



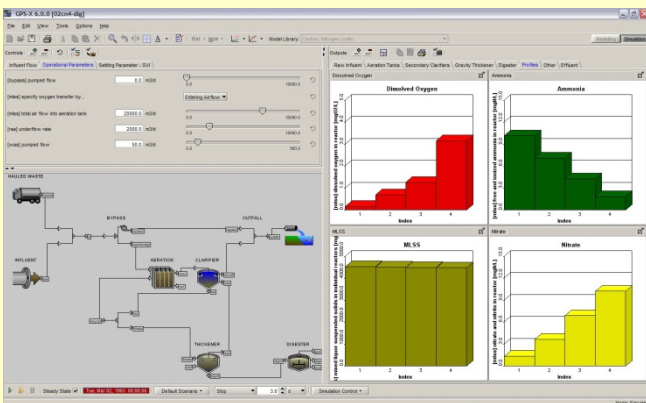
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Έλεγχος επάρκειας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων μέσω μαθηματικής προσομοίωσης



Διπλωματική Εργασία: Νικόλαος Μαστραντώνας

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

*Έλεγχος επάρκειας εγκαταστάσεων επεξεργασίας
λυμάτων μέσω μαθηματικής προσομοίωσης*

Διπλωματική Εργασία: Νικόλαος Μαστραντωνάς

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

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

Copyright © Νικόλαος Μαστραντωνάς, 2012.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσεως, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Ευχαριστίες...

*Ολοκληρώνοντας αυτή την εργασία, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς ευχαριστίες μου, και από τη θέση αυτή, στον καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, λέκτορα του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας του Τομέα Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη του, καθώς και τη συνεχή θεωρητική και πρακτική του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήτις απετέλεσε *conditio sine qua non* και αναγκαία συνθήκη αποτελεσματικής ολοκλήρωσής της.*

Επίσης, ευχαριστώ τον πολύ καλό φίλο και συμφοιτητή μου Αργύρη Μωυσίδη, για το συνεχές και ανυπόκριτο ενδιαφέρον του καθόλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη και συναισθηματική, και όχι μόνο, ασφάλεια που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Περίληψη

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή μαθηματικής προσομοίωσης για τον έλεγχο λειτουργίας υπάρχουσας εγκατάστασης με απομάκρυνση αζώτου και οργανικού φορτίου. Ένα σημαντικό και ταυτόχρονα ιδιαίτερα ενδιαφέρον ζήτημα που καλείται να αντιμετωπίσει ο μηχανικός κατά τον σχεδιασμό όπως επίσης και κατά τη λειτουργία μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, είναι η προσομοίωση των διεργασιών της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αντικείμενο το οποίο αποτέλεσε και το κίνητρο της παρούσας μελέτης. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται το μαθηματικό προσομοίωμα ενεργού ιλύος ASM2, ενώ η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού GPS-X της Hydromantis Inc. Αρχικά, διερευνήθηκε η απόκριση της εγκατάστασης για ένα εύρος τιμών του χρόνου παραμονής στερεών (srt), μεταβάλλοντας τόσο την θερμοκρασία (T) των λυμάτων, όσο και κάποιες στοιχειομετρικές και κινητικές μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές είναι ο ρυθμός παραγωγής της ετεροτροφικής (Y_H) και αυτοτροφικής βιομάζας (Y_A) και ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής (μ_{maxH}) και αυτοτροφικής βιομάζας στους 20 °C (μ_{maxA}), από τις οποίες προέκυψε ότι η σημαντικότερη είναι ο μ_{maxA} . Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας της εγκατάστασης τόσο για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά όσο και για αύξηση της παροχής εσωτερικής ανακυκλοφορίας στη μέγιστη δυνατή τιμή βάσει του εγκατεστημένου μηχανολογικού εξοπλισμού. Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση του συντελεστή επανακυκλοφορίας (r) και του δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI) στη μέγιστη δυνατή παροχή εισροής. Βάση των αποτελεσμάτων, αύξηση της επάρκειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με αύξηση της εσωτερικής ανακυκλοφορίας, όπως και βελτιστοποίηση της παροχής επανακυκλοφορίας. Η βελτιστοποίηση αυτή οδηγεί σε τιμές του συντελεστή r κατά προσέγγιση από 45 % έως 65 %, ανάλογα με τον χρόνο παραμονής στερεών, δηλαδή σημαντικά μειωμένες από την αρχική τιμή λειτουργίας της εγκατάστασης (106 %). Τέλος για srt μέχρι και εννέα ημέρες η εγκατάσταση λειτουργικά σε συμφωνία με την οδηγία για αναχαίτιση της νιτροποίησης έως και 25 %, ενώ η αναχαίτιση αυτή μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 37.5 % για srt > 14 d.

Λέξεις Κλειδιά

Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, προσομοίωση, ανάλυση ευαισθησίας, έλεγχος επάρκειας, θερμοκρασία, ρυθμός παραγωγής ετεροτροφικής/αυτοτροφικής βιομάζας, μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης ετεροτροφικής/αυτοτροφικής βιομάζας, παροχή εσωτερικής ανακυκλοφορίας, συντελεστής επανακυκλοφορίας, δείκτης καθιζησιμότητας, GPS-X

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the application of mathematical simulation for the operational control of a wastewater treatment plant incorporating nitrogen removal. An issue of major importance and complexity for the engineer is the simulation of activated system operation, which was the motivation of this study. The mathematical model used, is the activated sludge model ASM2, while the simulation is conducted over GPS-XS software of Hydromantis Inc. Initially, the response of the plant for a range of solids retention time (srt), varying the temperature (T), the production rate of heterotrophic (Y_H) and autotrophic biomass (Y_A) and the maximum growth rate of heterotrophic (μ_{max_H}) and autotrophic biomass (μ_{max_A}) was investigated. According the simulations, the most important variable is μ_{max_A} . Then, a control efficiency of the plant for both the operational characteristics and for increasing the quantity of internal recirculation to the maximum value based on the installed mechanical equipment, was made. Moreover, the effect of recirculation rate (r) and sludge volume index (SVI) to the maximum input quantity was examined. Based on the results, increase of the efficiency can be achieved by increasing the internal recirculation and optimizing the recirculation rate (r). The optimization leads to values of the r coefficient of approximately 45 % to 65 % depending on the solids retention time, thus significantly reduced from the initial operational value (106 %). Finally, for srt value up to nine days, the plant is operating in compliance with the directive, even for 25 % deterrence in the nitrification process, while for srt more than 14 days the deterrence can be up to 37.5 %.

Key Words

Wastewater treatment plants, simulation, sensitivity analysis, control efficiency, temperature, production rate of heterotrophic/autotrophic biomass, maximum growth rate of heterotrophic/autotrophic biomass, internal recirculation quantity, recirculation factor, sludge volume index, GPS-X

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Κατάλογος Εικόνων	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων.....	x
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	3
2.1 Σύστημα.....	3
2.2 Πείραμα	3
2.3 Προσομοίωμα.....	4
2.4 Προσομοίωση.....	6
2.5 Απαιτούμενα δεδομένα.....	7
3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ.....	9
3.1 Περιγραφή του Activated Sludge Model No. 1 (ASM1)	9
3.1.1 Μεταβλητές μοντέλου	9
3.1.2 Διεργασίες μοντέλου.....	12
3.1.3 Διεργασίες κινητικές και στοιχειομετρία μοντέλου	14
3.2 Περιγραφή του Activated Sludge Model No. 2 (ASM2)	17
3.2.1 Μεταβλητές μοντέλου	17
3.2.2 Διεργασίες μοντέλου.....	20
3.3 Τα μοντέλα ASM3 και ASM2d.....	34
4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ GPS-X	35
4.1 Βιβλιοθήκες προγράμματος.....	36
4.2 Μοντέλα εισαγωγής δεδομένων εισόδου	38
4.3 Μοντέλα ενεργού ιλύος.....	40
4.4 Μοντέλα καθίζησης.....	41
4.5 Ενότητες προγράμματος.....	42
4.5.1 Προσομοίωση	42
4.5.2 Ανάλυση ευαισθησίας.....	43
4.5.3 Βελτιστοποίηση	43

4.6	Δυνατότητες του GPS-X	44
5	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	47
6	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	53
6.1	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας των λυμάτων	53
6.2	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσει του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.....	59
6.3	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσει του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας	65
6.4	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας	70
6.5	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	75
6.6	Γενικές παρατηρήσεις για κάθε μία από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν	81
7	ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	83
7.1	Έλεγχος επάρκειας για τα λειτουργικά δεδομένα	83
7.2	Έλεγχος επάρκειας για τη μέγιστη δυνατή παροχή εσωτερικής ανακυκλοφορίας..	90
7.3	Επίδραση του συντελεστή επανακυκλοφορίας στον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης.....	99
7.4	Επίδραση του δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI) στον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης.....	103
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	109
8.1	Συμπεράσματα.....	109
8.2	Θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.....	113
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	115

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1 Πυγμαλίων.....	5
Εικόνα 2-2 Προκρούστης.....	5
Εικόνα 2-3 Πολυπλοκότητα – Αποτελεσματικότητα (Γρηγορόπουλος, 2002).....	5
Εικόνα 4-1 Αρχικό παράθυρο του λογισμικού GPS-X.....	35
Εικόνα 5-1 Σχηματική αναπαράσταση του βιολογικού τμήματος της Ε.Ε.Λ. στην οποία έγιναν οι αναλύσεις.....	49

