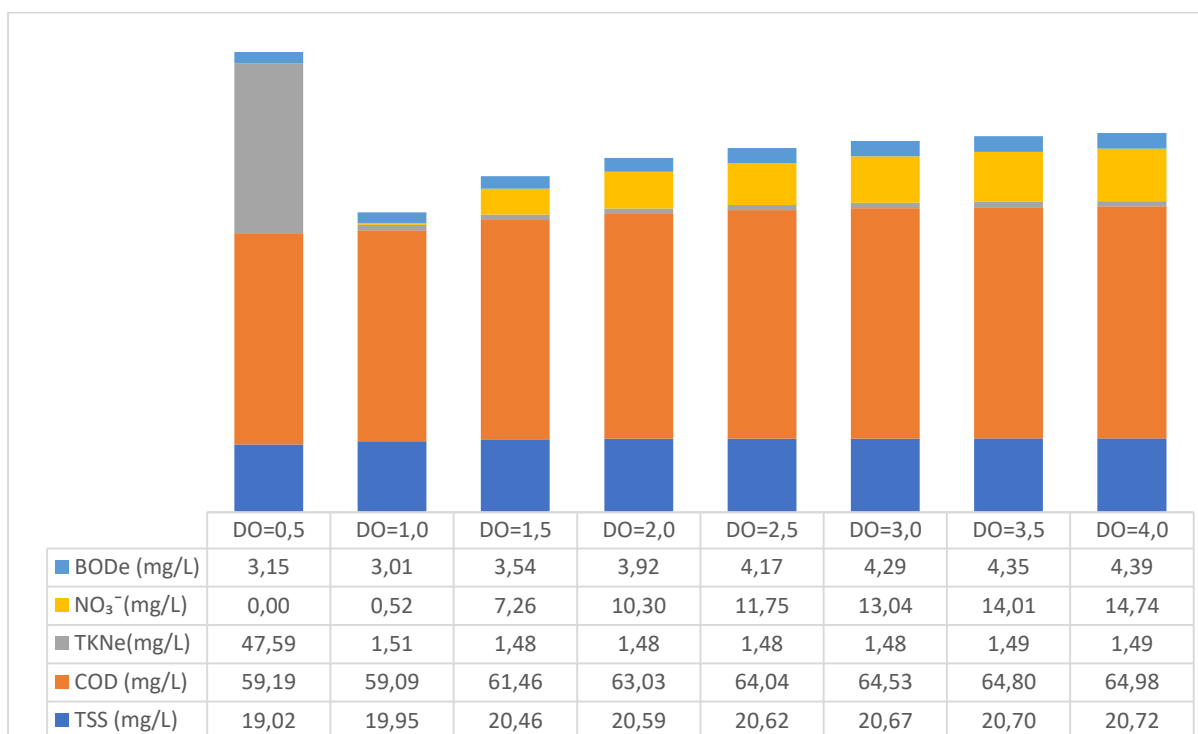
Αυτό οφείλεται στο ότι όταν αυξάνεται η συγκέντρωση του DO στον αερόβιο αντιδραστήρα βελτιώνεται η νιτροποίηση. Επομένως, αυξάνεται η συγκέντρωση των NO₃⁻ στην αερόβια δεξαμενή.

Στον Πίνακα 4.7, στον οποίο παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των νιτρικών στην έξοδο της δεξαμενής αερισμού (θέση 19) του βιολογικού αντιδραστήρα καθώς και στην έξοδο των επεξεργασμένων λυμάτων της εγκατάστασης (θέση 34) φαίνεται η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών με την αύξηση της συγκέντρωσης του DO καθώς και οι σταθερές τιμές των συγκεντρώσεων μεταξύ των δύο αυτών θέσεων. Η συγκέντρωση νιτρικών που διαφεύγει στην έξοδο της εγκατάστασης αποτυπώνεται στον όρο SNO₃ του EQI.

Στο Σχήμα 4.25 για συγκεντρώσεις DO από 1 μέχρι 4 mg/L φαίνεται να αυξάνεται διαδοχικά η τιμή του NO₃⁻ και ταυτόχρονα η τιμή του δείκτη EQI ενώ οι υπόλοιποι όροι παρουσιάζουν πολύ μικρότερη διαφορά.

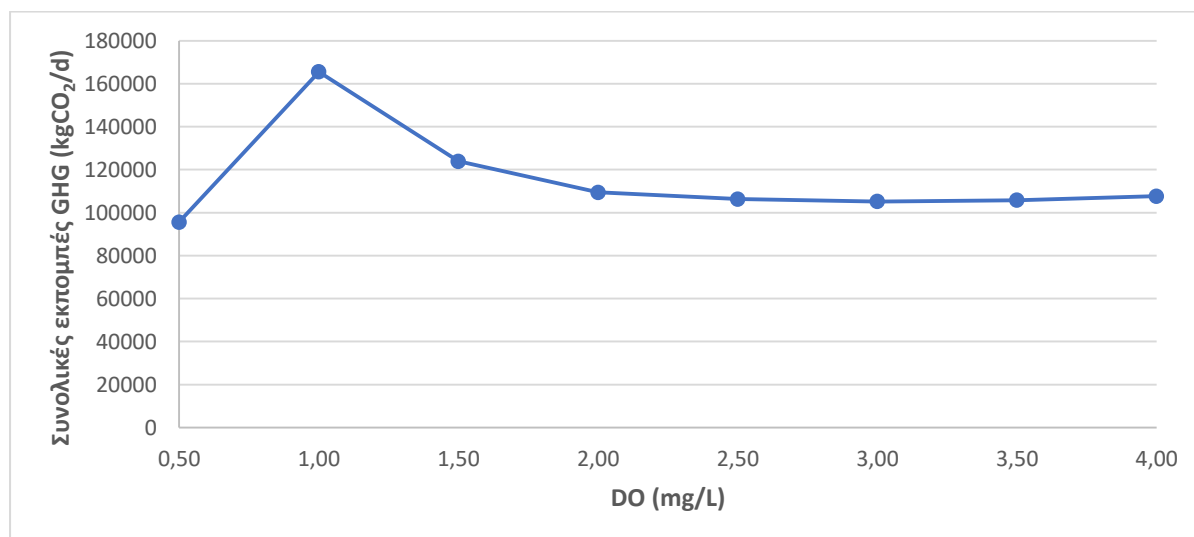
Πίνακας 4.7: Μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

Νιτρικά ιόντα NO ₃ ⁻ (mg/L)	DO (mg/L)							
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
19	0,00	0,52	7,26	10,30	11,75	13,04	14,01	14,74
34	0,00	0,52	7,26	10,30	11,75	13,04	14,01	14,74



Σχήμα 4.25: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

Στο Σχήμα 4.26 αποτυπώνεται η σχέση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από την ΕΕΛ συναρτήσει της συγκέντρωσης DO στην αερόβια δεξαμενή του βιολογικού αντιδραστήρα. Η συγκέντρωση DO είναι ίδια και στα τέσσερα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα.



Σχήμα 4.26: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) συναρτήσει της συγκέντρωσης οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

Παρατηρούμε ότι για συγκέντρωση DO 0,5 mg/L έχουμε τη χαμηλότερη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, οφείλεται στο ότι δεν πραγματοποιείται η λειτουργία της νιτροποίησης στον βιολογικό αντιδραστήρα που είναι και η κύρια πηγή N₂O.

Για συγκέντρωση DO 1 mg/L έχουμε την υψηλότερη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Οφείλεται στο ότι με αυτή τη χαμηλή συγκέντρωση DO πραγματοποιείται μόνο η διαδικασία της νιτρωδοποίησης (nitritation) και όχι η νιτροποίηση (nitrification) δύο σταδίων όπου τα NO₂⁻ στη συνέχεια οξειδώνονται σε NO₃⁻. Η νιτρωδοποίηση πραγματοποιείται από τα αυτοτροφικά βακτήρια που οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο (AOB) και η διαφορά από την πλήρη νιτροποίηση είναι ότι το αμμωνιακό άζωτο οξειδώνεται σε νιτρώδη (NO₂⁻) και η οξείδωση σταματάει εκεί δηλαδή, δεν οξειδώνονται περαιτέρω τα NO₂⁻ σε NO₃⁻. Η οξείδωση των NO₂⁻ σε NO₃⁻ γίνεται από τα βακτήρια που οξειδώνουν τα νιτρώδη (NOB).

Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης των NO₂⁻ από τη νιτρωδοποίηση και της χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου, λαμβάνει χώρα η αυτοτροφική απονιτροποίηση των NO₂⁻ από τα νιτροποιητικά βακτήρια η οποία καταλήγει στην παραγωγή N₂O.

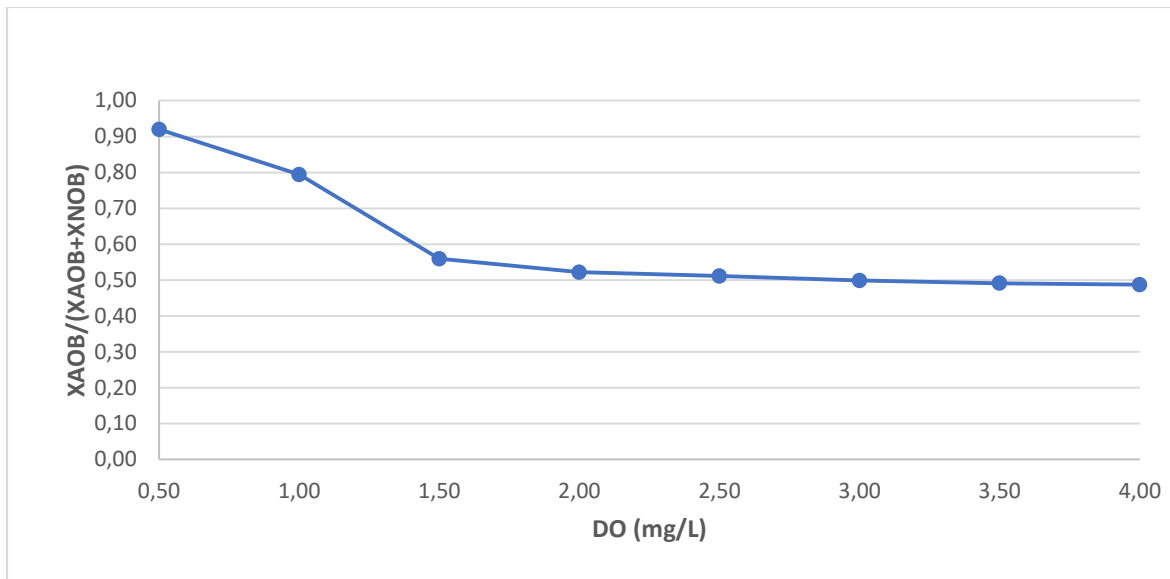
Στον Πίνακα 4.7 είναι εμφανής η μικρή τιμή της συγκέντρωσης των NO_3^- για συγκέντρωση DO 1 mg/L σε σχέση με τις τιμές συγκέντρωσης NO_3^- που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις DO.

Στο Σχήμα 4.27 φαίνονται τα ποσοστά των AOB στο σύνολο των AOB και NOB στην αερόβια δεξαμενή για τις διάφορες τιμές συγκέντρωσης DO. Παρατηρούμε ότι για συγκέντρωση DO 1 mg/L το ποσοστό των AOB είναι 80% επομένως, το ποσοστό των NOB που μετατρέπονται σε NO_2^- σε NO_3^- είναι μόλις 20%.

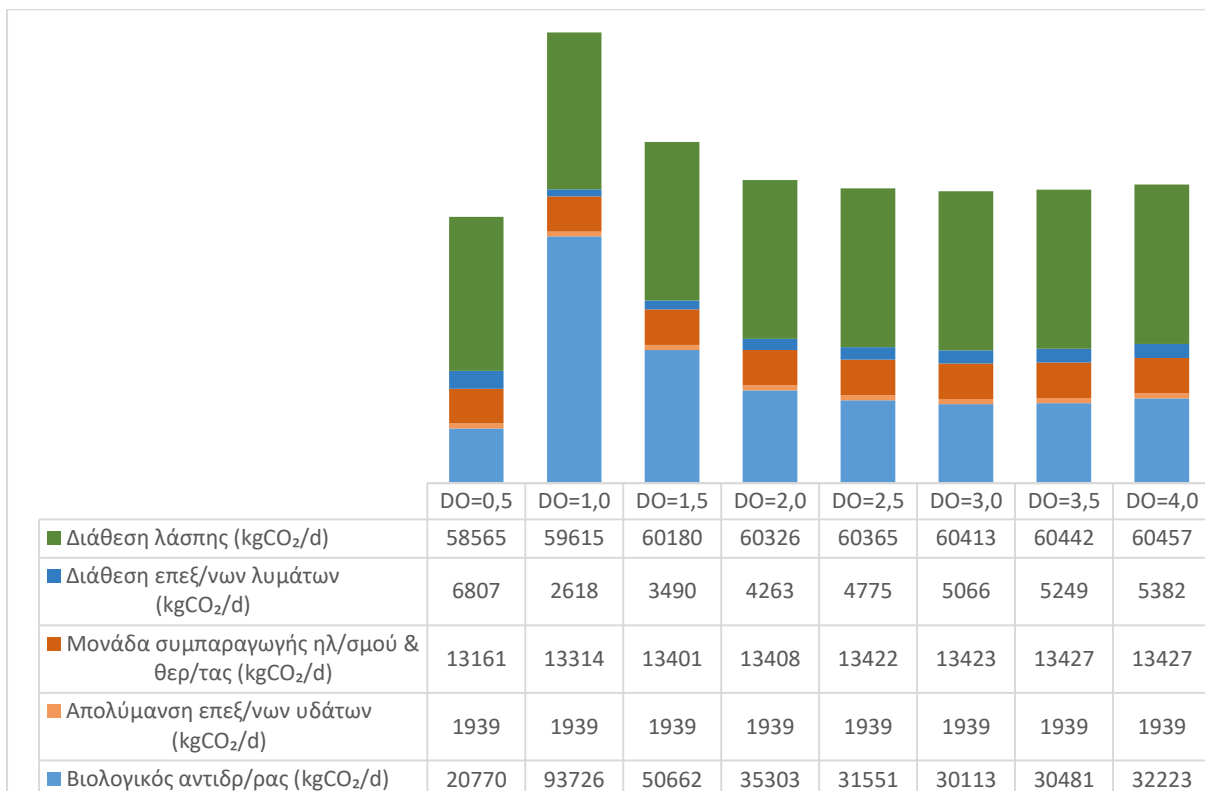
Στο Σχήμα 4.28 απεικονίζονται οι σημαντικότερες εκπομπές GHG σε ισοδύναμα Kg CO_2/d από όλη την ΕΕΛ για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις DO στον αερόβιο αντιδραστήρα. Είναι εμφανές ότι για συγκέντρωση DO 1 mg/L η υψηλή τιμή των GHG οφείλεται στον βιολογικό αντιδραστήρα.

Στο Σχήμα 4.29, στο οποίο παρουσιάζονται αναλυτικά οι άμεσες και έμμεσες εκπομπές GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις DO, φαίνεται ότι συγκεκριμένα η υψηλή τιμή των GHG οφείλεται στην άμεση εκπομπή N_2O στη δεξαμενή αερισμού.