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Διεργασίες, κινητικές και στοιχειομετρία μοντέλου ASM1 (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.).....	16
Πίνακας 3-2 Συντελεστές μετατροπής i_{ci} που εφαρμόζονται στις εξισώσεις συνέχειας του ASM2. Οι μονάδες του i_{ci} είναι McMi^{-1} , πχ. $i_{N,2} = i_{NSF} \text{gN} (\text{gCOD})^{-1}$ ή $i_{\text{φορτίο},3} = -1/64 \text{ moles}^+ \text{gCOD}^{-1}$ (IWA, 2000).....	22
Πίνακας 3-3 Στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης (IWA, 2000).....	23
Πίνακας 3-4 Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης και αποσύνθεσης των ετεροτροφικών μ/ο (IWA, 2000).....	24
Πίνακας 3-5 Στοιχειομετρία των διεργασιών των πολυφωσφορικών βακτηριδίων (IWA, 2000).....	26
Πίνακας 3-6 Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης και αποσύνθεσης των αυτοτροφικών μ/ο (IWA, 2000).....	28
Πίνακας 3-7 Στοιχειομετρία και κινητική των διεργασιών που περιγράφουν την ταυτόχρονη κατακρήμνιση του φωσφόρου (IWA, 2000).....	29
Πίνακας 3-8 Διεργασίες, κινητικές και στοιχειομετρία μοντέλου ASM2 (IWA, 2000).....	31
Πίνακας 3-9 Διεργασίες και ρυθμοί διεργασιών του μοντέλου προσομοίωσης ASM2 (IWA, 2000).....	32
Πίνακας 4-1 Χαρακτηριστικά λυμάτων σε κάθε βιβλιοθήκη (Hydromantis Inc., 1999).....	37
Πίνακας 5-5-1 Οδηγία 91/271/EE.....	49
Πίνακας 5-2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά λυμάτων στην είσοδο της εγκατάστασης.....	50
Πίνακας 5-3 Λειτουργικά χαρακτηριστικά εγκατάστασης.....	50
Πίνακας 5-4 Κινητικές παράμετροι εγκατάστασης.....	51
Πίνακας 5-5 Στοιχειομετρικές παράμετροι εγκατάστασης.....	51
Πίνακας 5-6 Παράμετροι καθιζησιμότητας ιλύος.....	51
Πίνακας 7-1 Μέγιστες τιμές παροχής εισροής για $\mu_{\text{maxA}} = 0.6 \text{ d}^{-1}$ και διάφορες τιμές του χρόνου παραμονής στερεών.....	94
Πίνακας 7-2 Μέγιστες τιμές παροχής εισροής για $\mu_{\text{maxA}} = 0.6 \text{ d}^{-1}$ και διάφορες τιμές του χρόνου παραμονής στερεών με προσθήκη του ορίου για την φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης.....	95
Πίνακας 7-3 Μέγιστη παροχή εισροής (1).....	97

Πίνακας 7-4 Μέγιστη παροχή εισροής (2)	98
Πίνακας 7-5 Μέγιστη παροχή εισροής, και αντίστοιχες τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων, συναρτήσει του συντελεστή επανακυκλοφορίας, για $srt = 8.2$ d και $\mu_{max_A} = 0.68$ d ⁻¹	99
Πίνακας 7-6 Μέγιστη παροχή εισροής για βελτιστοποίηση και μη του συντελεστή επανακυκλοφορίας r, για χρόνο παραμονής στερεών 11 ημερών και ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών από 0.6 d ⁻¹ έως 1.0 d ⁻¹	102
Πίνακας 7-7 Αποτελέσματα προσομοίωσης για για $srt = 7$ d και $\mu_{max_A} = 0.8$ d ⁻¹	105
Πίνακας 7-8 Αποτελέσματα προσομοίωσης για για $srt = 8.2$ d και $\mu_{max_A} = 0.8$ d ⁻¹	106
Πίνακας 7-9 Αποτελέσματα προσομοίωσης για για $srt = 10$ d και $\mu_{max_A} = 0.8$ d ⁻¹	106
Πίνακας 7-10 Μέγιστη παροχή εισροής συναρτήσει SVI και srt.....	106
Πίνακας 8-1 Ενδεικτικός πίνακας μέγιστης παροχής εισροής, με χρήση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε.....	112

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 6-1 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας	55
Σχήμα 6-2 Διακύμανση της ολικής απαίτησης σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας.....	55
Σχήμα 6-3 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας.....	56
Σχήμα 6-4 Διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας.....	56
Σχήμα 6-5 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας	57
Σχήμα 6-6 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας	57
Σχήμα 6-7 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας	58
Σχήμα 6-8 Διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας.....	58
Σχήμα 6-9 Διακύμανση της συγκέντρωσης ολικών στερεών στον Β.Α. για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας	61
Σχήμα 6-10 Διακύμανση ολικής απαίτησης σε αέρα της Ε.Ε.Α. για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας.....	61
Σχήμα 6-11 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας	62
Σχήμα 6-12 Διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας	62

Σχήμα 6-29 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	73
Σχήμα 6-30 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας	74
Σχήμα 6-31 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας	74
Σχήμα 6-32 Διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας	75
Σχήμα 6-33 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	77
Σχήμα 6-34 Διακύμανση της ολικής απαίτησης σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	77
Σχήμα 6-35 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	78
Σχήμα 6-36 Διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	78
Σχήμα 6-37 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	79
Σχήμα 6-38 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	79
Σχήμα 6-39 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	80
Σχήμα 6-40 Διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	80
Σχήμα 7-1 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής	84
Σχήμα 7-2 Διακύμανση της ολικής απαίτησης σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής.....	85
Σχήμα 7-3 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής.....	85
Σχήμα 7-4 Διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής.....	86
Σχήμα 7-5 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής.....	86

Σχήμα 7-6 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής.....	87
Σχήμα 7-7 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής.....	87
Σχήμα 7-8 Διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής.....	88
Σχήμα 7-9 Διακύμανση της φόρτισης στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής.....	88
Σχήμα 7-10 Μεγέθυνση της διακύμανσης της συγκέντρωσης ολικού αζώτου στην περιοχή ενδιαφέροντος.....	89
Σχήμα 7-11 Μεγέθυνση της διακύμανσης της φόρτισης στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης στην περιοχή ενδιαφέροντος.....	89
Σχήμα 7-12 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για την πραγματική και τη μέγιστη δυνατή τιμή της παροχής εσωτερικής ανακυκλοφορίας.....	90
Σχήμα 7-13 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές της παροχής εισροής και του χρόνου παραμονής στερεών.....	92
Σχήμα 7-14 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές της παροχής εισροής και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	93
Σχήμα 7-15 Μέγιστη παροχή εισροής συναρτήσει του συντελεστή επανακυκλοφορίας και αντίστοιχη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή, για $srt = 8.2 \text{ d}$ και $\mu_{maxA} = 0.68 \text{ d}^{-1}$	100
Σχήμα 7-16 Μέγιστη παροχή εισροής και αντίστοιχη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή συναρτήσει του συντελεστή επανακυκλοφορίας, για $srt = 11 \text{ d}$ και $\mu_{maxA} = 0.8 \text{ d}^{-1}$	101
Σχήμα 7-17 Συντελεστής συσχέτισης TN, G συναρτήσει παροχής εισροής για $srt = 11 \text{ d}$ και $\mu_{maxA} = 0.9 \text{ d}^{-1}$ και $r = 60 \%$	101
Σχήμα 7-18 Συντελεστής συσχέτισης TN, G συναρτήσει παροχής εισροής για $srt = 11 \text{ d}$ και $\mu_{maxA} = 0.9 \text{ d}^{-1}$ και $Q = 74,000 \text{ m}^3/\text{d}$	102
Σχήμα 7-19 Μέγιστη παροχή και αντίστοιχη τιμή συντελεστή επανακυκλοφορίας για $srt = 7 \text{ d}$ και $\mu_{maxA} = 0.8 \text{ d}^{-1}$, συναρτήσει του SVI.....	105

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα σημαντικό και ταυτόχρονα ιδιαίτερα ενδιαφέρον ζήτημα που καλείται να αντιμετωπίσει ο μηχανικός κατά τον σχεδιασμό όπως επίσης και κατά τη λειτουργία μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, είναι η προσομοίωση των διεργασιών της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Το αντικείμενο αυτό αποτέλεσε το κίνητρο για την παρούσα διπλωματική, στόχος της οποίας είναι η εφαρμογή μαθηματικής προσομοίωσης για τον έλεγχο λειτουργίας υπάρχουσας εγκατάστασης με απομάκρυνση αζώτου και οργανικού φορτίου.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται το μαθηματικό προσομοίωμα ενεργού ιλύος ASM2, το οποίο και αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό για την Ποιότητα του Νερού (IAWQ), ενώ η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού GPS-X της Hydromantis Inc.. Η διπλωματική διαρθρώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2, αρχικά, συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, σκοπός της ενότητας αυτής είναι να εισάγει τη βασική έννοια της δημιουργίας ομοιωμάτων και της προσομοίωσης συστημάτων, οπότε και εξηγούνται και περιγράφονται οι όροι σύστημα, πείραμα, προσομοίωμα και προσομοίωση. Τέλος αναφέρονται οι βασικές αρχές που πρέπει να ακολουθεί κάθε βαθμονόμηση ενός προσομοιώματος, και γίνεται αναφορά στα απαιτούμενα δεδομένα βαθμονόμησης για τη σωστή προσομοίωση μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων με χρήση του λογισμικού GPS-X.

Στο κεφάλαιο 3, περιγράφονται τα κυριότερα μοντέλα ενεργού ιλύος, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως κατά τη μαθηματική προσομοίωση εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Αρχικά αναλύεται το μοντέλο ενεργού ιλύος ASM1, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό για την Ποιότητα του Νερού (IAWQ) και αποτέλεσε τη βάση για τη δημιουργία πολυπλοκότερων μοντέλων. Εν συνεχεία, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο μοντέλο ASM2, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, και όπως συμπεραίνεται και από τη ονομασία του, είναι επέκταση του ASM1. Το παραπάνω μοντέλο, προσομοιώνει εκτός των άλλων, τη διαδικασία βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου, σε αντίθεση με το ASM1. Τέλος, ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή των μοντέλων ASM2d και ASM3.

Στο κεφάλαιο 4, αναφέρονται οι βασικές αρχές ανάπτυξης και λειτουργίας του λογισμικού GPS-X. Αναλυτικότερα, γίνεται μία περιγραφή των διαθέσιμων βιβλιοθηκών του λογισμικού, των μοντέλων εισαγωγής δεδομένων εισόδου, των μοντέλων ενεργού ιλύος και των μοντέλων καθίζησης, τα οποία ενσωματώνονται στο συγκεκριμένο λογισμικό. Επίσης, γίνεται μία συνοπτική αναφορά στις ενότητες του προγράμματος, οι οποίες είναι η προσομοίωση, η ανάλυση ευαισθησίας, η οποία και χρησιμοποιήθηκε αρκετά στην διπλωματική, και η βελτιστοποίηση. Ακόμη, παρουσιάζονται οι δυνατότητες του GPS-X και δίδονται παραδείγματα αξιοποίησης του λογισμικού.

Στο κεφάλαιο 5, περιγράφεται και αναλύεται η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων που χρησιμοποιήθηκε στις προσομιώσεις της παρούσας διπλωματικής. Η εγκατάσταση αυτή, είναι μία τυπική εγκατάσταση για απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών, και χρησιμοποιήθηκε και σε προηγούμενες επιστημονικές εργασίες του τομέα.

Στο κεφάλαιο 6, περιγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πρώτων προσομιώσεων που πραγματοποιήθηκαν και αφορούν την ανάλυση ευαισθησίας της εγκατάστασης. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η απόκριση της εγκατάστασης για ένα εύρος τιμών του χρόνου παραμονής στερεών (srt), μεταβάλλοντας τόσο την θερμοκρασία (T) των λυμάτων, όσο και κάποιες στοιχειομετρικές και κινητικές μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές είναι ο ρυθμός παραγωγής της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας (Y_H και Y_A αντίστοιχα) και ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας στους 20 °C (μ_{maxH} και μ_{maxA} αντίστοιχα).

Στο κεφάλαιο 7, παρουσιάζεται το βασικό τμήμα της εργασίας, το οποίο είναι ο έλεγχος επάρκειας της εγκατάστασης. Στην διάρκεια του χρόνου λειτουργίας, τόσο η παροχή όσο και τα χαρακτηριστικά εισροής των λυμάτων μπορεί να μεταβληθούν, οδηγώντας σε δυσμενέστερα σενάρια φόρτισης της εγκατάστασης. Έτσι λοιπόν ο υπεύθυνος λειτουργίας θα πρέπει να εξετάσει κατά πόσο η Ε.Ε.Λ. με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τα οποία έχει, μπορεί να ανταποκριθεί στις νέες αυτές απαιτήσεις. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας για τα δεδομένα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, ενώ έπειτα, για αύξηση της εσωτερικής παροχής ανακυκλοφορίας στην μέγιστη δυνατή τιμή βάσει του εγκατεστημένου μηχανολογικού εξοπλισμού, καθώς παρατηρήθηκε πως ο κρίσιμος παράγοντας είναι η διεργασία της απονιτροποίησης. Στο ίδιο κεφάλαιο εξετάστηκε η επίδραση του συντελεστή επανακυκλοφορίας (r) και του δείκτη καθιζημασιότητας της ιλύος (SVI) στη μέγιστη δυνατή παροχή εισροής. Να επισημανθεί πως στα σενάρια που εφαρμόστηκαν δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στα φορτία εκροής ώστε αυτά να είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας 91/271 της Ε.Ε. για ευαίσθητους αποδέκτες, όσον αφορά τις συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου, στερεών και ολικού αζώτου στην εκροή.

Στο κεφάλαιο 8, τέλος, συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, και αναφέρονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο παρόν αντικείμενο.

2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι να εισάγει τη βασική έννοια της δημιουργίας ομοιωμάτων (modelling) και της προσομοίωσης (simulation). Η αναφορά στους όρους μοντελοποίηση και προσομοίωση, συχνά ακολουθείται από τους όρους (Hydromantis Inc., 1999):

- ◆ Σύστημα
- ◆ Πείραμα
- ◆ Προσομοίωμα (μοντέλο)
- ◆ Προσομοίωση

2.1 Σύστημα

Ένα *σύστημα* είναι ένα σύνολο αντικειμένων μαζί με τις σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων αυτών καθώς και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματά τους, τα οποία είναι σε αλληλοσυσχέτιση μεταξύ τους και με το περιβάλλον, έτσι ώστε να αποτελούν μια ενιαία ολότητα (Schoderbek et al, 1990). Γενικότερα, η αντίληψη ενός συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί σαν μια συλλογή από ποικίλα δομημένα και μη δομημένα στοιχεία, τα οποία αλληλοσυνδέονται και οργανώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνουν ένα καθορισμένο στόχο. Αυτό γίνεται μέσω του ελέγχου και της διανομής των υλικών πόρων, της ενέργειας και της πληροφορίας. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος είναι το γεγονός ότι το σύστημα μπορεί να ελεγχθεί και να παρατηρηθεί. Οι αλληλεπιδράσεις του με το περιβάλλον χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Μεταβλητές που δημιουργούνται από το περιβάλλον που επηρεάζει τη συμπεριφορά του συστήματος (inputs).
2. Μεταβλητές που προσδιορίζονται από το σύστημα και με τη σειρά τους επηρεάζουν τη συμπεριφορά του περιβάλλοντος (outputs).

Επομένως ένα σύστημα, είναι μια πιθανή πηγή δεδομένων στην οποία μπορούν να προσδιοριστούν οι μεταβλητές που επηρεάζουν το σύστημα και να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του.

2.2 Πείραμα

Τα *πειράματα* παρέχουν την δίοδο για τη γνώση του συστήματος. Ένα πείραμα είναι η διαδικασία εξαγωγής δεδομένων από το σύστημα, δια μέσου του χειρισμού των μεταβλητών που το επηρεάζουν.

Η πραγματοποίηση πειραμάτων είναι ασφαλώς πολύ σπουδαία τόσο για την απλή σύλληψη όσο και την καλύτερη κατανόηση του συστήματος. Η παρουσίαση ενός πειράματος, προϋποθέτει την εφαρμογή μια σειράς από εξωτερικές συνθήκες στις μεταβλητές εισόδου και την παρατήρηση της αντίδρασης του συστήματος, ελέγχοντας τη συμπεριφορά των μεταβλητών εξόδου. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της πραγματοποίησης πειραμάτων σε προσομοιωμένο και όχι πραγματικό σύστημα, είναι το γεγονός ότι στο αληθινό σύστημα υπάρχει συνήθως η επίδραση ενός μεγάλου αριθμού επιπρόσθετων μεταβλητών εισόδου ενώ πολλές χρήσιμες μεταβλητές εξόδου δεν είναι διαθέσιμες μέσω των πειραμάτων. Παράλληλα ένα σημαντικό κίνητρο για την προσομοίωση είναι το ότι όλες οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου μπορούν να εκτιμηθούν.

2.3 Προσομοίωμα

Ένα *προσομοίωμα* είναι μια σύνοψη/προσέγγιση ενός συστήματος στο οποίο μπορεί να εφαρμοστεί ένα πείραμα που να δίδει απαντήσεις σε ερωτήματα σχετικά με το σύστημα. Ένα προσομοίωμα δεν προϋποθέτει πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στην πραγματικότητα θα πρέπει να ξεχωρίζουμε το προσομοίωμα από το πρόγραμμα του υπολογιστή. Το προσομοίωμα μπορεί να είναι ένα τμήμα μιας συσκευής ή απλά η κατανόηση της λειτουργίας ενός συστήματος. Ωστόσο πολλές φορές ένα προσομοίωμα είναι δυνατό να είναι κωδικοποιημένο σε πρόγραμμα υπολογιστή.

Πιο συγκεκριμένα τα προσομοιώματα διακρίνονται σε α) φυσικά, β) λεκτικά ή εννοιολογικά και γ) μαθηματικά. Τα φυσικά προσομοιώματα είναι μία χωρικής κλίμακας αναπαράσταση του συστήματος. Τέτοια, για παράδειγμα, είναι τα εργαστηριακά και πρότυπα πειράματα που χρησιμοποιούνται από τους επιστήμονες για να ερευνήσουν την απόκριση και την συμπεριφορά ενός συστήματος. Τα λεκτικά προσομοιώματα παρέχουν μία ποιοτική περιγραφή του συστήματος και συχνά αναπτύσσονται ύστερα από λεπτομερείς παρατηρήσεις. Τέτοια μπορεί να παρουσιαστούν ως σχηματικά διαγράμματα ή αφηγηματικές δηλώσεις (Henze et al, 2008).

Τα μαθηματικά προσομοιώματα τέλος μπορεί να είναι εμπειρικά ή μηχανιστικά. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφορές τους δεν είναι αυστηρά προκαθορισμένες αλλά μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει μια συνέχεια μεταξύ τους, αφού κάποια μηχανιστικά προσομοιώματα μπορούν να εμπεριέχουν και εμπειρικές συνιστώσες (Henze et al, 2008).

Τα μηχανιστικά προσομοιώματα βασίζονται σε αρχές, όπως νόμοι της φυσικής, της χημείας και της βιολογίας. Τα πραγματικά δεδομένα ενός συστήματος χρησιμοποιούνται στη ρύθμιση των φυσικών παραμέτρων, των σταθερών των διεργασιών και άλλων παραμέτρων των εξισώσεων. Πολλά προσομοιώματα στο GPS-X είναι μηχανιστικά (Hydromantis Inc., 1999).