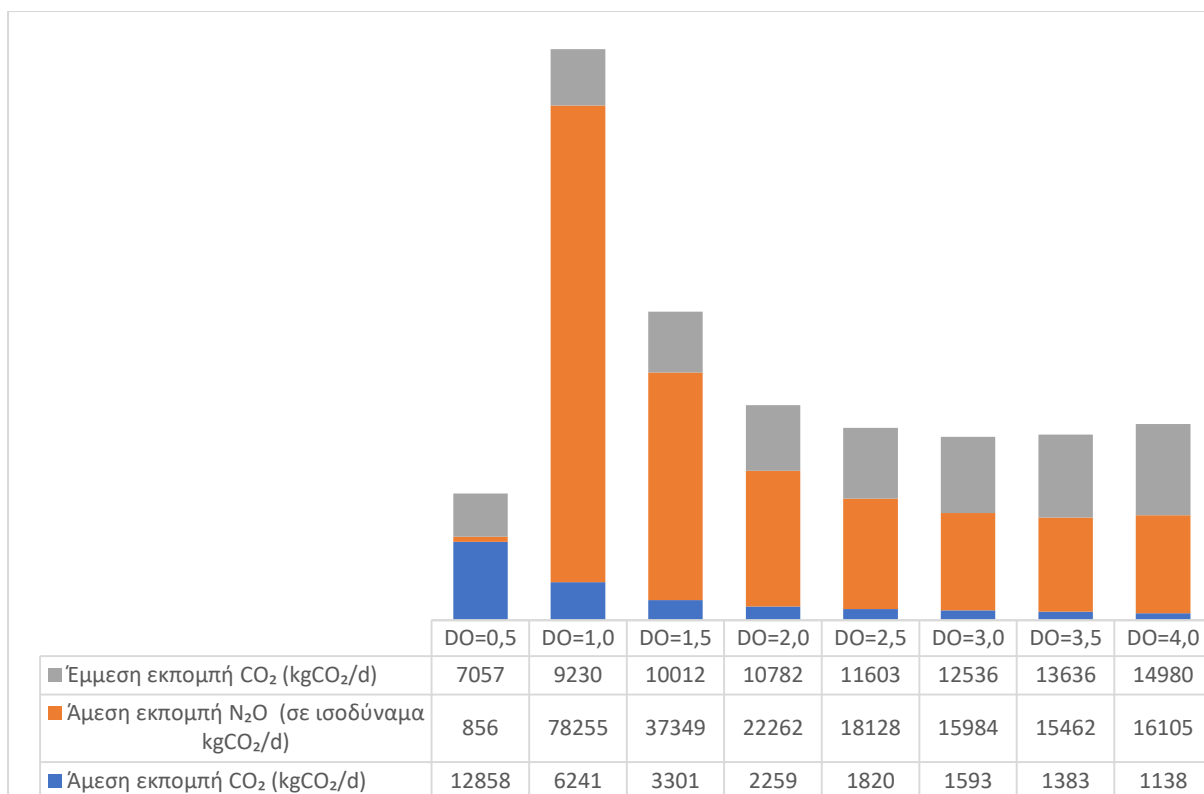
Κατά τη νιτροδοποίηση, N_2O μπορεί να παραχθεί και από την οξείδωση της υδροξυλαμίνης (NH_2OH) που είναι το προϊόν της οξείδωσης του αμμωνιακού αζώτου. Ωστόσο, σύμφωνα με τους (Massara, et al., 2017) σε χαμηλές συγκεντρώσεις DO και παρουσία NO_2^- ευνοείται η παραγωγή N_2O λόγω της αυτοτροφικής απονιτροποίησης των NO_2^- από τα νιτροποιητικά βακτήρια. Αντίθετα, η παραγωγή N_2O λόγω της οξείδωσης της NH_2OH ευνοείται σε υψηλές συγκεντρώσεις DO και ταυτόχρονα σε χαμηλές συγκεντρώσεις NO_2^- .



Σχήμα 4.27: Ποσοστό των AOB στο σύνολο των AOB και NOB στον αερόβιο αντιδραστήρα για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου



Σχήμα 4.28: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) από όλη την ΕΕΛ για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

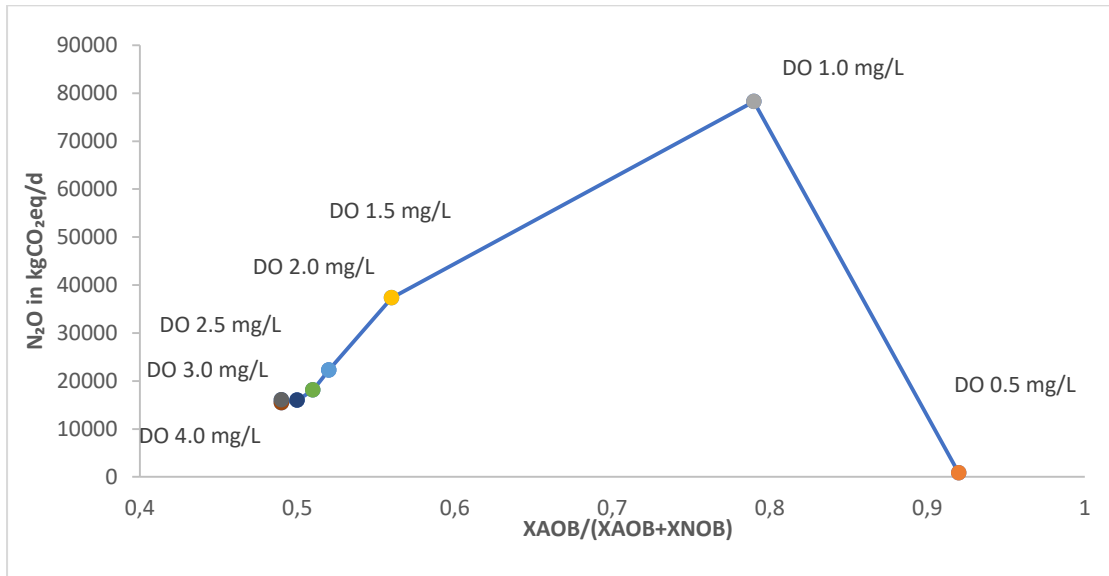


Σχήμα 4.29: Ανάλυση άμεσων και έμμεσων εκπομπών GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα σε ισοδύναμα Kg CO₂/d για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου

Στην προσπάθεια να επιτευχθεί η λειτουργία των ΕΕΛ ώστε να συνδυάζουν καλή ποιότητα εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων (EQI) και χαμηλό λειτουργικό κόστος (OCI) η νιτροδωποίηση φαίνεται ελκυστική. Έχει χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις σε αερισμό, λόγω της χαμηλότερης συγκέντρωσης DO στην οποία λειτουργεί, με ταυτόχρονη χαμηλότερη απαίτηση σε οργανική ύλη για τη λειτουργία της απονιτροποίησης. Ωστόσο, συνεισφέρει καθοριστικά στο αποτύπωμα άνθρακα της εγκατάστασης λόγω της υψηλής εκπομπής N₂O κατά τη εκτέλεσή της (Ahn, Kwan, & Chandran, 2011).

Στο Σχήμα 4.30, που απεικονίζονται οι εκπομπές N₂O στον αερόβιο αντιδραστήρα συναρτήσει του λόγου XAOB/(XAOB+XNOB) για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις DO, είναι εμφανής η αύξηση των N₂O με την αύξηση του λόγου XAOB/(XAOB+XNOB), δηλαδή τη χαμηλή συγκέντρωση των NOB στον αερόβιο αντιδραστήρα. Η χαμηλή συγκέντρωση των NOB συνηγορεί στη λειτουργία νιτροδωποίησης και όχι νιτροποίησης στον αερόβιο αντιδραστήρα. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι όσο η νιτροποίηση δεν ολοκληρώνεται αλλά σταματάει στη νιτροδωποίηση τόσο ευνοείται η παραγωγή N₂O. Επομένως, η

νιτροδοποίηση απορρίπτεται σαν λύση για χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα της εγκατάστασης.



Σχήμα 4.30: Εκπομπές N₂O στον αερόβιο αντιδραστήρα συναρτήσει του λόγου ΧΑΟΒ/(ΧΑΟΒ+ΧΝΟΒ) για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις DO

Εκτός από παραγωγή N₂O λόγω της νιτροδοποίησης, αρνητικές επιπτώσεις υπάρχουν και στη συγκέντρωση του CO₂. Τα AOB και NOB είναι αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούν ως πηγή άνθρακα το CO₂ για την παραγωγή της βιομάζας τους. Επομένως, καταναλώνουν CO₂. Ωστόσο, κατά τη νιτροδοποίηση παραλείπεται το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης δηλαδή η οξείδωση των NO₂⁻ σε NO₃⁻ από τους NOB και επομένως, δεν καταναλώνεται η ποσότητα CO₂ που θα χρειαζόνταν οι NOB για τον παραγωγή της βιομάζας τους. Στο Σχήμα 4.29 παρατηρείται η σχεδόν 5,5 φορές μεγαλύτερη τιμή της άμεσης εκπομπής CO₂ για συγκέντρωση DO 1 mg/L σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή για συγκέντρωση DO 4 mg/L.

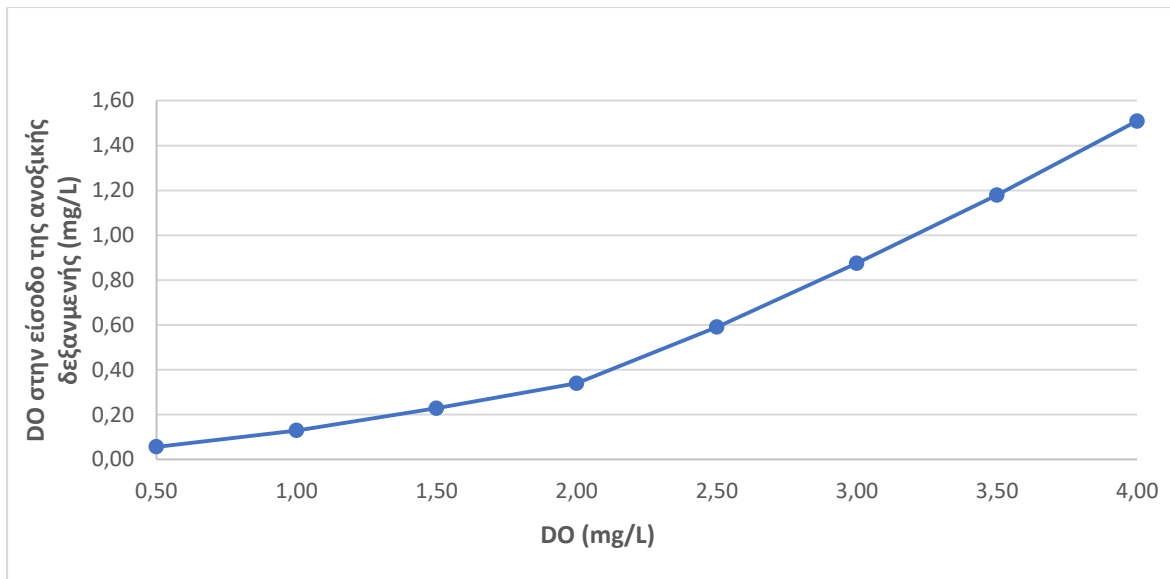
Επανερχόμενοι στο Σχήμα 4.26, από την συγκέντρωση DO 1 mg/L μέχρι τη συγκέντρωση 3 mg/L παρατηρούμε μείωση της εκπομπής αερίων θερμοκηπίου. Αυτό οφείλεται στο ότι, με την αύξηση της συγκέντρωσης του DO μέχρι την συγκέντρωση των 3 mg/L στα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα, επιτυγχάνεται αποδοτικότερη και ολοκληρωμένη νιτροποίηση και επομένως κατανάλωση CO₂ και λιγότερη παραγωγή N₂O. Ωστόσο, αυξάνεται η έμμεση εκπομπή CO₂ λόγω της κατανάλωσης ενέργειας για την παροχή όλο και μεγαλύτερης συγκέντρωσης DO αλλά το ισοζύγιο δείχνει μείωση της εκπομπής αερίων θερμοκηπίου.

Η μικρή αύξηση των GHG για συγκέντρωση DO 3,5 mg/L σε σχέση με την τιμή των GHG για συγκέντρωση DO 3 mg/L φαίνεται να οφείλεται οριακά στην έμμεση εκπομπή CO₂ λόγω της κατανάλωσης ενέργειας.

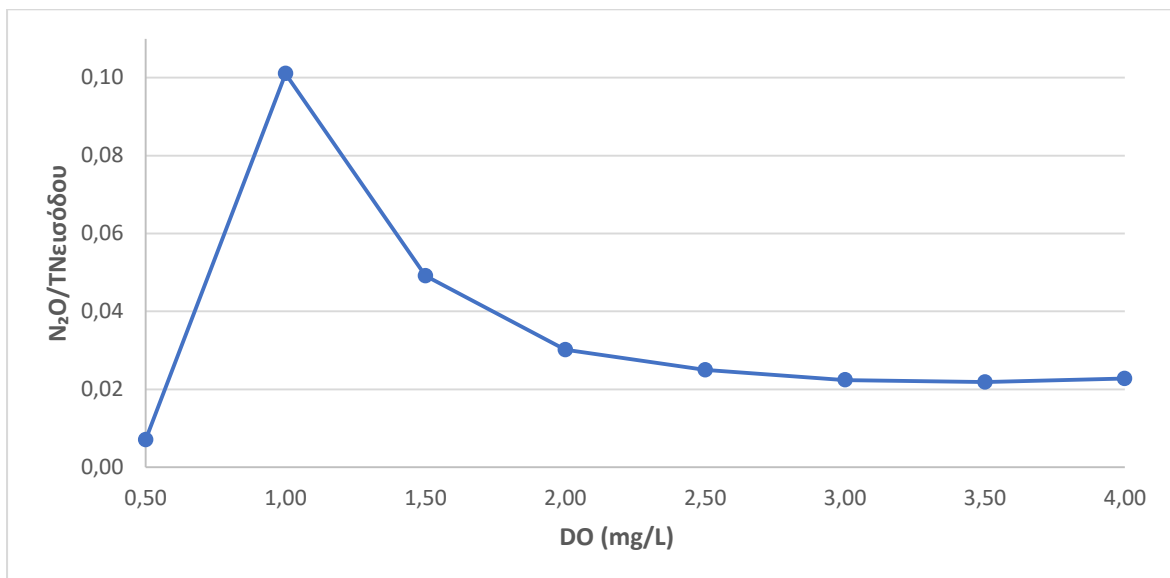
Για την συγκέντρωση DO 4 mg/L η αύξηση των GHG οφείλεται πλέον στην αύξηση του N₂O από τον βιολογικό αντιδραστήρα.

Το Σχήμα 4.29 δείχνει την αύξηση της συγκέντρωσης του N₂O για συγκέντρωση οξυγόνου 4 mg/L όταν για DO από 1 mg/L μέχρι 3,5 mg/L η τιμή του N₂O μειώνεται. Η αύξηση αυτή οφείλεται στις εκπομπές N₂O από την ανοξική δεξαμενή λόγω της συγκέντρωσης DO που καταλήγει εκεί από την αερόβια δεξαμενή μέσω της εσωτερικής ανακυκλοφορίας (Σχήμα 4.31). Το N₂O είναι ενδιάμεσο προϊόν της απονιτροποίησης και παράγεται σημαντικά με την παρουσία O₂ (Massara, et al., 2017). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι το ένζυμο που μετατρέπει το N₂O σε N₂ κατά την απονιτροποίηση (N₂OR) είναι ευαίσθητο στην ύπαρξη DO και με την παρουσία του μειώνεται η συγκέντρωσή του (Zhou, Pijuan, Zeng, & Zhiguo, 2008). Επομένως, η διαδικασία της απονιτροποίησης δεν ολοκληρώνεται αλλά σταματάει στο στάδιο που έχει παραχθεί N₂O.