Από την άλλη μεριά, τα εμπειρικά προσομοιώματα βασίζονται μόνο στα δεδομένα εκείνα, τα οποία θεωρούνται ουσιώδους σημασίας για την περιγραφή της διεργασίας,

ενώ οι μηχανισμοί και οι διαδικασίες λειτουργίας είτε παραλείπονται είτε είναι άγνωστοι: μία κλασική δηλαδή περίπτωση «μαύρου κουτιού». Εύκολα προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα, ότι δεν είναι βέβαιο ότι το επιλεγμένο προσομοίωμα προέρχεται από κάποιο θεμελιώδη νόμο, οπότε και η δομή του είναι περισσότερο απλοϊκή και λιγότερο ξεκάθαρη σε σχέση με τα μηχανιστικά προσομοιώματα.

Μια διαφορετική ομάδα δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετική δομή, χωρίς ωστόσο η ερμηνεία του φαινομένου να είναι ασφαλής. Παρόλα αυτά, τα εμπειρικά προσομοιώματα είναι χρήσιμα ιδιαίτερα όταν η γνώση του πραγματικού συστήματος είναι ελλιπής. Το GPS-X περιλαμβάνει αρκετά εμπειρικά προσομοιώματα, τα οποία προσδιορίζουν με βάση τα πραγματικά δεδομένα, ποιο μοντέλο να επιλεγθεί και με ποιες τιμές παραμέτρων.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούν τα τρία θεμελιώδη αξιώματα, τα οποία σύμφωνα με τον Jeppsson (Jeppsson Ulf, 1996), πρέπει να λάβει υπόψη του κάθε ένας που ασχολείται με την δημιουργία προσομοιωμάτων.



Εικόνα 2-1 Πυγμαλίων

Πυγμαλίων: Βασιλιάς της Κύπρου και διάσημος γλύπτης, ο οποίος ερωτεύτηκε το άγαλμά του και παρακάλεσε τους θεούς να το φέρουν στη ζωή.

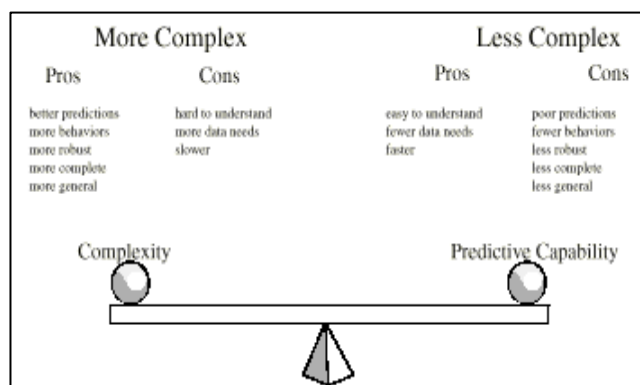
Αξίωμα 1: Μην «ερωτευτείς» το προσομοίωμα που δημιούργησες.



Εικόνα 2-2 Προκρούστης

Προκρούστης: Ληστής της ελληνικής μυθολογίας, που βασάνιζε τους αιχμαλώτους του. Τέντωνε τα άκρα όσων ήταν κοντοί μέχρι να ταιριάξουν στις διαστάσεις του κρεβατιού, ενώ όσων τα άκρα εξέιχαν τα έκοβε.

Αξίωμα 2: Μην προσπαθήσεις να προσαρμόσεις την πραγματικότητα στο προσομοίωμά σου.



Εικόνα 2-3 Πολυπλοκότητα – Αποτελεσματικότητα (Γρηγορόπουλος, 2002)

Αναγκαιότητα για ισορροπία ανάμεσα στους σκοπούς και τον τρόπο ανάπτυξης ενός προσομοιώματος.

Αξίωμα 3: Μην επεκτείνεις πάρα πολύ την περιοχή ισχύος του προσομοιώματος.

Η μοντελοποίηση είναι η διαδικασία οργάνωσης της γνώσης ενός συστήματος. Η πραγματοποίηση πειραμάτων στόχο έχει την απόκτηση γνώσης για το σύστημα. Αρχικά η γνώση δεν είναι δομημένη. Κατανοώντας τη σχέση αιτίας αποτελέσματος και παρατηρώντας τη χρονική και χωρική εξέλιξη, οργανώνεται η γνώση που αποκτάται κατά την πραγματοποίηση πειραμάτων. Επομένως το σύστημα μέσω των διεργασιών της μοντελοποίησης, κατανοείται καλύτερα.

2.4 Προσομοίωση

Προσομοίωση είναι μια μέθοδος μελέτης ενός συστήματος και εξοικείωσης με τα χαρακτηριστικά του με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος (προσομοιώματος) το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ηλεκτρονικός υπολογιστής. (Ρουμελιώτης Μάνος, 2001). Η προσομοίωση δηλαδή σε ένα μοντέλο, είναι ό,τι η πραγματοποίηση πειραμάτων σε ένα σύστημα. Η μαθηματική προσομοίωση είναι μια κωδικοποιημένη περιγραφή ενός πειράματος με σημείο αναφοράς το προσομοίωμα στο οποίο εφαρμόστηκε το πείραμα. Σημαντικός είναι ο φυσικός διαχωρισμός της περιγραφής του μοντέλου από τη μια και του πειραματισμού με το μοντέλο από την άλλη. Σκοπός είναι να υφίσταται ο πειραματισμός με το μοντέλο τόσο εύκολα και αξιόπιστα όσο με το αληθινό σύστημα. Εκτός της πραγματοποίησης πειραμάτων με το πραγματικό σύστημα, η προσομοίωση είναι η μόνη διαθέσιμη τεχνική για την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός αυθαίρετου συστήματος. Ένα τυπικό σενάριο μιας επιστημονικής ανακάλυψης είναι το εξής (Hydromantis Inc., 1999):

1. Παρουσίαση ενός πειράματος του πραγματικού συστήματος και απόκτηση γνώσης μέσω των αποτελεσμάτων (κατανόηση της σχέσης αιτίας αποτελέσματος στο πραγματικό σύστημα).
2. Δημιουργία ενός αξιώματος για ένα αριθμό υποθέσεων σχετικών με τα αποτελέσματα.
3. Απλοποίηση του προβλήματος ώστε να γίνει η ανάλυση περισσότερο εύχρηστη.
4. Παρουσίαση μιας σειράς προσομοιώσεων με διαφορετικές πειραματικές παραμέτρους για την επιβεβαίωση της ορθότητας των απλοποιήσεων στις παραδοχές.
5. Ανάλυση του συστήματος και επαλήθευση των υποθέσεων.
6. Παρουσίαση προσομοιώσεων για εξαγωγή συμπερασμάτων.

Μια ευρεία ποικιλία εργαλείων προσομοίωσης είναι διαθέσιμη για το χρήστη του GPS-X, ειδικά για τη δυναμική προσομοίωση συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Η διαδικασία της δυναμικής προσομοίωσης εμπλέκει τη λύση πάρα πολλών μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Η λύση αυτή υποβοηθάτε από τις Continuous Simulation Languages (CSL). Υπάρχουν αρκετές τέτοιες γλώσσες προγραμματισμού όπως: η CSMP III, η CSSL IV, η DARE-P και η ASCL. Στο GPS-X χρησιμοποιείται η Advance Continuous Simulation Language (ASCL).

2.5 Απαιτούμενα δεδομένα

Για τους σκοπούς της προσομοίωσης, κάθε λειτουργία/διεργασία που πραγματοποιείται στη μονάδα, μπορεί να παρουσιαστεί με ένα προσομοίωμα που θα αντανακλά τη δυναμική συμπεριφορά της συγκεκριμένης διεργασίας. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του GPS-X είναι ότι ο χρήστης δεν είναι περιορισμένος στο να χρησιμοποιεί μόνο ένα συγκεκριμένο μοντέλο αλλά έχει τη δυνατότητα επιλογής. Για παράδειγμα, η διεργασία της ενεργού ιλύος μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας τα μοντέλα της IAWQ (ASM1,2,2d,3) ή το general model ή και το mantis model κλπ (Μπούσουλας Άγγελος, 2010).

Επομένως είναι αδύνατο να προσδιοριστεί μια μέθοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης στο GPS-X, αφού το κάθε μοντέλο διαθέτει διαφορετικές διεργασίες και συνιστώσες. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί, ότι η κάθε βαθμονόμηση ακολουθεί σχεδόν τις ίδιες γενικές αρχές.

Η προσομοίωση απαιτεί την εκτίμηση ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων. Πολλές από τις παραμέτρους αυτές μπορούν να μετρηθούν απευθείας, ενώ άλλες βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Εκείνες οι παράμετροι που δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας ή να προσδιοριστούν από τη βιβλιογραφία, συνήθως υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές μη γραμμικής δυναμικής βελτιστοποίησης με δεδομένα που συλλέγονται από την πραγματική λειτουργία της μονάδας ή το εργαστήριο. Είναι όμως γενικά αποδεκτό ότι η αξιοπιστία της βαθμονόμησης ενός μοντέλου μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνονται οι μαθηματικά βελτιστοποιημένες παράμετροι.

Τα απαιτούμενα δεδομένα βαθμονόμησης είναι (Hydromantis Inc., 1999):

1. Φυσικά δεδομένα μονάδας, που περιλαμβάνουν το διάγραμμα ροής (γραμμές ροής, κανάλια, επανακυκλοφορίες κλπ), το είδος ροής (πλήρους μίξης, διακοπτόμενης ροής κλπ.), τη συλλογή και απομάκρυνση της ιλύος (τοποθεσία, ποσότητα, χρόνος κλπ.) και τις διαστάσεις των δεξαμενών (όγκος, βάθος, ύψος).
2. Λειτουργικά δεδομένα μονάδας που περιλαμβάνουν την παροχή, τις μεταβλητές ελέγχου- ανεξάρτητες μεταβλητές (παροχή εισόδου, παροχή επανακυκλοφορίας, παροχή αέρα κλπ) και τις εξαρτημένες μεταβλητές.
3. Χαρακτηριστικά λυμάτων εισόδου, που περιλαμβάνουν τις βασικές παραμέτρους ποιότητας του νερού, τα οργανικά κλάσματα και τα κλάσματα αζώτου στην είσοδο.
4. Κινητικές και στοιχειομετρικές παράμετροι μοντέλου, που περιλαμβάνουν παραμέτρους για τα οργανικά, αζωτούχα και φωσφορούχα συστατικά, όπως και παραμέτρους καθίζησης.

Μερικά από τα παραπάνω δεδομένα και ορισμένες παράμετροι ποικίλουν σημαντικά στη διάρκεια μιας ημέρας ενώ άλλοι παραμένουν σχετικά σταθεροί.

3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ

3.1 Περιγραφή του Activated Sludge Model No. 1 (ASM1)

Το 1983 ο Διεθνής Οργανισμός για την Ποιότητα του Νερού (IAWQ) συγκρότησε μία ομάδα ειδικών με στόχο την αξιολόγηση των υπαρχόντων μαθηματικών μοντέλων για τη βιολογική επεξεργασία λυμάτων και την επίτευξη συμφωνίας σχετικά με το απλούστερο μαθηματικό μοντέλο που έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει τις διαδικασίες της απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, της νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάστηκε το 1987 και φέρει τον τίτλο “ IAWQ Activates Sludge Model No. 1 ”. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίστηκε κατά πολύ στο προϋπάρχον μαθηματικό μοντέλο του Πανεπιστημίου του Cape Town (UCT). (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.) Παρακάτω ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή των μεταβλητών και των διεργασιών του μοντέλου. Για περισσότερες πληροφορίες συνίσταται η μελέτη των σημειώσεων του μαθήματος ‘Προχωρημένες Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων’ των Α. Ανδρεαδάκη, Κ. Νουτσόπουλου για το διεπιστημονικό – διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών ‘Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων’ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

3.1.1 Μεταβλητές μοντέλου

Προτού περιγραφούν οι μεταβλητές του μοντέλου είναι χρήσιμο να αναφερθεί ένας παράγοντας ο οποίος έχει γίνει η αιτία σύγχυσης και ως ενός σημείου δυσχέρανε την ανάπτυξη της θεωρίας της ενεργού ιλύος. Ο παράγοντας αυτός είναι η έλλειψη ενός συμβατού μέτρου μέτρησης της συγκέντρωσης της οργανικής ουσίας στα λύματα. Τρεις μετρήσεις έτυχαν αποδοχής και χρησιμοποιούνται ευρέως: το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), ο συνολικός οργανικός άνθρακας (TOC) και το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD). Από τις τρεις αυτές μετρήσεις, αναμφισβήτητα το COD πλεονεκτεί καθώς επιτρέπει τη διασύνδεση μεταξύ των ισοδύναμων ηλεκτρονίων της οργανικής τροφής της βιομάζας και του χρησιμοποιούμενου οξυγόνου. Για το λόγο αυτό οι συγκεντρώσεις όλων των οργανικών υλικών συμπεριλαμβανομένης και της βιομάζας παρουσιάζονται σε μονάδες COD στο μοντέλο (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.).

Το οργανικό λοιπόν φορτίο στο IAWQ διακρίνεται σε βιοδιασπώμενο COD, μη-βιοδιασπώμενο COD και οργανικό φορτίο στη βιομάζα. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την ονοματολογία του μοντέλου τα σωματιδιακά στοιχεία συμβολίζονται με X και τα διαλυτά με S. Επίσης χρησιμοποιούνται δείκτες για το λεπτομερή καθορισμό των χαρακτηριστικών συστατικών.

Αναλυτικότερα, οι μεταβλητές του ASM1 σύμφωνα με την περιγραφή που πραγματοποίησε ο Jeppsson (Jeppsson Ulf) είναι οι παρακάτω:

Η μη-βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη είναι βιολογικά αδρανής και διέρχεται μέσα από το σύστημα ενεργού ιλύος αναλλοίωτη. Ανάλογα με τη φυσική της κατάσταση μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κομμάτια: διαλυμένο και σωματιδιακό. Η αδρανής διαλυμένη οργανική ύλη S_I , φεύγει από το σύστημα με την ίδια συγκέντρωση με την οποία είχε εισέλθει. Η αδρανής αιωρούμενη οργανική ύλη X_I παγιδεύεται στην ενεργό ιλύ και απομακρύνεται από το σύστημα μέσω της απομακρυνθείσης ιλύος.

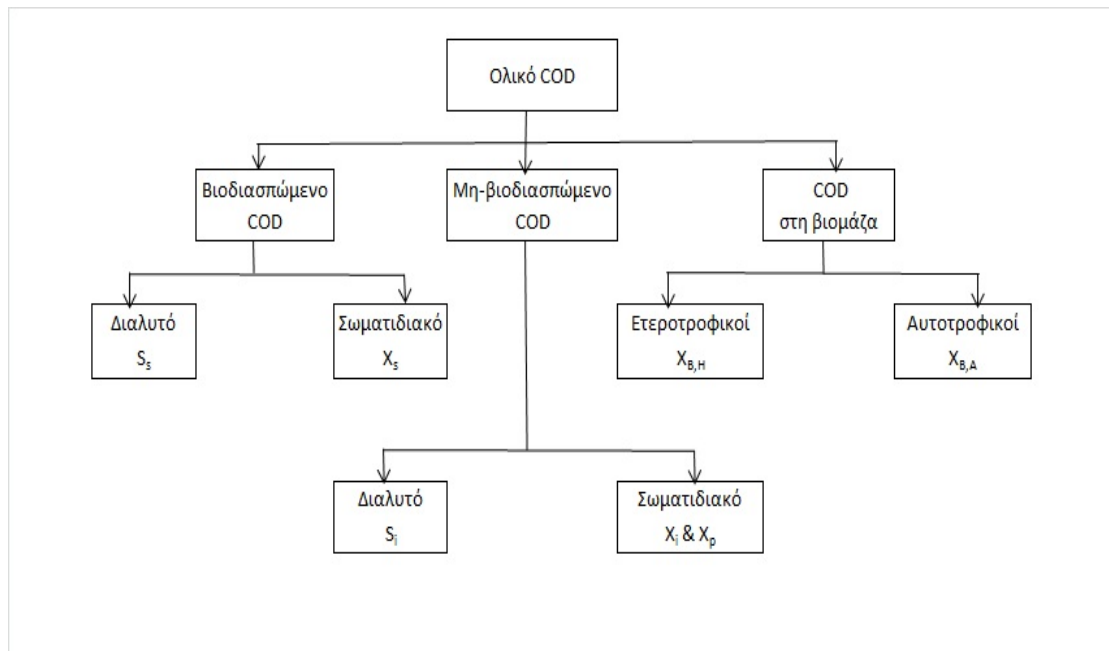
Η βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: την εύκολα βιοδιασπάσιμη και την αργά βιοδιασπάσιμη. Για λόγους διευκόλυνσης της προσομοίωσης η εύκολα βιοδιασπάσιμη ύλη S_S θεωρείται ως διαλυμένη, ενώ τουναντίον η αργά βιοδιασπάσιμη ύλη X_S , θεωρείται ως σωματιδιακή. Θα πρέπει να επισημανθεί παρόλα αυτά ότι κάποια αργά βιοδιασπάσιμη ύλη μπορεί στην πραγματικότητα να είναι διαλυμένη.

Η εύκολα βιοδιασπάσιμη ύλη συνίσταται από σχετικά απλά μόρια τα οποία μπορούν να εισέλθουν στο κύτταρο και να προσληφθούν άμεσα από τα ετεροτροφικά βακτηρίδια οδηγώντας έτσι σε ανάπτυξη νέας βιομάζας. Ένα ποσοστό του COD που αντιστοιχεί στα μόρια, ενσωματώνεται στη βιομάζα παρόλο που η ισορροπία χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει με την ενέργεια που χρειάζεται για τη σύνθεση. Τα ηλεκτρόνια που συσχετίζονται με το ποσοστό αυτό μεταφέρονται στους εξωγενείς αποδέκτες ηλεκτρονίων (οξυγόνο ή νιτρικά).

Αντίθετα η αργά βιοδιασπάσιμη ύλη, αποτελούμενη από σχετικά σύνθετα μόρια, δεν εισέρχεται στο κύτταρο, μπορεί ωστόσο να υφίσταται ενζυματική δράση εξωκυτταρικά και να μετατρέπεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη ύλη και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί. Γίνεται η παραδοχή ότι η μετατροπή της αργά βιοδιασπάσιμης ύλης σε εύκολα βιοδιασπάσιμη (υδρόλυση) δε συμπεριλαμβάνει χρησιμοποίηση ενέργειας και έτσι δεν έχει σχέση με τους αποδέκτες ηλεκτρονίων.