Το Σχήμα 4.32 δείχνει τη σχέση του λόγου του N₂O που παράγεται στην ΕΕΛ προς το TN που εισέρχεται στην ΕΕΛ με τις διαφορετικές συγκεντρώσεις DO στον αερόβιο αντιδραστήρα. Παρατηρούμε ότι μετά τη συγκέντρωση DO 1 mg/L, που αρχίζει η νιτροποίηση, ο λόγος μισραίνει με την αύξηση του DO μέχρι τη συγκέντρωση των 3,5 mg/L που οφείλεται στην καλύτερη λειτουργία της νιτροποίησης ενώ στην τιμή των 4 mg/L γίνεται μια μικρή αύξηση του λόγου η οποία οφείλεται στην μικρότερη απόδοση της πλήρους απονιτροποίησης με την αύξηση του DO στην ανοξική δεξαμενή.

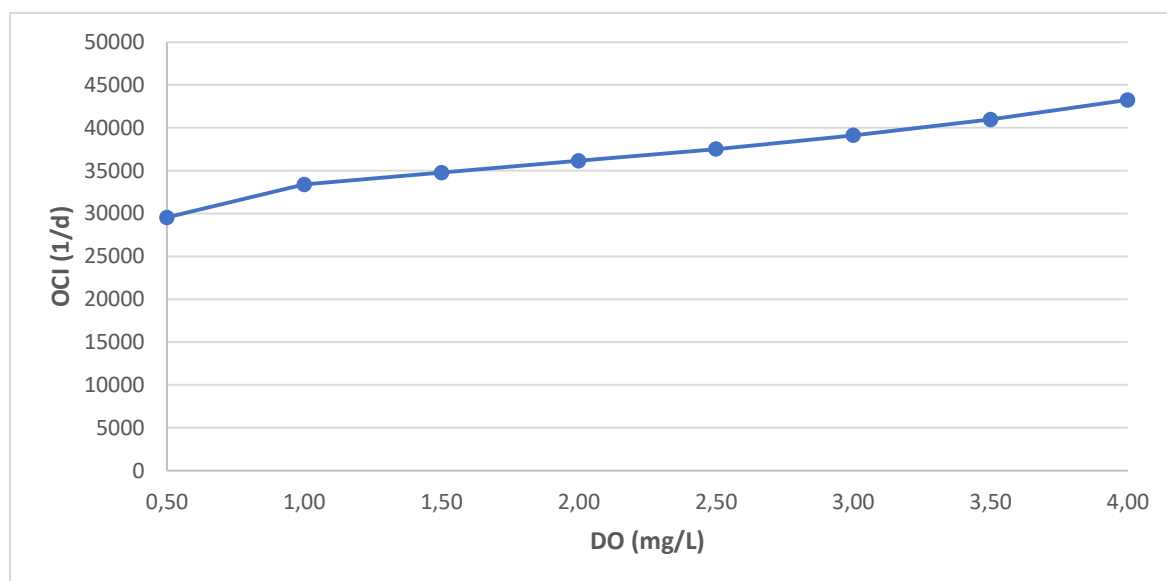


Σχήμα 4.31: Συγκέντρωση οξυγόνου στην είσοδο της ανοξικής δεξαμενής συναρτήσει των διαφορετικών συγκεντρώσεων οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα



Σχήμα 4.32: Λόγος του N₂O που παράγεται στην ΕΕΛ προς το TN που εισέρχεται στην ΕΕΛ για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

Στο Σχήμα 4.33 αποτυπώνεται η σχέση του δείκτη λειτουργικού κόστους (OCI) συναρτήσει της συγκέντρωσης DO στην αερόβια δεξαμενή του βιολογικού αντιδραστήρα. Η συγκέντρωση DO είναι ίδια και στα τέσσερα διαμερίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα.



Σχήμα 4.33: Δείκτης λειτουργικού κόστους συναρτήσει της συγκέντρωσης οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

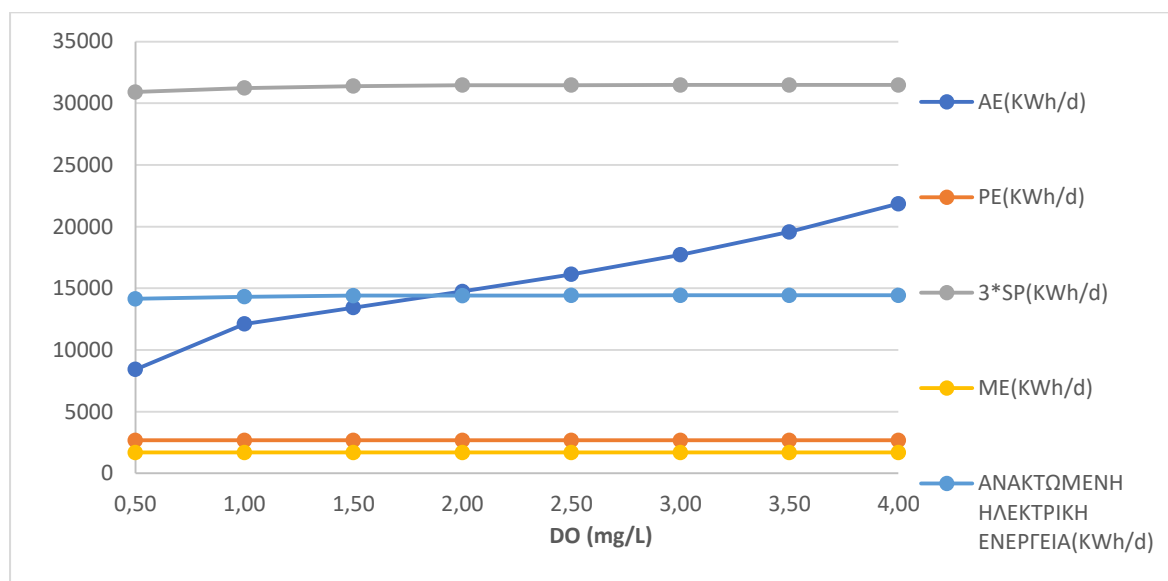
Παρατηρούμε ότι ο δείκτης OCI αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης DO στον αερόβιο αντιδραστήρα.

Στο Σχήμα 4.34 παρουσιάζονται οι ενέργειες που συνθέτουν το δείκτη OCI δηλαδή, οι ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της ιλύος ($3*SP$) και η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις DO στον αερόβιο αντιδραστήρα.

Βλέπουμε ότι το κόστος λόγω της διάθεσης της ιλύος είναι το υψηλότερο κόστος του δείκτη OCI όμως δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση στην τιμή του για τις διαφορετικές τιμές του DO. Αντιθέτως, η τιμή του κόστους αερισμού που είναι η δεύτερη υψηλότερη τιμή παρουσιάζει σημαντική αύξηση με την αύξηση της συγκέντρωσης του DO. Οι υπόλοιπες ενέργειες παρουσιάζουν επίσης μικρή διακύμανση με την αύξηση του DO. Επομένως, η αύξηση του OCI οφείλεται στην αύξηση της ενέργειας που απαιτείται για παροχή DO στη δεξαμενή αερισμού του βιολογικού αντιδραστήρα.

Τέλος, παρατηρούμε ότι η τιμή της ανακτώμενης ενέργειας, η οποία προκύπτει από τις διεργασίες του αναερόβιου χωνευτή, παραμένει σχεδόν σταθερή με την αύξηση της

συγκέντρωσης του DO. Επομένως, δεν την επηρεάζει σημαντικά η μεταβολή της συγκέντρωσης του DO στον αερόβιο αντιδραστήρα.



Σχήμα 4.34: Ενέργειες αερισμού (ΑΕ), άντλησης (ΡΕ), ανάμειξης (ΜΕ), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα

Συγκεντρωτικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για την επίδραση, στην απόδοση της εγκατάστασης και τους δείκτες λειτουργίας, της διαφορετικής συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στα αερόβια διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα:

- Με χαμηλή συγκέντρωση DO της τάξης των 0,50 mg/L δεν πραγματοποιείται η νιτροποίηση. Για τις τιμές που εξετάστηκαν, η νιτροποίηση ξεκινάει από τη συγκέντρωση DO 1 mg/L. Συνεπώς ο EQI για χαμηλά DO είναι χειρότερος αφού στην έξοδο διαφεύγει μεγαλύτερη συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου.
- Όσο η νιτροποίηση δεν ολοκληρώνεται αλλά σταματάει στη νιτροδοποίηση τόσο ευνοείται η παραγωγή N₂O. Για χαμηλές συγκεντρώσεις DO έχουμε υψηλές εκπομπές N₂O λόγω της νιτροδοποίησης. Επίσης, λόγω της νιτροδοποίησης έχουμε και υψηλότερες εκπομπές CO₂.
- Για συγκέντρωση DO 4 mg/L στον αερόβιο αντιδραστήρα, έχουμε χαμηλότερη απόδοση της απονιτροποίησης λόγω της συγκέντρωσης DO που μεταφέρεται μέσω της εσωτερικής ανακυκλοφορίας από τον αερόβιο αντιδραστήρα και συνεπώς παρατηρείται αύξηση των GHG.

- Με την αύξηση του DO αυξάνεται το OCI επειδή αυξάνεται η ενέργεια που απαιτείται για αερισμό της αερόβιας δεξαμενής.

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων η βέλτιστη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στον βιοαντιδραστήρα κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3 mg/L.

Η συγκέντρωση DO 0,5 mg/L απορρίπτεται επειδή έχουμε χαμηλή ποιότητα εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων λόγω αδυναμίας επίτευξης νιτροποίησης.

Αντίστοιχα δεν μπορεί να προταθεί η λειτουργία των δεξαμενών αερισμού με συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου της τάξης του 1 mg/L αφού δεν καθίσταται δυνατή η επίτευξη πλήρους νιτροποίησης.

Η συγκέντρωση DO 1,5 mg/L απορρίπτεται επειδή η τιμή της εκπομπής GHG αν και παρουσιάζει σημαντική μείωση σε σχέση με αυτή που αντιστοιχεί στη συγκέντρωση DO 1 mg/L παραμένει πολύ υψηλότερη από αυτές που αντιστοιχούν στις συγκεντρώσεις από 2 μέχρι 3. mg/L.

Η συγκέντρωση DO 3,5 mg/L απορρίπτεται επειδή παρουσιάζει αύξηση των GHG σε σχέση με τη συγκέντρωση των 3 mg/L που οφείλεται στην κατανάλωση ενέργειας για αερισμό και παρουσιάζει και υψηλότερο δείκτη OCI.

Τέλος, η συγκέντρωση DO 4 mg/L απορρίπτεται επειδή παρουσιάζει αύξηση των GHG λόγω λιγότερο αποδοτικής απονιτροποίησης στην ανοξική δεξαμενή εξαιτίας της παρουσίας DO και παρουσιάζει και υψηλότερο δείκτη OCI.

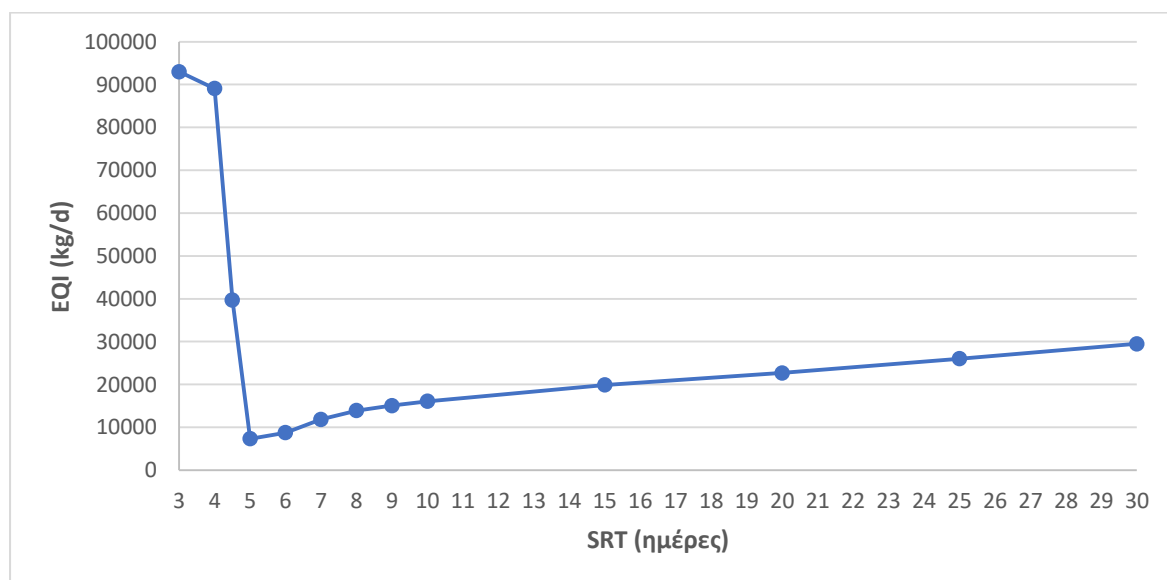
4.1.4 Σενάριο 4: Διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών χρόνων παραμονής μικροοργανισμών στο σύστημα ενεργού ιλύος

Στόχος σεναρίου

Στο παρόν σενάριο μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών χρόνων παραμονής μικροοργανισμών στο σύστημα ενεργού ιλύος. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών χρόνων παραμονής μικροοργανισμών (sludge retention time, SRT) στις τιμές: 3– 4 – 4,5 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 15 – 20 – 25 – 30 ημέρες. Οι υπόλοιπες μεταβλητές και συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σταθερές.

Αποτελέσματα και σχολιασμός

Στο Σχήμα 4.35 αποτυπώνεται η σχέση του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI) συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής (SRT) των μικροοργανισμών στον βιολογικό αντιδραστήρα.

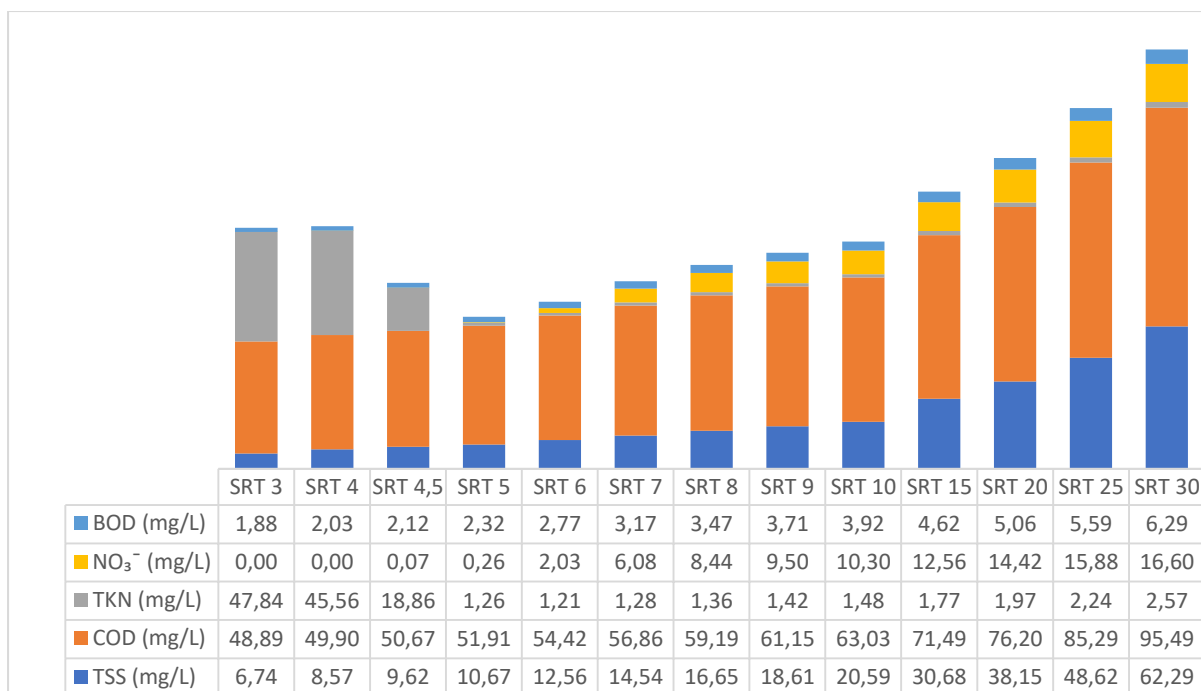


Σχήμα 4.35: Δείκτης ποιότητας εκροής συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα

Παρατηρούμε ότι για SRT 3 ημέρες ο δείκτης EQI παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή του. Έπειτα, για SRT 4 ημέρες παρουσιάζει μικρή μείωση, για SRT 4,5 ημέρες παρουσιάζει σημαντική μείωση και για SRT 5 ημέρες παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή του. Για όλες τις επόμενες τιμές του SRT παρουσιάζεται σταδιακή αύξηση του δείκτη EQI μέχρι περίπου τρεις φορές υψηλότερη τιμή σε σύγκριση με τη χαμηλότερη τιμή του.

Το Σχήμα 4.36 δείχνει τις συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές τιμές του SRT. Για SRT 3 και 4 ημέρες η υψηλή τιμή του δείκτη EQI οφείλεται στη συγκέντρωση των TKNe στην έξοδο της εγκατάστασης. Σε αυτόν τον όρο του EQI περιλαμβάνεται και το αμμωνιακό άζωτο το οποίο απομακρύνεται από τα λύματα με τη διαδικασία της νιτροποίησης.

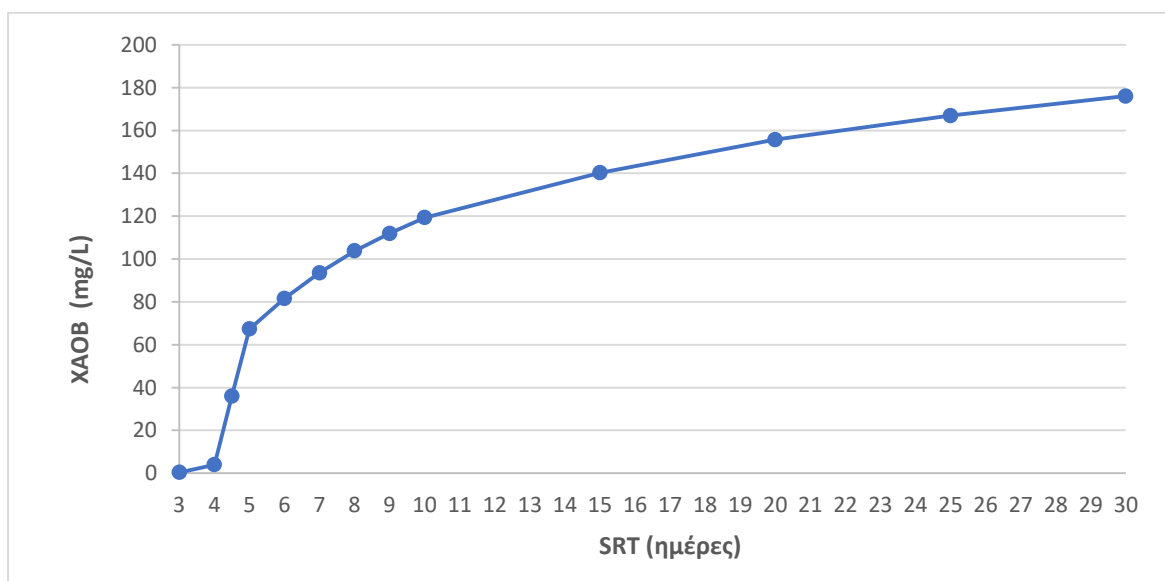
$$(TKNe = (SNH + i_{xb} \cdot (X_{BH} + X_{AOB} + X_{NOB}) + i_{XP} \cdot (X_I + i_{NS_I} \cdot S_I + i_{NX_S} \cdot X_S))$$



Σχήμα 4.36: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές ημέρες παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα

Το Σχήμα 4.37 δείχνει τη συγκέντρωση των χ_{AOB} στο τελευταίο διαμέρισμα του αερόβιου αντιδραστήρα (θέση 12) για τις διαφορετικές τιμές SRT. Παρατηρούμε ότι για SRT 3 και 4 ημέρες η συγκέντρωση των χ_{AOB} είναι πολύ χαμηλή.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για SRT 3 και 4 ημέρες δεν πραγματοποιείται η διαδικασία της νιτροποίησης στην αερόβια δεξαμενή.

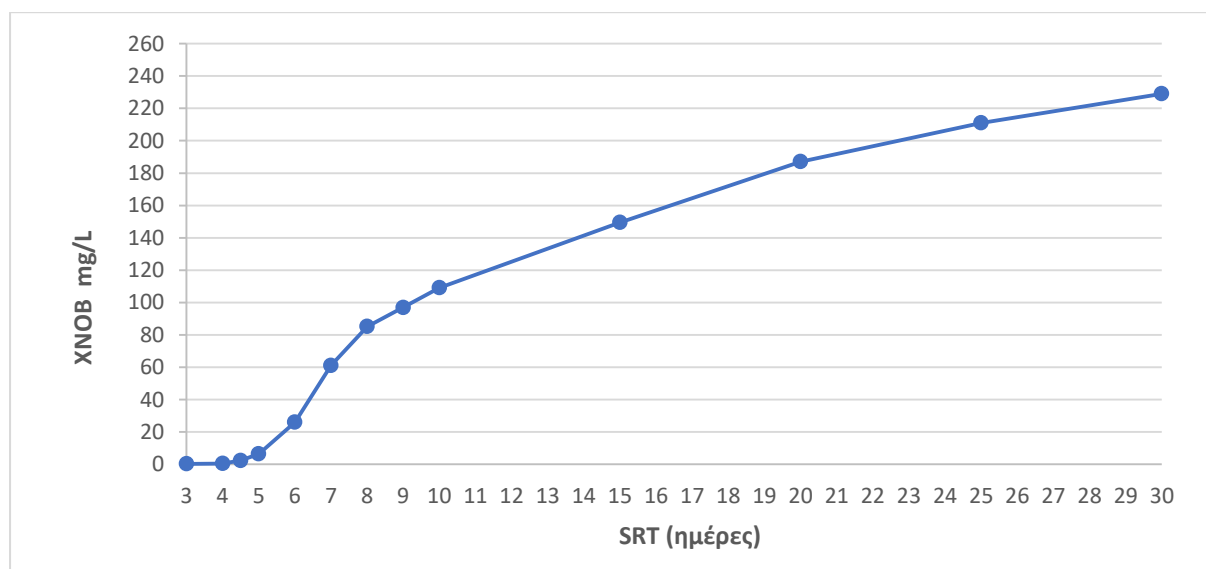


Σχήμα 4.37: Συγκέντρωση των χ_{AOB} στο τελευταίο διαμέρισμα της αερόβιας δεξαμενής για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα

Για SRT 4,5 ημέρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.36, γίνεται εν μέρει απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου, και έτσι μειώνεται ο όρος TKN_e ενώ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.37 η συγκέντρωση των X_{AOB} σταδιακά αυξάνεται. Ωστόσο, φαίνεται να συμβαίνει νιτροδωποίηση και όχι πλήρης νιτροποίηση στην αερόβια δεξαμενή. Με επάρκεια διαλυμένου οξυγόνου (DO) στον αερόβιο αντιδραστήρα φαίνεται να είναι κρίσιμος ο χρόνος παραμονής στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα SRT για την επικράτηση της νιτροποίησης ή της νιτροδωποίησης στον αερόβιο αντιδραστήρα (Pollice, Tandoi, & Lestingi, 2002)

Στο Σχήμα 4.38, που δείχνει τη συγκέντρωση των X_{NOB} για τις διαφορετικές τιμές SRT στο τελευταίο διαμέρισμα του αερόβιου αντιδραστήρα, παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση των X_{NOB} για SRT 4,5 ημέρες είναι πολύ χαμηλή. Επομένως, δεν πραγματοποιείται η μετατροπή των NO_2^- σε NO_3^- .

Για SRT 5 φαίνεται να συμβαίνει και πάλι νιτροδωποίηση και όχι πλήρης νιτροποίηση, η οποία όμως είναι πιο αποδοτική από ότι για SRT 4 ημέρες. Στο Σχήμα 4.36 φαίνεται η μεγάλη διαφορά στη συγκέντρωση του όρου TKN_e που από περίπου 19 mg/L για SRT 4,5 ημέρες μειώνεται περίπου στο 1,3 mg/L για SRT 5 ημέρες. Αυτός είναι και ο λόγος που ο δείκτης EQI παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή του για SRT 5 ημέρες.

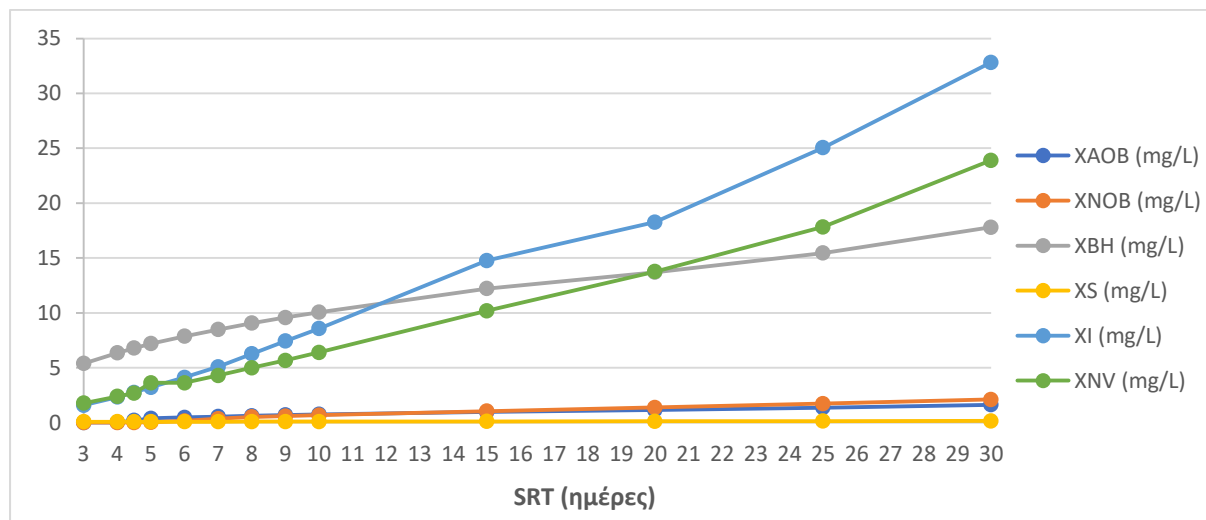


Σχήμα 4.38: Συγκέντρωση των X_{NOB} στο τελευταίο διαμέρισμα της αερόβιας δεξαμενής για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα

Για SRT από 6 ημέρες ως και τις 30 ημέρες η τιμή του δείκτη EQI σταδιακά αυξάνεται. Η αύξηση αυτή φαίνεται από το Σχήμα 4.36 να οφείλεται στη σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης των NO_3^- , των TSS και του COD.

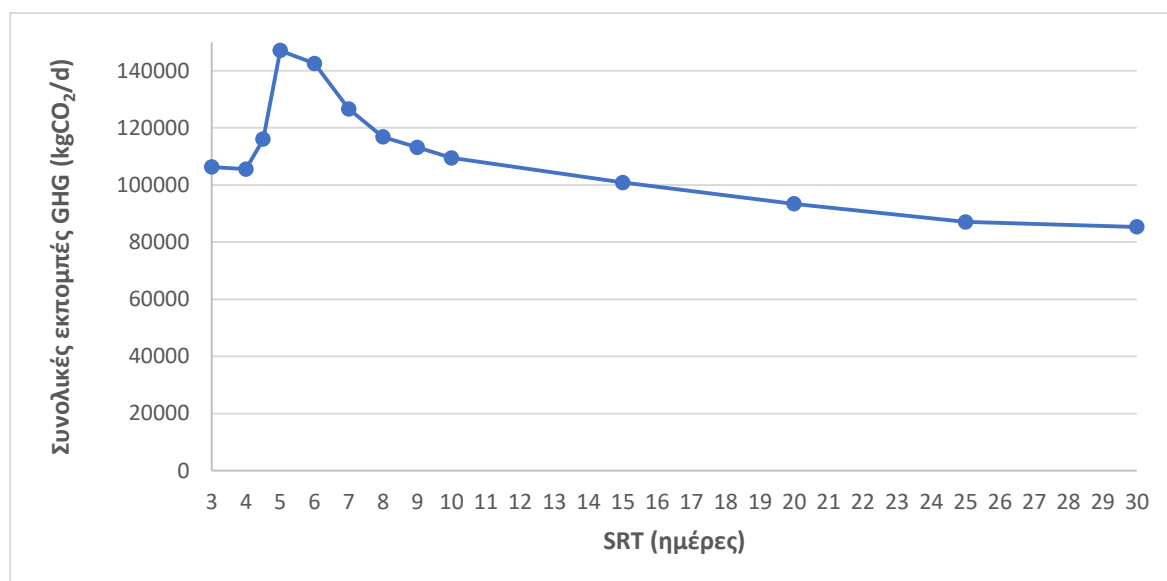
Το Σχήμα 4.39 δείχνει για τα διάφορα στερεά που συμπεριλαμβάνονται στους όρους TSS και COD τις συγκεντρώσεις τους στην έξοδο της εγκατάστασης (θέση 34) συναρτήσει των διαφόρων SRT. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του SRT αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των X_i , X_{NV} και με μικρότερο ρυθμό αυξάνεται και η συγκέντρωση των X_{BH} .

Επομένως, η αύξηση του δείκτη EQI με την αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα SRT από 6 ως 30 ημέρες οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην έξοδο της εγκατάστασης λόγω νιτροποίησης και στην αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών.



Σχήμα 4.39: Συγκεντρώσεις των επιμέρους σωματιδιακών κλασμάτων στην έξοδο της εγκατάστασης για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στο βιολογικό αντιδραστήρα

Στο Σχήμα 4.40 αποτυπώνεται η σχέση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από την ΕΕΛ συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής (SRT) των μικροοργανισμών στο βιολογικό αντιδραστήρα.