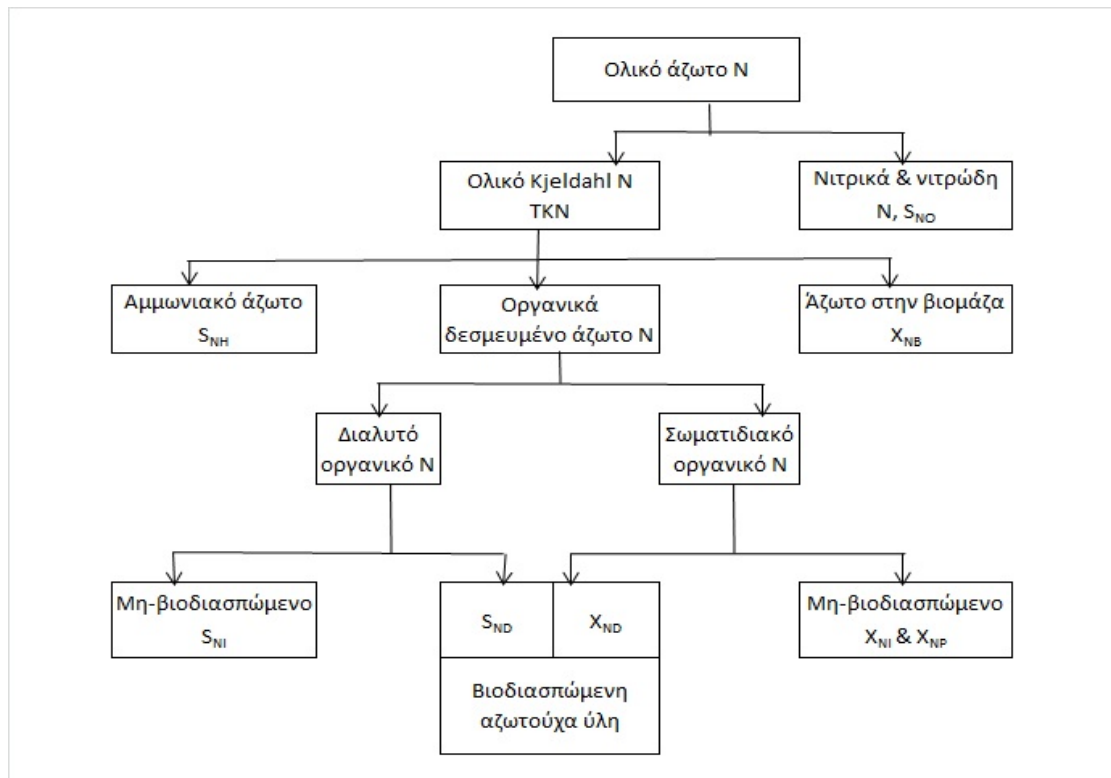
Η ετεροτροφική βιομάζα δημιουργείται με κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής από αερόβιες ή ανοξικές συνθήκες, όμως σταματά κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Η βιομάζα μειώνεται μέσω της αποσύνθεσης η οποία συμπεριλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό μηχανισμών όπως ο ενδογενής μεταβολισμός, ο θάνατος, η κατανάλωσή της από ανώτερους οργανισμούς (πρωτόζωα) και η λύσις. Γίνεται η παραδοχή ότι η αποσύνθεση συντελεί στη μετατροπή της βιομάζας αφενός σε αργά βιοδιασπάσιμη τροφή X_S , αφετέρου σε σωματιδιακά προϊόντα X_P , τα οποία είναι αδρανή σε περαιτέρω βιολογικές διεργασίες.

Η παραπάνω κλασματοποίηση του οργανικού φορτίου φαίνεται ξεκάθαρα στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 3-1 Κλασματοποίηση οργανικού φορτίου (Jeppsson Ulf)

Τα αζωτούχα συστατικά στα υγρά απόβλητα χωρίζονται σύμφωνα με το σχήμα 2. Με βάση τις μετρήσεις του ολικού Kjeldahl αζώτου (TKN), το άζωτο χωρίζεται σε αμμωνιακό άζωτο (S_{NH}), οργανικά δεσμευμένο άζωτο και άζωτο της ενεργού βιομάζας (X_{NB}), το οποίο είναι το κλάσμα εκείνο της βιομάζας που θεωρείται αζωτούχας ύλης. Ομοίως με τη διαίρεση του οργανικού υλικού, το οργανικά δεσμευμένο άζωτο χωρίζεται σε διαλυτό και σωματιδιακό, τα οποία με τη σειρά τους μπορεί να είναι βιοδιασπώμενα και μη βιοδιασπώμενα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο το σωματιδιακό βιοαποικοδομήσιμο οργανικό άζωτο (X_{ND}) και το διαλυτό βιοδιασπώμενο οργανικό άζωτο (S_{ND}) περιλαμβάνονται ρητώς στο μοντέλο. Το άζωτο της βιομάζας (X_{NB}) περιλαμβάνεται στο μοντέλο μόνο με την έννοια ότι η αποσύνθεση της βιομάζας θα οδηγήσει στην παραγωγή βιοδιασπώμενου οργανικού αζώτου. Το οργανικό άζωτο που σχετίζεται με το αδρανές οργανικό σωματιδιακό COD (X_{NP} & X_{NI}) μπορεί εύκολα να υπολογιστεί, αν και δεν περιγράφεται στο μοντέλο. Το διαλυμένο μη-βιοδιασπάσιμο αζωτούχο τμήμα (S_{NI}) συχνά είναι αμελητέο και δεν ενσωματώνεται στο μοντέλο. Τέλος, τα νιτρικά και νιτρώδη περιλαμβάνονται σε μία μόνο μεταβλητή (S_{NO}), για χάριν απλουστεύσεως του μοντέλου.



Εικόνα 3-2 Κλασματοποίηση αζωτούχων συστατικών (Jeppsson Ulf)

Τα δύο τελευταία στοιχεία που περιγράφονται στο μοντέλο IAWQ είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (S_O), εκφραζόμενη ως αρνητικό COD, και η αλκαλικότητα (S_{alk}).

3.1.2 Διεργασίες μοντέλου

• **Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών οργανισμών:** Ένα κλάσμα του άμεσα βιοαποικοδομήσιμου υποστρώματος (S_S) χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας υπό αερόβιες συνθήκες. Η ανάπτυξη αυτή μαθηματικοποιείται μέσω μίας συνθήκης κορεσμού (τύπου Monod). Η αμμωνία χρησιμοποιείται ως πηγή αζώτου για τη σύνθεση και ενσωματώνεται στην κυτταρική μάζα. Τόσο η συγκέντρωση των S_S όσο και του οξυγόνου (S_O) μπορεί να είναι ο περιοριστικός παράγοντας για την παραπάνω διεργασία. Αυτή η διαδικασία είναι γενικά ο κύριος παράγοντας παραγωγής νέας βιομάζας και απομάκρυνσης οργανικού φορτίου (COD). Συνδέεται τέλος και με την αλλαγή στην αλκαλικότητα των λυμάτων.

• **Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών οργανισμών:** Σε ανοξικές συνθήκες οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τα νιτρικά (S_{NO}) ως τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων αντί του οξυγόνου (S_O). Η συγκεκριμένη διεργασία οδηγεί στην παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας και αερίου αζώτου (απονιτροποίηση), το οποίο σχετίζεται επίσης με αλλαγή της αλκαλικότητας. Το μαθηματικό μοντέλο

προσομοίωσης είναι το ίδιο με αυτό της αερόβιας ανάπτυξης, με μόνη διαφορά την προσθήκη ενός μειωτικού συντελεστή n_g ($n_g < 1$). Ο μειωμένος ρυθμός ανάπτυξης μπορεί να είναι απόρροια είτε ενός μικρότερου μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών (μ_{maxH}) σε ανοξικές συνθήκες, είτε επειδή μόνο ένα κομμάτι της ετεροτροφικής βιομάζας είναι ικανό να λειτουργήσει με τα νιτρικά ως αποδέκτη ηλεκτρονίων.

• **Αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικών:** Το διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο χρησιμοποιείται ως η πηγή ενέργειας για την ανάπτυξη των νιτροποιητών συντελώντας έτσι στη δημιουργία αυτοτροφικής κυτταρικής βιομάζας και νιτρικού αζώτου σαν τελικά προϊόντα. Η ποσότητα του οξυγόνου που χρησιμοποιείται είναι ανάλογη της ποσότητας του αμμωνιακού αζώτου που οξειδώνεται. Μία διπλή συνάρτηση κορεσμού χρησιμοποιείται για να εκφραστεί η εξάρτηση του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των αυτοτροφικών από τις συγκεντρώσεις τόσο του διαλυμένου αζώτου, όσο και του διαλυμένου οξυγόνου με το τελευταίο να λειτουργεί σα “διακόπτης”. Αν και η αερόβια ανάπτυξη των αυτοτροφικών είναι γνωστό ότι επηρεάζεται από το pH των λυμάτων στα οποία αναπτύσσονται οι οργανισμοί, αυτή η εξάρτηση δε συμπεριλαμβάνεται στην κινητική, λόγω της δυσκολίας πρόβλεψης του pH στο βιολογικό αντιδραστήρα. Θεωρείται προτιμότερο κάθε ενδεχόμενο πρόβλημα να μπορεί να ελέγχεται μέσω της χρήσης του όρου της αλκαλικότητας.

• **Αποσύνθεση ετεροτροφικών:** Η προσομοίωση της αποσύνθεσης, η οποία μπορεί να αποδοθεί σε αρκετούς μηχανισμούς, όπως η λύσις και η φθορά, μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Η πιο κοινή ωστόσο τεχνική είναι η ενσωμάτωση όλων των προαναφερθέντων μηχανισμών σε μία έκφραση αποσύνθεσης. Η μαθηματική αυτή έκφραση βασίζεται στην έννοια του κύκλου “θάνατος-επαναδημιουργία” (death-regeneration) και είναι ευθέως ανάλογη με την συγκέντρωση της ενεργής βιομάζας, λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι κάθε μονάδα καταναλωθέντος COD πρέπει να συνεπάγεται τη χρήση μιας ισοδύναμης ποσότητας διαλυμένου οξυγόνου. Η αποσύνθεση, όπως προαναφέρθηκε, συντελεί στη μετατροπή της βιομάζας αφενός σε αργά βιοδιασπάσιμη τροφή X_s , αφετέρου σε σωματιδιακά προϊόντα X_p , τα οποία είναι αδρανή σε περαιτέρω βιολογικές διεργασίες, ενώ το οργανικό άζωτο που σχετίζεται με το X_s γίνεται διαθέσιμο ως σωματιδιακό οργανικό άζωτο. Ακόμη, δεν χρησιμοποιείται αποδέκτης ηλεκτρονίων και θεωρείται ότι δεν υπάρχει απώλεια οργανικού φορτίου. Τέλος η διεργασία της φθοράς των ετεροτροφικών μικροοργανισμών θεωρείται ότι συντελείται με τον ίδιο ρυθμό τόσο σε αερόβιες όσο σε ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες.