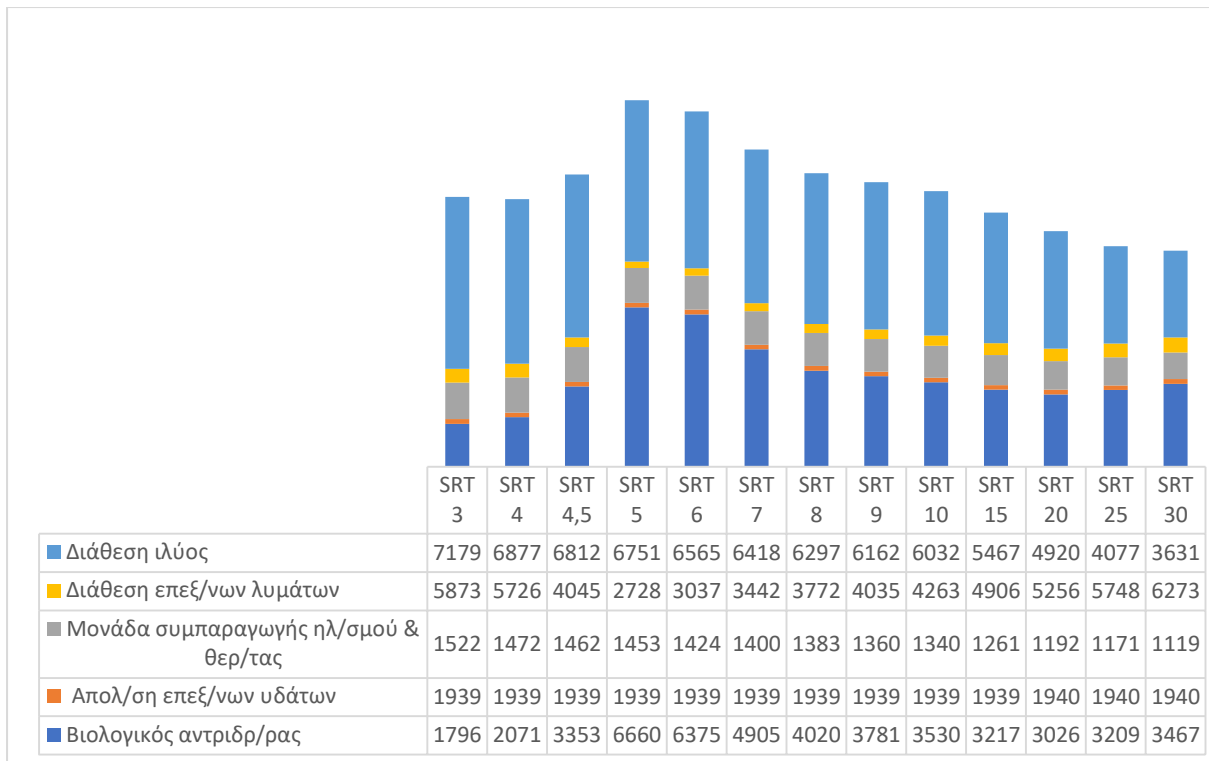


Σχήμα 4.40: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα

Παρατηρούμε ότι οι εκπομπές GHG για SRT 4 ημέρες μειώνονται λίγο σε σχέση με την τιμή τους για SRT 3 ημέρες. Έπειτα, αυξάνονται μέχρι SRT 5 ημέρες, για το οποίο παρουσιάζεται και η υψηλότερη τιμή εκπομπής. Από την τιμή SRT 5 ημέρες και έπειτα η τιμή εκπομπής των GHG μειώνεται και η χαμηλότερη τιμή εκπομπής τους σημειώνεται για SRT 30 ημέρες.

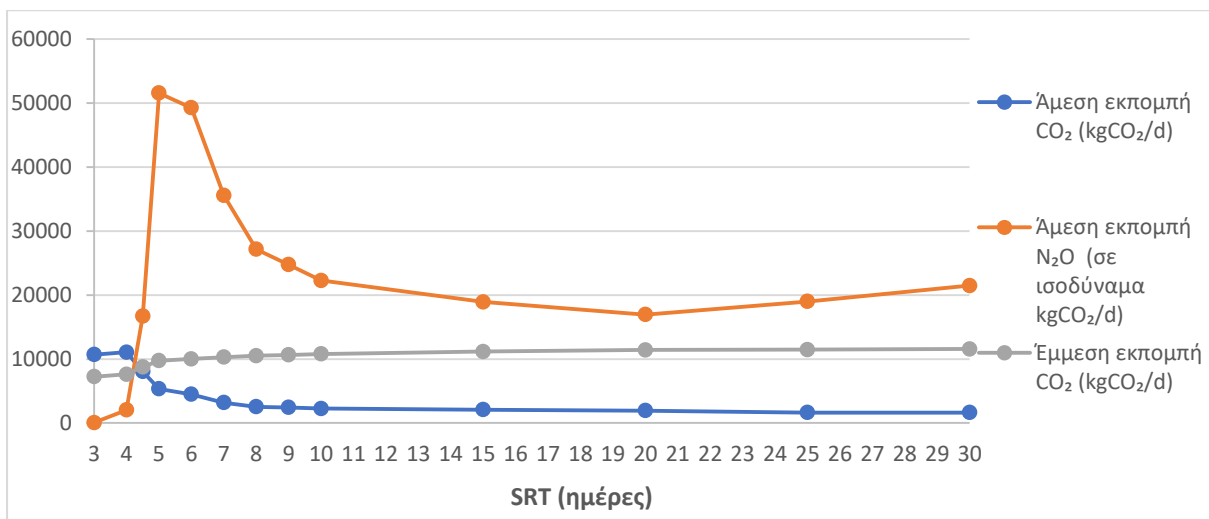
Στο Σχήμα 4.41 παρουσιάζονται οι κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) από όλη την ΕΕΛ για τους διαφορετικούς χρόνους SRT. Παρατηρούμε ότι τη σημαντικότερη συνεισφορά στην εκπομπή GHG έχουν οι εκπομπές από τον βιολογικό αντιδραστήρα και τη διάθεση της ιλύος.

Οι εκπομπές GHG λόγω της διάθεσης της ιλύος μειώνονται με την αύξηση του SRT και πιο συγκεκριμένα μειώνονται στο μισό για SRT 30 ημέρες σε σχέση με την τιμή τους για SRT 3 ημέρες. Ο λόγος είναι ότι μειώνεται η συγκέντρωση των στερεών που υπάρχουν στο σύστημα και συνεπώς υπάρχει μείωση στην ποσότητα των στερεών που απομακρύνονται από την εγκατάσταση μέσω της διάθεσης της ιλύος. Οι εκπομπές GHG από τον βιολογικό αντιδραστήρα αυξάνονται για SRT από 3 ημέρες μέχρι 5 ημέρες έπειτα μειώνονται μέχρι και SRT 20 ημέρες και τέλος για SRT 25 και 30 ημέρες έχουμε και πάλι αύξηση των GHG.



Σχήμα 4.41: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) από όλη την ΕΕΛ για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα

Στο Σχήμα 4.42 παρουσιάζονται αναλυτικά οι άμεσες και έμμεσες εκπομπές GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα για τα διαφορετικούς χρόνους SRT. Είναι φανερό ότι η μεταβολή των GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα ακολουθεί τη μεταβολή της εκπομπής του N₂O.



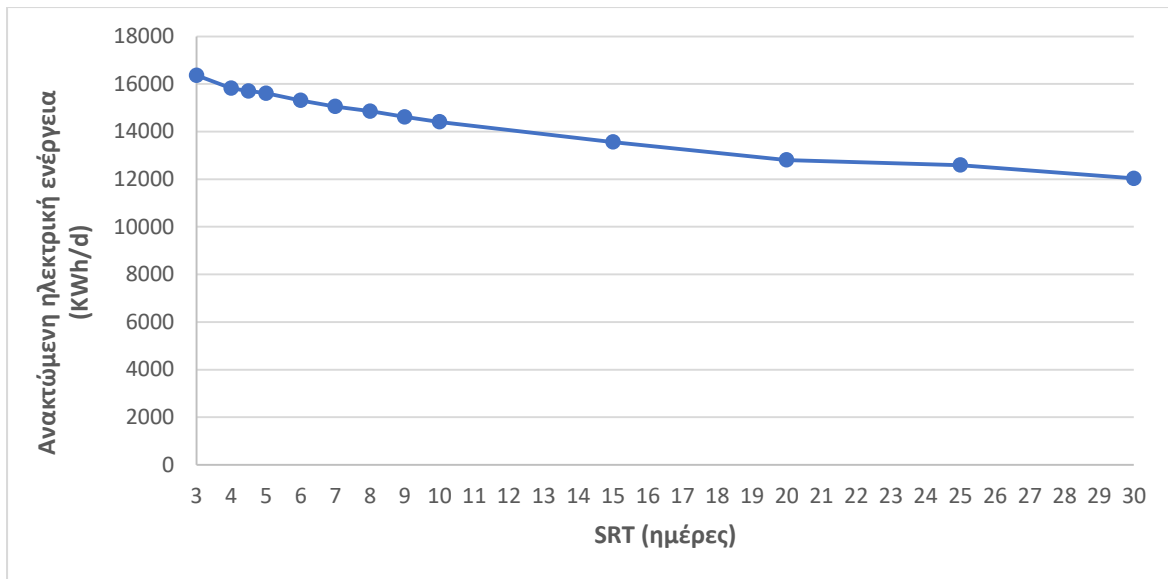
Σχήμα 4.42: Ανάλυση άμεσων και έμμεσων εκπομπών GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα σε ισοδύναμα Kg CO₂/d για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών

Η χαμηλή εκπομπή N_2O για SRT 3 και 4 ημέρες οφείλεται στο ότι δεν πραγματοποιείται απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου κατά την οποία παράγεται N_2O . Η αύξηση της εκπομπής N_2O για SRT 4,5 και 5 ημέρες οφείλεται στη μερική νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου, όπου γίνεται οξείδωση του σε NO_2^- . Από την τιμή SRT 6 ημέρες μέχρι την τιμή των 20 ημερών η μείωση της εκπομπής N_2O οφείλεται στην απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου μέσω της πλήρους νιτροποίησης. Κατά τη νιτροποίηση οι εκπομπές N_2O προέρχονται κυρίως από την οξείδωση της υδροξυλαμίνης (NH_2OH).

Τέλος, η αύξηση των εκπομπών N_2O για SRT 25 και 30 ημέρες φαίνεται να οφείλεται στην αναχαίτιση της απονιτροποίησης κατά την οποία καταναλώνονται τα παραγόμενα N_2O . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.36, για SRT 25-30 ημέρες, η συγκέντρωση των NO_3 στην έξοδο αυξάνεται υποδηλώνοντας τη μείωση της απονιτροποίησής τους.

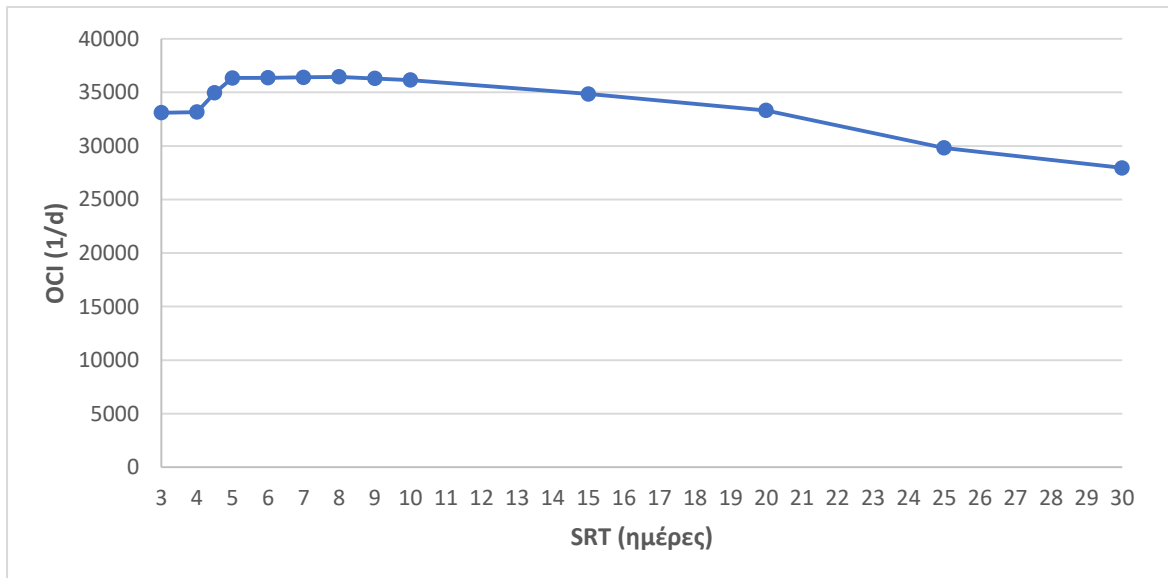
Η μείωση της άμεσης εκπομπής CO_2 στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του SRT που φαίνεται στο Σχήμα 4.42 οφείλεται στην αποδοτικότερη νιτροποίηση κατά την οποία καταναλώνεται CO_2 .

Η αύξηση της έμμεσης εκπομπής CO_2 στον βιολογικό αντιδραστήρα με την αύξηση του SRT που φαίνεται στο Σχήμα 4.42 οφείλεται στην αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων της εγκατάστασης ως προς τον αερισμό των δεξαμενών. Επιπλέον, η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια από την αναερόβια χώνευση μειώνεται με την αύξηση του SRT όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.43, και αυτό οφείλεται στο ότι μειώνεται η ποσότητα της ιλύος που απομακρύνεται από τον βιολογικό αντιδραστήρα και καταλήγει στην αναερόβια χώνευση.



Σχήμα 4.43: Ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια από την αναερόβια χώνευση για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα

Στο Σχήμα 4.12 αποτυπώνεται η σχέση του δείκτη λειτουργικού κόστους (OCI) συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής (SRT) των μικροοργανισμών στον βιολογικό αντιδραστήρα.



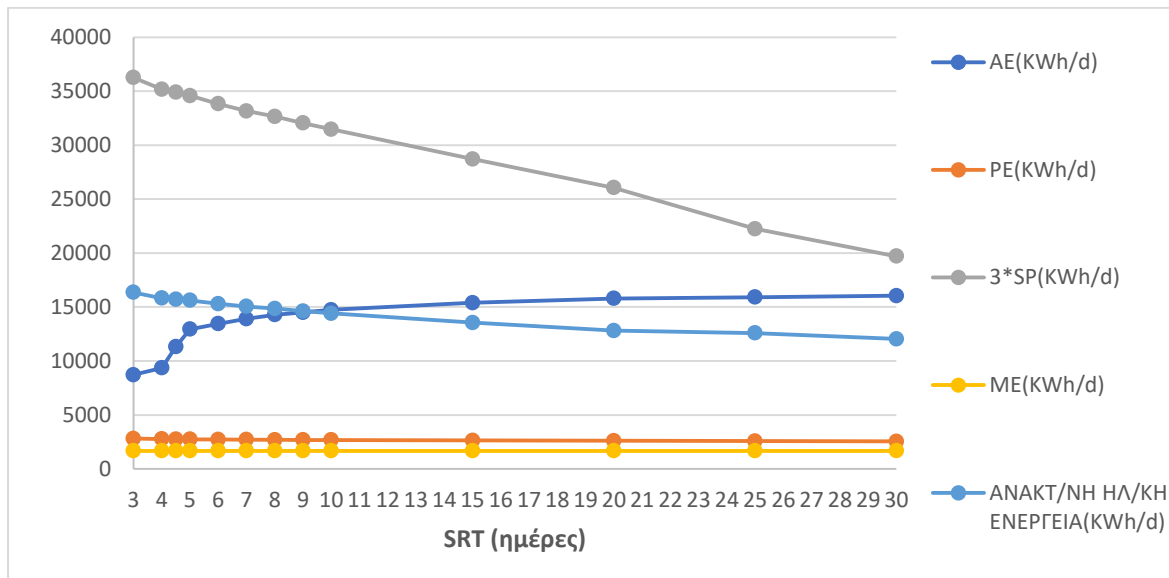
Σχήμα 4.44: Δείκτης λειτουργικού κόστους συναρτήσει των διαφορετικών χρόνων παραμονής στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα

Παρατηρούμε ότι η τιμή του δείκτη OCI αυξάνεται μέχρι τον χρόνο SRT 5 ημέρες και έπειτα μειώνεται συνεχώς μέχρι τις 30 ημέρες.