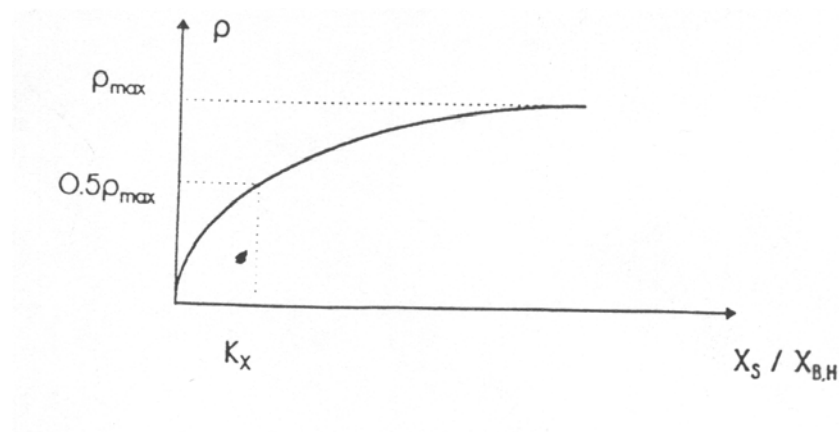
• **Αποσύνθεση αυτοτροφικών:** Η συγκεκριμένη διεργασία προσομοιώνεται όπως και η αποσύνθεση ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

• **Αμμωνιοποίηση διαλυτής οργανικής αζωτούχας ύλης:** Η διαλυμένη βιοδιασπώμενη αζωτούχα ύλη (S_{ND}) του οργανικά δεσμευμένου αζώτου μετατρέπεται σε αμμωνιακό άζωτο (S_{NH}) μέσω μίας διεργασίας πρώτης τάξεως που συντελείται από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Ιόντα υδρογόνου καταναλώνονται κατά τη διαδικασία, οδηγώντας σε αλλαγές στην αλκαλικότητα.

• **Υδρόλυση παγιδευμένων οργανικών:** Η διάσπαση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης είναι πολύ σημαντική για τη ρεαλιστική προσομοίωση συστημάτων

ενεργού ιλύος, αφού είναι η κυρίως υπεύθυνη διεργασία για τη ρεαλιστική προσομοίωση της χρονικής και χωρικής εξάρτησης της κατανομής του αποδέκτη ηλεκτρονίων. Κάποιες υποθέσεις είναι αναγκαίες και αρκετά βάσιμες ώστε το όλο μοντέλο να δίνει ρεαλιστικές κατανομές του αποδέκτη ηλεκτρονίων. Μία, είναι ότι η ταχύτητα υδρόλυσης βρίσκεται σε πρώτη τάξεως αναλογία προς την ενεργή υφιστάμενη ετεροτροφική βιομάζα. Μία άλλη, είναι ότι η ταχύτητα της διεργασίας μεγαλώνει και τείνει σε σταθερή μέγιστη τιμή, όσο ο λόγος του προσροφημένου υλικού προς την προσροφούσα βιομάζα αυξάνεται (εικόνα 3-3). Τέλος, λόγω της ανάγκης ενζυμικής σύνθεσης, θα πρέπει ο ρυθμός να εξαρτάται από τη συγκέντρωση του υφιστάμενου αποδέκτη ηλεκτρονίων. Ο ρυθμός αυτός τέλος μειώνεται υπό ανοξικές συνθήκες σε σύγκριση με αερόβιες συνθήκες, με έναν μειωτικό συντελεστή n_h ($n_h < 1$).

• **Υδρόλυση αργά βιοδιασπώμενης αζωτούχας ύλης:** Το σωματιδιακό βιοδιασπώμενο οργανικό άζωτο (X_{ND}) υδρολύεται σε διαλυτό βιοδιασπώμενο οργανικό άζωτο (S_{ND}) με ρυθμό ανάλογο της διαδικασίας υδρόλυσης του βιοδιασπώμενου οργανικού φορτίου, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 3-3 Μεταβολή του ρυθμού υδρόλυσης συναρτήσει του λόγου $X_S/X_{B,H}$ (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)

3.1.3 Διεργασίες κινητικές και στοιχειομετρία μοντέλου

Ένα πρόβλημα το οποίο συχνά ανακύπτει σε ερευνητικές εργασίες που παρουσιάζουν μοντέλα τα οποία περιγράφουν σύνθετα συστήματα, είναι η δυσκολία να αποδοθεί ακριβώς το σκεπτικό πάνω στο οποίο βασίστηκε η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, είναι συχνά δύσκολη η περιγραφή όλων των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα συστατικά του συστήματος.

Ειδική ομάδα εργασίας της IAWQ κατέληξε στο συμπέρασμα, βάσει προηγούμενων εργασιών (Paterson 1965), ότι ένα ορισμένο σχήμα πίνακα, για την παρουσίαση του

μοντέλου προσφέρει την καλύτερη δυνατότητα για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, ενώ παράλληλα μεταφέρει το μέγιστο αριθμό πληροφοριών. Παράλληλα κατέληξε στη χρησιμοποίηση μιας συγκεκριμένης σημειογραφίας.

Για την ανάπτυξη του πίνακα απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αναγνώριση των βιολογικών διεργασιών που συντελούνται στο σύστημα. Αυτές οι διεργασίες καταγράφονται στην αριστερή στήλη του πίνακα και ο δείκτης j αποδίδεται σε κάθε μία από αυτές τις διεργασίες. Οι κινητικές εκφράσεις για κάθε διεργασία αναγράφονται στη δεξιά στήλη του πίνακα και στην αντίστοιχη γραμμή. Τέλος οι συντελεστές που εκφράζουν τους ρυθμούς των διεργασιών δηλώνονται με ρ_j όπου το j αναφέρεται στην αντίστοιχη διεργασία. Έτσι λοιπόν το μοντέλο IAWQ No. 1 περιγράφεται από τον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 3-1) βάση όλων των παραπάνω.

Για κάθε μεταβλητή του μοντέλου η μαθηματική εξίσωση που την περιγράφει προσδιορίζεται εύκολα από τις διεργασίες που την επηρεάζουν και τους αντίστοιχους στοιχειομετρικούς συντελεστές και ρυθμούς ανάπτυξης. Έτσι για παράδειγμα η συγκέντρωση του σωματιδιακού οργανικού φορτίου (X_S) αυξάνεται από την αποσύνθεση των ετεροτροφικών και αυτοτροφικών μικροοργανισμών ενώ μειώνεται από την υδρόλυση των παγιδευμένων οργανικών. Ο μαθηματικός τύπος λοιπόν που προσομοιώνει όλα τα παραπάνω είναι η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{dX_S}{dt} = (1 - f_p)(b_H X_{B,H} + b_A X_{B,A}) - K_h \frac{X_S/X_{BH}}{K_H + (X_S/X_{BH})} \left\{ \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + n_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} X_{BH} \quad (1)$$

Πίνακας 3-1 Διεργασίες, κινητικές και στοιχειομετρία μοντέλου ASM1 (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)

Διεργασίες	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}	Ρυθμός διεργασιών ρ _j (ML ⁻³ T ⁻¹)
1.Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών		1 - Y _H			1			$\frac{1 - Y_H}{Y_H}$		-i _{XB}				$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_{BH}$
2.Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών		1 - Y _H			1			$\frac{1 - Y_H}{2.88Y_H}$		-i _{XB}				$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) X_{BH}^{n_g}$
3.Αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικών						1		$\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	1/Y _A	-i-(1/Y _A)				$\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) \left(\frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \right) X_{BA}$
4.Αποσύνθεση ετεροτροφικών				1 - f _p	-1						I _{XB} - f _p i _{XP}			$b_H X_{BH}$
5.Αποσύνθεση αυτοτροφικών				1 - f _p		-1					I _{XB} - f _p i _{XP}			$b_A X_{BA}$
6.Αμμωνιοποίηση διαλυμένου οργανικού αζώτου										1	-1		1/14	$K_S S_{ND} X_{BH}$
7.Υδρόλυση παγιδευμένων οργανικών		1		-1										$K_h \frac{X_S/X_{BH}}{K_H + (X_S/X_{BH})} \left\{ \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + n_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} X_{BH}$
8.Υδρόλυση παγιδευμένου οργανικού αζώτου											1	-1		$\rho_7 (X_{ND}/X_S)$
Παρατηρούμενος ρυθμός αντίδρασης	$r_i = \sum V_{ij} \rho_j$													

3.2 Περιγραφή του Activated Sludge Model No. 2 (ASM2)

Όπως προαναφέρθηκε, το ASM1 προσομοιώνει τις διαδικασίες της απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης. Για το λόγο αυτό έγιναν προσπάθειες επέκτασης, ώστε το νέο μοντέλο να έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει και την απομάκρυνση φωσφόρου. Το αποτέλεσμα ήταν το Activated Sludge Model No. 2 (ASM2), το οποίο χρησιμοποιεί όλες τις έννοιες που ενσωματώνονται στο ASM1, όντας επέκτασή του.