Στο Σχήμα 4.45 παρουσιάζονται οι ενέργειες που συνθέτουν το δείκτη OCI δηλαδή, οι ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της ιλύος ($3 \cdot SP$) και η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα.

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του SRT έχουμε σημαντική μείωση του κόστους διάθεσης της ιλύος. Η μείωση αυτή παρατηρείται να είναι ακόμα πιο έντονη για SRT 25 και 30 ημέρες. Με την αύξηση του SRT όλο και μεγαλύτερο μέρος της ιλύος παραμένει στο σύστημα ενεργού ιλύος και δεν οδηγείται για επεξεργασία στη γραμμή ιλύος και τελικά για διάθεση σε εκτάσεις γης. Παρότι αυτό επιδρά θετικά στο κόστος για διάθεση της ιλύος, στην ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια από την αναερόβια χώνευση επιδρά αρνητικά. Παρατηρούμε στο Σχήμα 4.45 να μειώνεται η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια με την αύξηση του SRT.

Ακόμα, στο Σχήμα 4.45 παρατηρούμε να αυξάνεται η ενέργεια που απαιτείται για αερισμό με την αύξηση του SRT. Η αύξηση αυτή είναι έντονη μεταξύ των τιμών του SRT από 3 μέχρι 5 ημέρες επειδή για τιμή SRT 3 ημέρες δεν πραγματοποιείται η νιτροποίηση στην αερόβια δεξαμενή και μετά σταδιακά ξεκινάει. Έπειτα, η αύξηση της ΑΕ είναι λιγότερο έντονη μέχρι SRT 15 ημέρες και μετά μέχρι τις 30 ημέρες η αύξηση γίνεται ακόμα πιο ήπια. Τέλος, η ενέργειες άντλησης και ανάμειξης παρουσιάζουν πολύ μικρή διακύμανση.



Σχήμα 4.45: Ενέργειες αερισμού (ΑΕ), άντλησης (ΡΕ), ανάμειξης (ΜΕ), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα

Επομένως, ο δείκτης OCI μέχρι την τιμή SRT 5 ημέρες αυξάνεται λόγω της απαιτούμενης ενέργειας αερισμού στον αερόβιο αντιδραστήρα ενώ από για όλους τους υπόλοιπους χρόνους SRT η τιμή του δείκτη μειώνεται λόγω της μείωσης του κόστους διάθεσης της ιλύος στο τέλος της επεξεργασίας.

Συγκεντρωτικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για την επίδραση, στην απόδοση της εγκατάστασης και τους δείκτες λειτουργίας, των διαφορετικών χρόνων παραμονής των στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα:

- Για SRT 3 και 4 ημέρες δεν πραγματοποιείται η νιτροποίηση στην αερόβια δεξαμενή. Για SRT 4,5 και 5 ημέρες πραγματοποιείται νιτροδωποίηση.
- Από SRT 6 μέχρι 30 ημέρες όσο αυξάνεται ο SRT ο δείκτης EQI αυξάνεται λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης των νιτρικών και των αιωρούμενων στερεών στην έξοδο της εγκατάστασης.

- Οι εκπομπές GHG παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή τους για SRT 5 ημέρες λόγω νιτροδωποίησης και έπειτα σταδιακά μειώνονται με την αύξηση του SRT και έως ότου λαμβάνει χώρα πλήρης νιτροποίηση/απονιτροποίηση. Οι εκπομπές GHG οφείλονται κυρίως στη διάθεση της υλούς στο τέλος της επεξεργασίας και στις εκπομπές N₂O από τον βιολογικό αντιδραστήρα. Οι εκπομπές N₂O από τον βιολογικό αντιδραστήρα παρουσιάζουν αύξηση για SRT 25 και 30 ημέρες όπου παρατηρείται αναχαίτιση στην απονιτροποίηση.
- Ο δείκτης OCI αυξάνεται μέχρι την τιμή SRT 5 ημέρες λόγω της απαιτούμενης ενέργειας αερισμού και έπειτα σταδιακά μειώνεται λόγω μείωσης του κόστους διάθεσης της υλούς.

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων η βέλτιστη τιμή του χρόνου παραμονής των στερών στον βιολογικό αντιδραστήρα είναι στις 10 ημέρες.

Οι τιμές από 3 μέχρι 5 ημέρες απορρίπτονται λόγω μη απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου ή πολύ υψηλής εκπομπής N₂O λόγω νιτροδωποίησης. Οι τιμές από 6 μέχρι 9 ημέρες παρουσιάζουν καλύτερη ποιότητα εκροής από αυτή που αντιστοιχεί στην τιμή του SRT 10 ημέρες ωστόσο παρουσιάζουν υψηλότερες εκπομπές GHG και υψηλότερο λειτουργικό κόστος OCI. Στις περιπτώσεις που το SRT έχει τις τιμές 15, 20, 25 και 30 ημέρες έχουμε χαμηλότερη εκπομπή GHG και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος ωστόσο η ποιότητα εκροής δεν είναι καλή αφού η συγκέντρωση των TSS κυμαίνεται από τα 30 έως τα 60 mg/L και τα NO₃ είναι της τάξης των 16 mg/L.

4.1.5 Σενάριο 5: Διερεύνηση της επίδρασης της η απόδοση της μονάδας επεξεργασίας των στραγγιδίων της μηχανικής αφυδάτωσης ως προς την απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου

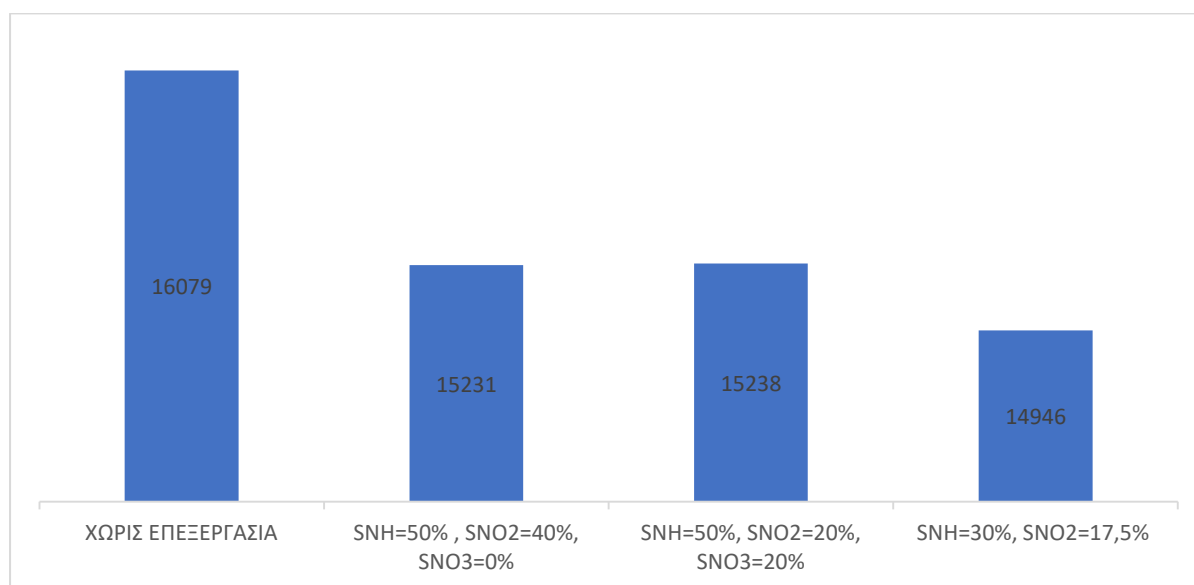
Στόχος σεναρίου

Στο παρόν σενάριο μελετήθηκε η επίδραση της απόδοσης της μονάδας επεξεργασίας των στραγγιδίων της μηχανικής αφυδάτωσης ως προς την απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση α) της απομάκρυνσης του 50% του αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγιδια της μονάδας αφυδάτωσης με αύξηση των νιτροδών κατά 40%, β) της απομάκρυνσης του 50% του αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγιδια της μονάδας αφυδάτωσης με αύξηση των νιτροδών και των νιτρικών κατά 20%

το καθένα, γ) της απομάκρυνσης του 70% του αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγίδια της μονάδας αφυδάτωσης με αύξηση των νιτρικών κατά 17,5 % και τέλος δ) εξετάστηκε η περίπτωση που δεν γίνεται επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης. Οι υπόλοιπες μεταβλητές και συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σταθερές.

Αποτελέσματα και σχολιασμός

Το Σχήμα 4.46 δείχνει το δείκτη ποιότητας εκροής (EQI) για τις διαφορετικές περιπτώσεις απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγίδια της μονάδας αφυδάτωσης.



Σχήμα 4.46: Δείκτης ποιότητας εκροής για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου

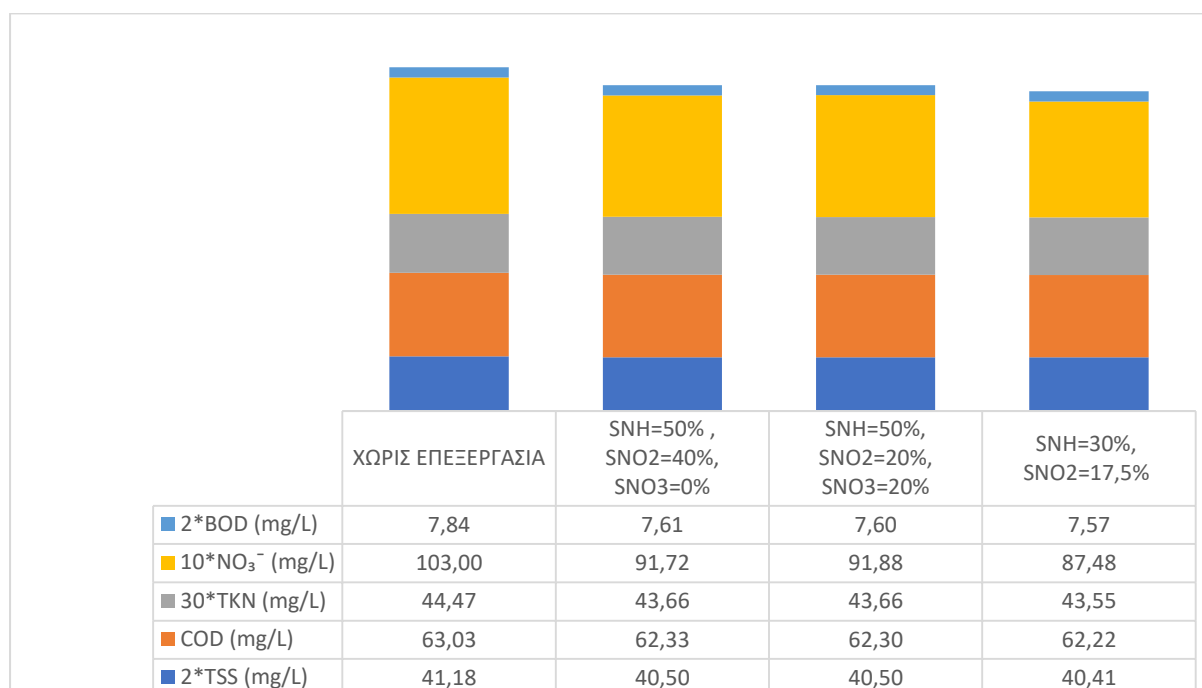
Αρχικά παρατηρούμε ότι η ποιότητα εκροής της εγκατάστασης βελτιώνεται με την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης πριν την ανακυκλοφορία και την είσοδό τους ανάντη της εγκατάστασης για επεξεργασία.

Η βελτίωση αυτή οφείλεται κυρίως στη χαμηλότερη συγκέντρωση νιτρικών (NO_3^-) στην έξοδο της εγκατάστασης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.47 που δείχνει τις συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου.

Η μείωση των νιτρικών οφείλεται στο ότι με την επιπλέον επεξεργασία των στραγγιδίων είναι μικρότερη η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου που ανακυκλοφορείται και τελικά εισέρχεται στην αερόβια δεξαμενή για νιτροποίηση. Επομένως είναι μικρότερη και η

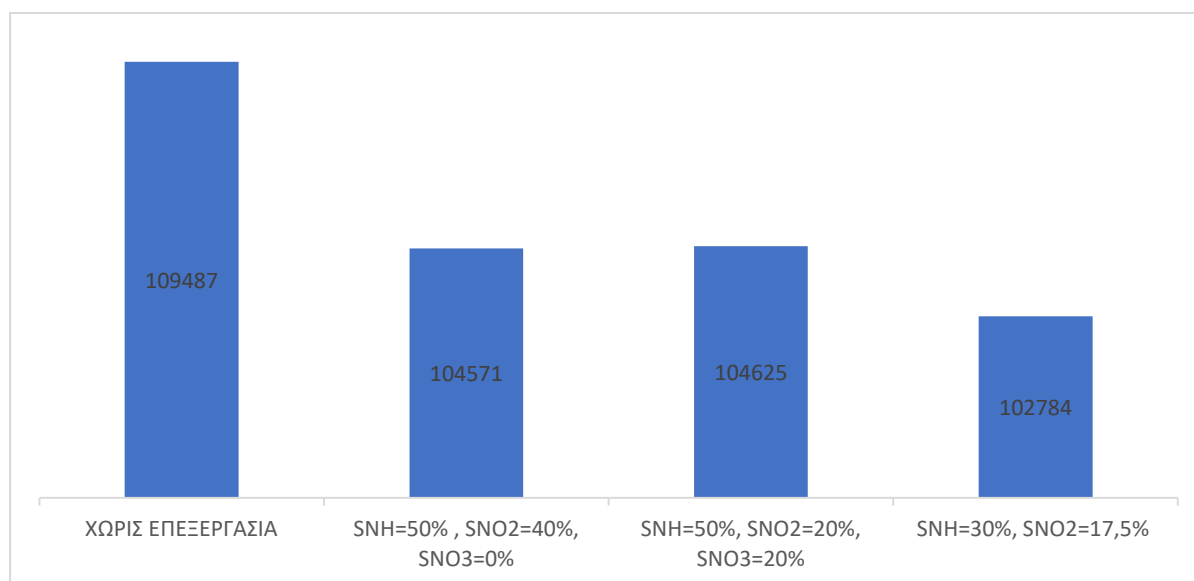
συγκέντρωση των νιτρικών που παράγεται από τη νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου και τελικά χρειάζεται να απόνιτροποιηθεί στην ανοξική δεξαμενή.

Η πιο ευνοϊκή περίπτωση, ανάμεσα σε αυτές που μελετήθηκαν, για την ποιότητα εκροής είναι αυτή κατά την οποία τα στραγγίδια επεξεργάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό ως προς την απομάκρυνση της αμμωνίας, δηλαδή όταν επιστρέφει στην εγκατάσταση μόνο το 30% της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου των υγρών εκροής από τη μονάδα αφυδάτωσης και ταυτόχρονα αυξάνεται μόνο 17,5 % η συγκέντρωση των NO_2^- .



Σχήμα 4.47: Συγκεντρώσεις των παραμέτρων που συνθέτουν το δείκτη EQI για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου

Το Σχήμα 4.48 δείχνει τις συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) από την ΕΕΛ για τις διαφορετικές περιπτώσεις απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγίδια της μονάδας αφυδάτωσης.

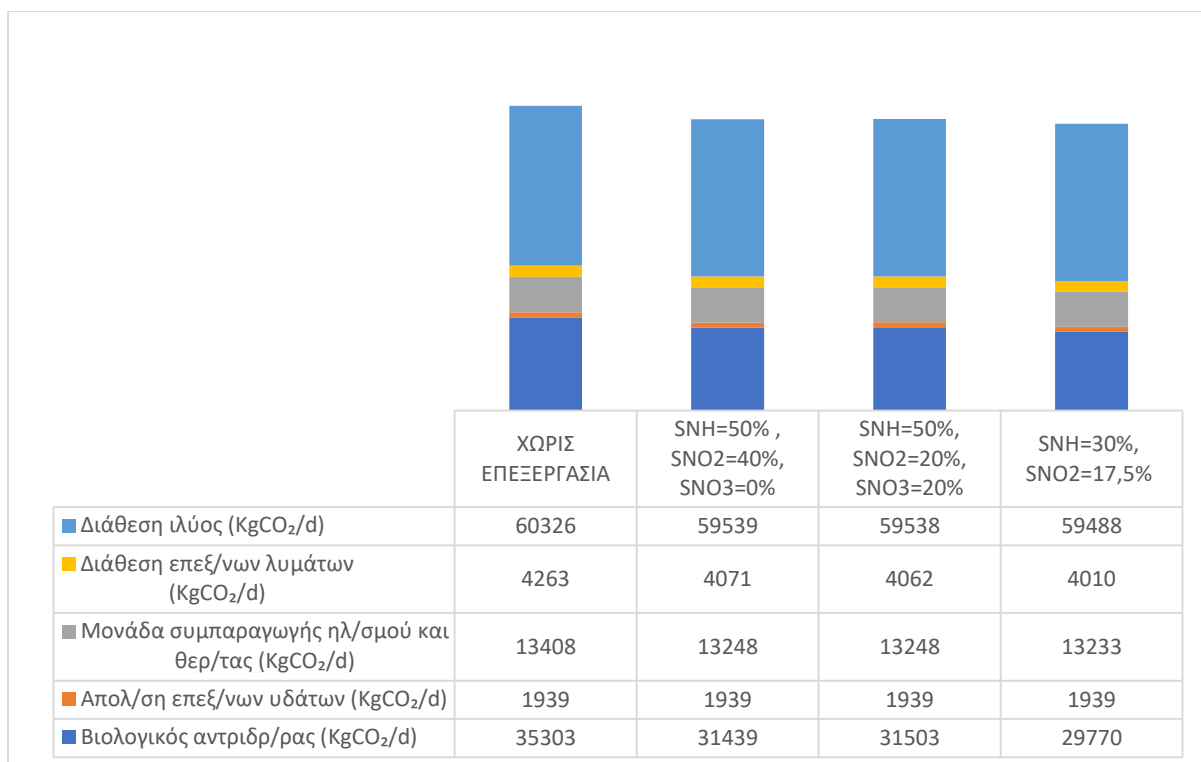


Σχήμα 4.48: Συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου

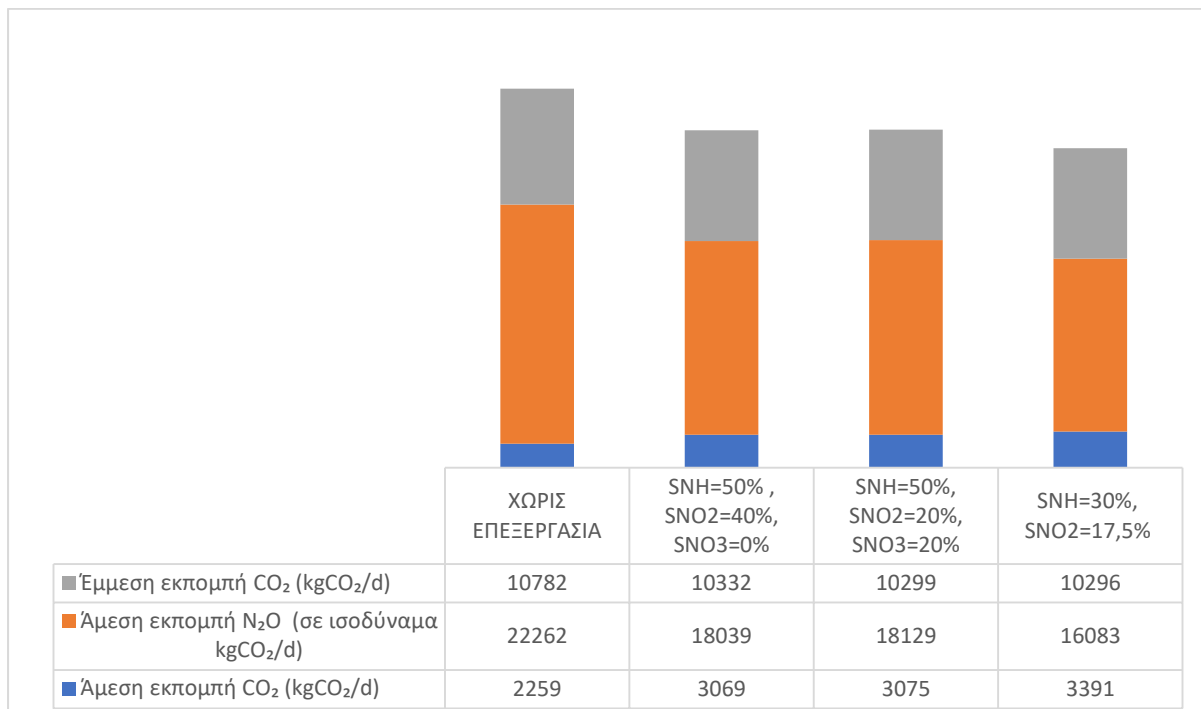
Παρατηρούμε ότι οι εκπομπές GHG μειώνονται με την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης πριν την είσοδό τους ανάντη της εγκατάστασης για επεξεργασία.

Στο Σχήμα 4.49 παρουσιάζονται οι κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) από όλη την ΕΕΛ για τις διαφορετικές περιπτώσεις απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγίδια της μονάδας αφυδάτωσης. Οι μεγαλύτερες συνεισφορές στα GHG είναι της διάθεσης της ιλύος στο τέλος της επεξεργασίας και του βιολογικού αντιδραστήρα. Οι εκπομπές από τον βιολογικό αντιδραστήρα παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση από ότι οι εκπομπές λόγω διάθεσης της ιλύος.

Στο Σχήμα 4.50 παρουσιάζονται αναλυτικά οι άμεσες και έμμεσες εκπομπές GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα για τις διαφορετικές περιπτώσεις απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγίδια της μονάδας αφυδάτωσης. Παρατηρούμε ότι η μείωση της εκπομπής GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα οφείλεται κυρίως στη μείωση της άμεσης εκπομπής N₂O.



Σχήμα 4.49: Κυριότερες εκπομπές GHG (σε ισοδύναμα Kg CO₂/d) από όλη την ΕΕΛ για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου



Σχήμα 4.50: Ανάλυση άμεσων και έμμεσων εκπομπών GHG στον βιολογικό αντιδραστήρα σε ισοδύναμα Kg CO₂/d για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου

Η μείωση της εκπομπής των N_2O οφείλεται στο ότι με την επεξεργασία στα στραγγίδια από τη μονάδα αφυδάτωσης μειώνεται η συνολική ποσότητα αζώτου που επιστρέφει στην εγκατάσταση για επεξεργασία. Επομένως, είναι λιγότερες οι απαιτήσεις για νιτροποίηση και απονιτροποίηση που είναι και η βασική αιτία εκπομπής N_2O από την εγκατάσταση.

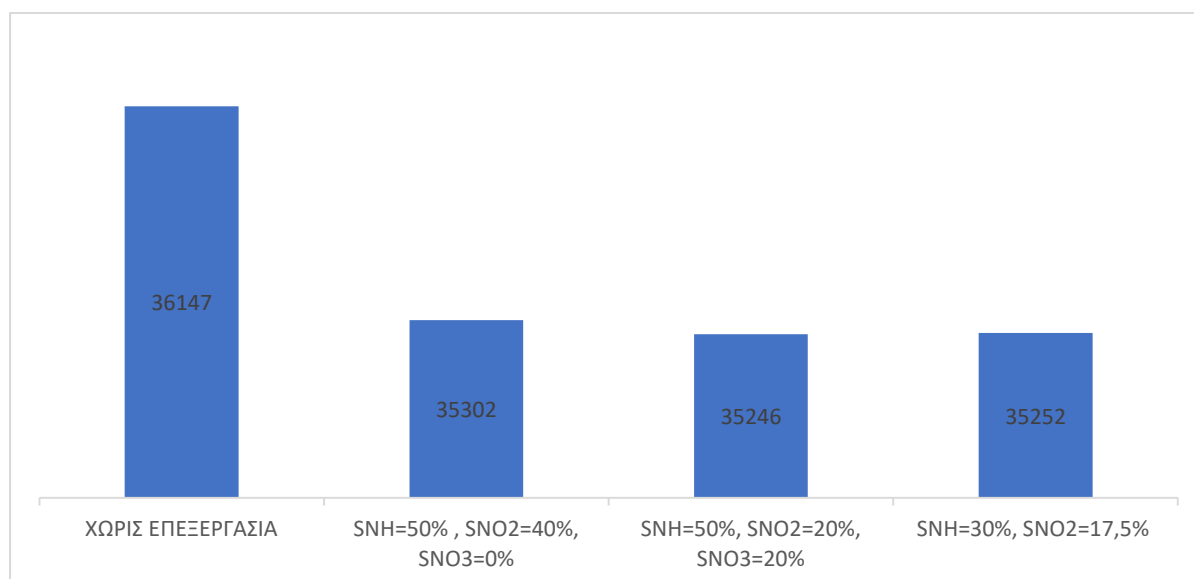
Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις που απομακρύνεται ίδιο ποσοστό αμμωνιακού αζώτου (50%) κατά την επεξεργασία τα στραγγίδια από την μονάδα αφυδάτωσης, παρατηρούμε ότι είναι ευνοϊκότερη η περίπτωση που στην εγκατάσταση επιστρέφει αυξημένο ποσοστό νιτρικών αλλά καθόλου αυξημένο ποσοστό νιτρικών. Σε αυτήν την περίπτωση στην ανοξική δεξαμενή η απονιτροποίηση ξεκινάει απευθείας από την απονιτροποίηση των νιτρικών δηλαδή παρακάμπτεται το πρώτο βήμα που είναι η μετατροπή των NO_3^- σε NO_2^- . Αυτό φαίνεται να έχει σαν αποτέλεσμα να ελαττώνονται οι εκπομπές GHG και έχει σαν επιπρόσθετο όφελος ότι η απαίτηση για οργανικό άνθρακα στην ανοξική δεξαμενή είναι μικρότερη.

Από το Σχήμα 4.50 παρατηρούμε ακόμα να αυξάνονται οι άμεσες εκπομπές CO_2 από το βιολογικό αντιδραστήρα με τη μείωση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγίδια της μονάδας αφυδάτωσης. Οφείλεται στο ότι μειώνεται η νιτροποίηση στην αερόβια δεξαμενή κατά την οποία καταναλώνεται CO_2 .

Από τις τρεις περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης η εκπομπή GHG είναι πιο περιορισμένη στην περίπτωση που απομακρύνεται 70% του αμμωνιακού αζώτου και η συγκέντρωση των NO_2^- αυξάνεται κατά 17,5%.

Επομένως, φαίνεται να μειώνονται οι εκπομπές GHG από την εγκατάσταση εάν έχει προηγηθεί επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν έχουν συνυπολογιστεί οι πιθανές εκπομπές GHG κατά την επεξεργασία αυτή.

Το Σχήμα 4.51 δείχνει το δείκτη λειτουργικού κόστους (OCI) για τις διαφορετικές περιπτώσεις απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγιδια της μονάδας αφυδάτωσης

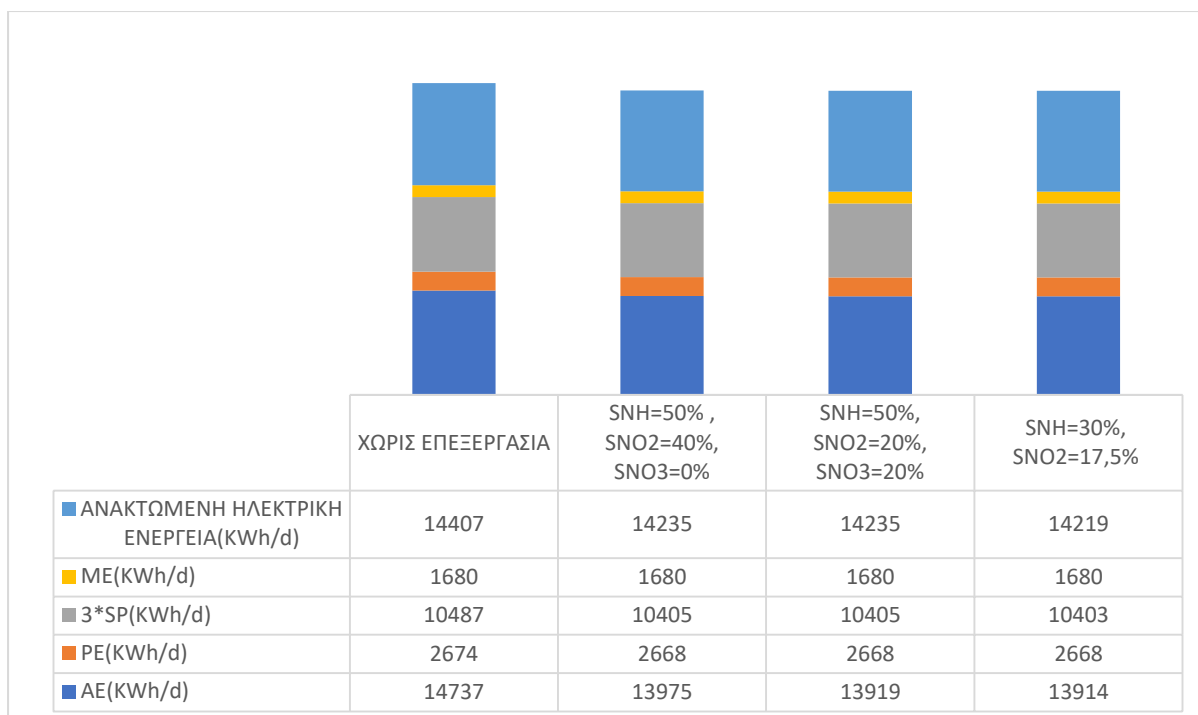


Σχήμα 4.51: Δείκτης λειτουργικού κόστους για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου

Συγκρίνοντας την περίπτωση να μην έχουμε επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης με τις περιπτώσεις να έχουμε επεξεργασία, παρατηρούμε ότι ο δείκτης λειτουργικού κόστους (OCI) μειώνεται με την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης πριν την είσοδό τους ανάντη της εγκατάστασης.

Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στην μείωση της απαιτούμενης ενέργειας αερισμού (ΑΕ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.52. Η απαιτούμενη ενέργεια αερισμού μειώνεται λόγω του ότι με την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης μειώνεται η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου που νιτροποιείται με κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα.

Ο Πίνακας 4.8 δείχνει τις συγκεντρώσεις των X_{AOB} και X_{NOB} , δηλαδή των μικροοργανισμών που πραγματοποιούν τη νιτροποίηση, στο τελευταίο διαμέρισμα του αερόβιου αντιδραστήρα για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης. Παρατηρούμε ότι μειώνεται η συγκέντρωσή τους όσο μειώνεται το ποσοστό του αμμωνιακού αζώτου που επιστρέφει στην εγκατάσταση για επεξεργασία.



Σχήμα 4.52: Ενέργειες αερισμού (AE), άντλησης (PE), ανάμειξης (ME), διάθεσης της ιλύος (3*SP) και ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου

Πίνακας 4.8: Συγκεντρώσεις των X_{AOB} και X_{NOB} για τις διαφορετικές περιπτώσεις επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου

	ΧΩΡΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	SNH=50%, SNO2=40%, SNO3=0%	SNH=50%, SNO2=20%, SNO3=20%	SNH=30%, SNO2=17,5%
θέση 12				
X_{AOB} (mg/L)	119	109	109	105
X_{NOB} (mg/L)	109	100	100	98

Η ευνοϊκότερη περίπτωση για τον δείκτη OCl₂ δε φαίνεται να είναι η περίπτωση που απομακρύνεται το 70% του αμμωνιακού αζώτου από τα στραγγίδια από τη μονάδα αφυδάτωσης αλλά μία από τις περιπτώσεις που απομακρύνεται το 50% του αμμωνιακού αζώτου και συγκεκριμένα η περίπτωση που αυξάνονται και τα NO₂⁻ και τα NO₃⁻ 20 % το καθένα.

Τέλος είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι φαίνεται να μειώνεται ο δείκτης λειτουργικού κόστους με την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωση αλλά δεν έχει συνυπολογιστεί το κόστος που απαιτείται για να γίνει αυτή η επεξεργασία.

Συγκεντρωτικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για την επίδραση, στην απόδοση της εγκατάστασης και τους δείκτες λειτουργίας, των διαφορετικών περιπτώσεων επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης για απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου:

- Όσο μεγαλύτερη απομάκρυνση συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου επιτυγχάνεται από την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης τόσο βελτιώνεται ο δείκτης ποιότητας εκροής λόγω της χαμηλότερης συγκέντρωσης νιτρικών στην έξοδο της εγκατάστασης.
- Όσο μεγαλύτερη απομάκρυνση συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου, νιτρικών και νιτρωδών επιτυγχάνεται από την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης τόσο μειώνεται η εκπομπή GHG κυρίως λόγω της μείωσης των άμεσων εκπομπών N_2O από το βιολογικό αντιδραστήρα.
- Με την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης μειώνεται ο δείκτης λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης λόγω χαμηλότερων ενεργειακών απαιτήσεων σε αερισμό αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια από την αναερόβια χώνευση.
- Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις δεν έχουν συνυπολογιστεί οι εκπομπές GHG και το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης από την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης. Ωστόσο με πρόχειρους υπολογισμούς εκτιμάται ότι είναι μια συμφέρουσα περίπτωση.

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων η βέλτιστη περίπτωση επεξεργασίας των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης είναι αυτή κατά την οποία 70% του αμμωνιακού αζώτου απομακρύνεται και επιστρέφει στην εγκατάσταση μόνο το 30% ενώ ταυτόχρονα η συγκέντρωση των νιτρωδών αυξάνεται μόνο κατά 17,5% και η συγκέντρωση των νιτρικών δεν αυξάνεται καθόλου. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε τη χαμηλότερη εκπομπή GHG με ταυτόχρονη βέλτιστη δείκτη EQI ενώ η τιμή του δείκτη OCI είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη.

5. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας μείωσης των αερίων θερμοκηπίου (GHG) που εκπέμπονται από τη λειτουργία εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας και της ποιότητας εκροής τους μέσω μαθηματικής προσομοίωσης.

Για το λόγο αυτόν μέσω του μοντέλου προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε, ελέγχθηκαν μια σειρά από εφαρμογές που σχετίζονται με την επίδραση διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοση της προσομοιούμενης εγκατάστασης.

Οι λειτουργικές παράμετροι που μελετήθηκαν είναι: α) η απόδοση της πρωτοβάθμιας καθίζησης (sr), β) το ποσοστό κατακράτησης στερεών στις μονάδες βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης και στην μονάδα αφυδάτωσης (CR), γ) οι διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου στις δεξαμενές αερισμού του αερόβιου αντιδραστήρα (DO), δ) οι διαφορετικοί χρόνοι παραμονής στερεών στο σύστημα ενεργού ιλύος (SRT) και ε) η απόδοση της μονάδας επεξεργασίας των στραγγιδίων της μηχανικής αφυδάτωσης ως προς την απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου.

Τα βασικότερα αποτελέσματα που προέκυψαν για την επίδραση των παραπάνω λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοση της εγκατάστασης και τους δείκτες λειτουργίας της είναι τα ακόλουθα:

- Η αύξηση του sr περιορίζει το οργανικό φορτίο του συστήματος ενεργού ιλύος με αποτέλεσμα τη μείωση του OCI αφού μειώνεται η απαιτούμενη ενέργεια αερισμού που είναι και το υψηλότερο κόστος της εγκατάστασης. Αντίθετα, επηρεάζει αρνητικά την απονιτροποίηση εξ' αιτίας της μείωσης του λόγου COD/N στην ανοξική δεξαμενή με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι εκπομπές GHG και για επίτευξη ποσοστού sr 70% και πάνω είναι απαραίτητη η χημική υποβοήθηση της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Το βέλτιστο εύρος τιμών του sr που προκύπτει για την προσομοιούμενη εγκατάσταση είναι μεταξύ 40% και 70%.
- Με την αύξηση του CR αυξάνεται η ποσότητα της τελικής ιλύος προς διάθεση εκτός εγκατάστασης και μειώνεται το οργανικό φορτίο του συστήματος ενεργού ιλύος. Το

αποτέλεσμα είναι αύξηση των GHG κυρίως λόγω αύξησης του CH₄ που παράγεται από τη διάθεση της ιλύος και έπειτα λόγω αύξησης των N₂O που παράγονται εξαιτίας της αναχαίτισης της απονιτροποίησης στην ανοξική δεξαμενή. Το βέλτιστο αποτέλεσμα προκύπτει με επιδίωξη επίτευξης όσο γίνεται μεγαλύτερου ποσοστού κατακράτησης στερεών από τις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης αλλά με ταυτόχρονη προσπάθεια εξασφάλισης βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα στον βιολογικό αντιδραστήρα ώστε να περιορίζονται οι εκπομπές N₂O λόγω αναχαίτισης της απονιτροποίησης (μία πιθανή λύση είναι η ζύμωση της πρωτοβάθμιας ιλύος για την παραγωγή εύκολα βιοδιασπάσιμου οργανικού άνθρακα).

- Για χαμηλές συγκεντρώσεις DO ή δεν πραγματοποιείται η νιτροποίηση ή πραγματοποιείται μερική νιτροποίηση (νιτροδωποίηση) στον αερόβιο αντιδραστήρα. Οι εκπομπές GHG αυξάνονται στην περίπτωση της νιτροδωποίησης λόγω παραγωγής N₂O στον βιολογικό αντιδραστήρα. Επίσης, με την αύξηση της συγκέντρωσης DO αυξάνεται ο δείκτης λειτουργικού κόστους (OCI) λόγω αύξησης της απαιτούμενης ενέργειας αερισμού. Το βέλτιστο εύρος τιμών της συγκέντρωσης DO στον αερόβιο αντιδραστήρα είναι μεταξύ 2 και 3 mg/L.
- Σε χαμηλούς χρόνους παραμονής στερεών δεν πραγματοποιείται η νιτροποίηση ή πραγματοποιείται μερική νιτροποίηση. Στην περίπτωση της νιτροδωποίησης η εκπομπή των GHG από το βιολογικό αντιδραστήρα αυξάνεται λόγω παραγωγής N₂O. Επίσης, όσο πιο χαμηλός είναι ο χρόνος SRT τόσο υψηλότερες είναι οι εκπομπές GHG και το κόστος από τη διάθεση της τελικής ιλύος. Η βέλτιστη τιμή του SRT που προέκυψε από την προσομοιούμενη εγκατάσταση είναι 10 ημέρες.
- Με την επεξεργασία των στραγγιδίων της μονάδας αφυδάτωσης πριν την ανακυκλοφορία τους στην είσοδο της ΕΕΛ, βελτιώνεται ο δείκτης ποιότητας εκροής (EQI), μειώνεται η εκπομπή GHG λόγω της μείωσης των άμεσων εκπομπών N₂O από το βιολογικό αντιδραστήρα και μειώνεται ο δείκτης λειτουργικού κόστους. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου, νιτρικών και νιτρωδών επιτυγχάνεται από την επεξεργασία των στραγγιδίων της αφυδάτωσης τόσο μειώνεται η εκπομπή GHG κυρίως λόγω της μείωσης των άμεσων εκπομπών N₂O από το βιολογικό αντιδραστήρα. Τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτουν χωρίς να συνυπολογιστούν οι εκπομπές GHG και το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης από την επεξεργασία των στραγγιδίων από τη μονάδα αφυδάτωσης.

Εκτιμάται ωστόσο ότι οι παραγόμενες εκπομπές στη μονάδα επεξεργασίας στραγγιδίων θα είναι λιγότερες από την αντίστοιχη μείωση στην κυρίως μονάδα επεξεργασίας στραγγιδίων.

- Με βάση τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι μία στρατηγική μείωσης των εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου σε μία ΕΕΛ είναι η επεξεργασία των στραγγιδίων της μονάδας αφυδάτωσης η οποία εξασφαλίζει μικρότερα φορτία αμμωνιακού αζώτου στις επιστροφές στην κυρίως μονάδα. Σε κάθε περίπτωση αντενδείκνυται η λειτουργία μίας ΕΕΛ σε χαμηλούς χρόνους παραμονής στερεών στους οποίους δεν καθίσταται δυνατή η πλήρης νιτροποίηση καθώς και η λειτουργία της βιολογικής βαθμίδας σε χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Ahn, J. H., Kwan, T., & Chandran, K. (2011). Comparison of Partial and Full Nitrification Processes Applied for Treating High-Strength Nitrogen Wastewaters: Microbial Ecology through Nitrous Oxide Production. *Environmental Science & Technology* , 2734-2740.
- Alex, J., Benedetti, L., Copp, J., Gernaey, K., Jeppsson, U., Nopens, I., . . . Vanrolleghem, P. (2008). Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1). *iwa-mia.org*.
- Bastone, D. J., Keller, J., Angelidakis, I., Kalyunzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., . . . Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology Vol 45* , 65-73.
- C-FOOT_CTRL. (2016). Deliverable D3.1. Development of the dynamic software tool.
- Chynoweth, D. P., John, O. M., & Legrand, R. (2001). Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy* 22, 1-8.
- Henze, M., Grady, L., Gujer, W., Marais, G., & Matsuo, T. (1987). A general model for single-sludge wastewater treatment systems. *Water Research*, 21(5), 505-515.
- IPCC. (2013). Climate change 2013: The physical Science Basis. Contribution of Working group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D.Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, j. Boschung, A. Nauels, Y. Xca,. *Climate change 2013: The physical Science Basis. Contribution of Working group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D.Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, j. Boschung, A. Nauels, Y. Xia,.V. Bex and P.M. Midgley (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kindom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Itokawa, H., Hanaki, K., & Matsuo, T. (2001). Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low COD/N ratio production. *Wat. Res. Vol 35, No 3*, 657-664.

- Jeppsson, U., Pons, M.-N., Nopens, I., Alex, J., Copp, J., Gernaey, K., Vanrolleghem, P. (2007). Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies. *Water Science & Technology Vol 56 No 8*, 67-78.
- Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M. S., & van Loosdrecht, M. C. (2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water research 43*, 4093-4103.
- Khalil, M., & Rasmussen, R. (1992). The global sources of nitrous oxide . *Journal of Geophysical Research, Vol 97, NO. D13*, 14651-14660.
- Koumaki, E., Noutsopoulos, C., Sarantopoulos, V., Antoniou, K., Malamis, S., Mamais, D., . . . Krieg, G. (2017). C-FOOT CTRL-tool: Development of an integrated tool for the assessment of the greenhouse gas emissions in wastewater treatment plants, planned to be presented at 15th international Conference on Envir. Science and Technology Rhodes, Greece, 31/8-2/9 2017.
- Mannina, G., Ekama, G., Caniani, D., Cosenza, A., Esposito, G., Gori, R., Olsson, G. (2016). Greenhouse gases from wastewater treatment - A review of modelling tools. *Elsevier*, 254-270.
- Massara, T. M., Malamis, S., Guisasola, A., Baeza, J. A., Noutsopoulos, C., & Katsou, E. (2017). A review on nitrous oxide (N₂O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water. *Elsevier*, 107-123.
- Neupane, D. R., Riffat, R., Murthy, S. N., Peric, M. R., & Wilson, T. E. (2008). Influence of Surch Characteristics, Chemicals, and Flocculation on Chemically Enhanced Primary Treatment. *Water Environment Research vol 80, issue 4*, 331-338.
- Nopens, I., Benedetti, L., Jeppsson, U., Pons, M.-N., Alex, J., Copp, J., Vanrolleghem, P. (2010). Benchmark Simulation Model No 2: finalisation of plant layout and default control strategy. *Water Science & Technology-WST, 62.9*, 1967-1974.
- Pollice, A., Tandoi, V., & Lestingi, C. (2002). Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate. *Water Research, vol 36, issue 10*, pp. 2541-2546.

- Sun, Z., Bao, Z., & Sun, D. (2014). Study on emission characteristics and reduction strategy of nitrous oxide during wastewater treatment by different processes. *Environ. Sci. Pollut., Res.* 22:4222-4229.
- Tumendelger, A., Toyoda, S., & Yoshida, N. (2014). Isotopic analysis of N₂O produced in a conventional wastewater treatment system operated under different aeration conditions. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 28, 1883-1892.
- USEPA, U. S. (2006). Global anthropogenic non-CO₂ greenhouse gas emissions: 1990 to 2020. US-EPA, Washington, DC.
- Vrecko, D., Gernaey, K., Rosen, C., & Jeppsson, U. (2006). Benchmark Simulation Model No 2 in Matlab-Simulink: towards plant-wide WWTP control strategy evaluation. *Wat. Sci. Tech.*, 54(8), 65-72.
- Zhen, L., Guan, Y., Wu, G., & Zhan, X. (2014). N₂O emission from a sequencing batch reactor for biological N and P removal from wastewater. *Environ. Sci. Eng.*, 8(5), 776-783.
- Zhou, Y., Pijuan, M., Zeng, R. J., & Zhiguo, Y. (2008). Free Nitrous Acid Inhibition on Nitrous Oxide Reduction by a Denitrifying Enhanced Biological Phosphorus Removal Sludge. *Environmental Science & Technology*, 8260-8265.
- Ανδρεαδάκης, Α. Δ. (1986). *Σημειώσεις-Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας και Διάθεσης Αστικών Αποβλήτων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων.
- Ανδρεαδάκης, Α., & Νουτσόπουλος, Κ. (2010). *Σημειώσεις για το μάθημα: Προχωρημένες Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων, Περιγραφή Μοντέλου ΙΑWQ. ΔΔΠΜΣ, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*.
- Δημοπούλου, Α. (2011, Ιούνιος). ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ (Ε.Ε.Λ). Αθήνα.
- Σαραντόπουλος, Β. (2015). Ανάπτυξη και εφαρμογή ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, Διπλωματική Εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.