Η σημαντικότερη διαφορά των δύο μοντέλων είναι το γεγονός ότι στο ASM2 η βιομάζα έχει εσωκυτταρική αποθηκευτική ικανότητα και επομένως, η συγκέντρωσή της δεν μπορεί απλά να περιγραφθεί με τη παράμετρο X_{BM} . Ακόμη ενώ το ASM1 βασίστηκε εξ ολοκλήρου στο COD για όλα τα σωματιδιακά οργανικά υλικά, καθώς επίσης και της συνολικής συγκέντρωσης της βιομάζας, το ASM2 περιλαμβάνει τα πολυφωσφορικά, ένα συστατικό της ενεργού ιλύος που είναι πρωταρχικής σημασίας για την παρουσίαση του συστήματος, η οποία όμως δεν είναι δυνατό να αποτυπωθεί σε όρους COD. Για αυτόν τον λόγο, εισάγεται στο μοντέλο ο όρος των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS). Τα TSS επιτρέπουν επίσης το συνυπολογισμό και των ανόργανων σωματιδιακών στερεών στην είσοδο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, όπως και τα παραγόμενα στερεά από πιθανή χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου. Παράλληλα, ενώ η στοιχειομετρία του ASM1 βασίζεται στη συνέχεια του COD, των ηλεκτρικών φορτίων και του N, το ASM2 βασίζεται επιπλέον στη συνέχεια του P αλλά και των TSS (Μπούσουλας Άγγελος, 2010).

Τέλος το ASM2 δεν διαχωρίζει τη σύσταση (εσωτερική δομή κυττάρων) μεταξύ των κυττάρων αλλά θεωρεί μια μέση σύσταση όλης της βιομάζας. Δεδομένου ότι κάθε κύτταρο έχει τη δική του ιστορία ανάπτυξης, τη δική του εσωτερική δομή και σύσταση, η σύστασή του πιθανώς να αποκλίνει από τη μέση σύσταση του πληθυσμού των κυττάρων (π.χ. μπορεί ένα κύτταρο να μην περιέχει αποθηκευμένα προϊόντα ενώ η μέση κατάσταση πιθανώς να έχει διαθέσιμα). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός, διότι οι κινητικές που χρησιμοποιούνται στο ASM2 εκφράζονται μη γραμμικά, και επομένως η μέση συμπεριφορά ίσως να μην παρουσιάζεται από τις μέσες ιδιότητες (IWA, 2000).

3.2.1 Μεταβλητές μοντέλου

Ομοίως με το ASM1, τα διαλυτά συστατικά συμβολίζονται με 'S' και τα σωματιδιακά με 'X'. Μέσα στα συστήματα ενεργού ιλύος, τα σωματιδιακά συστατικά, X, τα οποία πρέπει να είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, υποτίθεται ότι σχετίζονται με την ενεργό ιλύ (είναι δηλαδή ενσωματωμένα στα συσσωματωμένα σωματίδια της ενεργού ιλύος). Μπορούν να συμπυκνωθούν μέσω των διεργασιών καθίζησης και συμπύκνωσης στις δεξαμενές καθίζησης ενώ τα διαλυτά συστατικά, S, τα οποία μπορούν να είναι και ιονισμένα, μεταφέρονται μέσω του νερού. Όλα

τα συστατικά τέλος, υποτίθεται ότι είναι ομοιογενή και διανέμονται σε όλο το σύστημα.

Παρακάτω, δίδεται μία συνοπτική παρουσίαση όλων των διαλυτών και σωματιδιακών μεταβλητών του μοντέλου, όπως αυτές περιγράφονται στο αντίστοιχο τεύχος της Διεθνούς Ένωσης για το Νερό (IWA, 2000):

S_A [M(COD)L⁻³]: Προϊόντα αναερόβιας ζύμωσης που είναι μια ξεχωριστή διεργασία και που θεωρείται ότι είναι της μορφής της ακετόνης. Δεδομένου ότι η ζύμωση συμπεριλαμβάνεται στις βιολογικές διεργασίες, τα S_A , τα οποία είναι τα τελικά προϊόντα της ζύμωσης, πρέπει να διαμορφωθούν χωριστά από τα υπόλοιπα διαλυτά οργανικά υλικά.

S_F [M(COD)L⁻³]: Ζυμώσιμο, εύκολα βιοδιασπώσιμο διαλυτό οργανικό υλικό. Αυτό το κλάσμα του διαλυτού COD είναι άμεσα διαθέσιμο για διάσπαση από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς και χρησιμεύει ως υπόστρωμα για την ανάπτυξη τους. Το S_F θεωρείται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως υπόστρωμα για τις διεργασίες αναερόβιας ζύμωσης.

Αξίζει να σημειωθεί πως το εύκολα βιοδιασπώμενο οργανικό φορτίο του ASM1, S_S , διαιρείται στις δύο παραπάνω μεταβλητές στο ASM2, δηλαδή $S_S = S_A + S_F$.

S_I [M(COD)L⁻³]: Αδρανές διαλυτό οργανικό υλικό. Το οργανικό υλικό αυτό δεν μπορεί να αποδομηθεί περαιτέρω και υποτίθεται ότι είναι τμήμα της εισόδου ενώ μπορεί να παραχθεί από την υδρόλυση του σωματιδιακού οργανικού φορτίου X_S .

S_{N2} [M(N)L⁻³]: Αέριο άζωτο. Το S_{N2} θεωρείται ότι είναι το μοναδικό προϊόν της απονιτροποίησης, ενώ μπορεί να εμπλέκεται σε διεργασίες ανταλλαγής αερίων, όπως το οξυγόνο.

S_{NH4} [M(N)L⁻³]: Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο, το οποίο είναι το άθροισμα της ιονισμένης μορφής (αμμώνιο NH_4^+) και της μη ιονισμένης (αμμωνία NH_3). Για την ηλεκτρική ισορροπία θεωρείται ότι είναι μόνο στη μορφή των αμμωνιακών ιόντων NH_4^+ .

S_{NO3} [M(N)L⁻³]: Διαλυμένο νιτρικό και νιτρώδες άζωτο. Για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς θεωρείται ότι είναι όλο στη μορφή των νιτρικών ιόντων NO_3^- .

S_{O2} [M(O₂)L⁻³]: Διαλυμένο οξυγόνο. Το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να συμμετέχει σε ανταλλαγή αερίων.

S_{PO4} [M(P)L⁻³]: Ανόργανος διαλυτός φώσφορος, κυρίως ορθοφωσφορικά. Για την ηλεκτρική ισορροπία, θεωρείται ότι αποτελείται από 50% $H_2PO_4^-$ και από 50% HPO_4^{2-} , ανεξαρτήτως pH.

S_{ALK} [mol(HCO₃)L⁻³]: Αλκαλικότητα των λυμάτων. Η αλκαλικότητα χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει την διατήρηση των ηλεκτρικού φορτίου στις βιολογικές αντιδράσεις και εισάγεται προκειμένου να παρέχει πληροφορίες μέσω των οποίων μπορούν να εκτιμηθούν υπερβολικές διακυμάνσεις του pH, οι οποίες μπορούν να εμποδίσουν μερικές βιολογικές διεργασίες. Για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς, το S_{ALK} υποτίθεται ότι είναι μόνο διανθρακικό ιόν, HCO_3^- .

X_{AUT} [$M(COD)L^{-3}$]: Νιτροποιητές, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την νιτροποίηση που γίνεται σε αερόβιες συνθήκες μέσω του αυτοτροφικού χημικοσυνθετικού αερόβιου μεταβολισμού. Οι νιτροποιητές, που είναι υποχρεωτικά αερόβιοι, θεωρείται ότι οξειδώνουν απευθείας το αμμωνιακό άζωτο σε νιτρικό άζωτο (οι νιτροποιητές περιλαμβάνουν τις νιτροσομονάδες και τα νιτροβακτηρίδια).

X_H [$M(COD)L^{-3}$]: Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί, που αποτελούν την ετεροτροφική βιομάζα, η οποία μπορεί να αναπτύσσεται κάτω από αερόβιες ή ανοξικές συνθήκες και να είναι ενεργή κάτω από αναερόβιες συνθήκες (ζύμωση). Είναι υπεύθυνοι για την υδρόλυση του σωματιδιακού υποστρώματος και μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλα τα βιοδιασπάσιμα οργανικά υλικά κάτω από οποιοσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες.

X_I [$M(COD)L^{-3}$]: Αδρανές σωματιδιακό οργανικό υλικό. Είναι φανερό και από τον ορισμό τους ότι τα προϊόντα αυτά, τα οποία δημιουργούνται από την αποσύνθεση της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας ή είναι ένα κλάσμα των λυμάτων εισόδου, θεωρούνται ότι είναι αδρανή στις βιολογικές διεργασίες και επομένως δεν καταστρέφονται.

X_{MeOH} [$M(TSS)L^{-3}$]: Υδροξείδια μετάλλων. Αυτό το συστατικό προστίθεται στα λύματα και προκαλεί τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου ή μπορεί να υπάρχει στα λύματα. Για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς, θεωρείται ότι η σύστασή του είναι της μορφής του υδροξειδίου του σιδήρου $Fe(OH)_3$, που μπορεί ωστόσο να αντικατασταθεί με άλλο μέταλλο με αλλαγή των στοιχειομετρικών και κινητικών δεδομένων.

X_{MeP} [$M(TSS)L^{-3}$]: Φωσφορικά μέταλλα. Αυτό το συστατικό δημιουργείται από την χημική αντίδραση σχηματισμού στερεών κατά τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου με προσθήκη μετάλλου $Fe(III)$. Και εδώ είναι δυνατόν να αντικατασταθεί ο τρισθενής σίδηρος με άλλο μέταλλο με αλλαγή των στοιχειομετρικών και κινητικών δεδομένων.

X_{PAO} [$M(COD)L^{-3}$]: Πολυφωσφορικά βακτηρίδια. Τα πολυφωσφορικά βακτηρίδια υποτίθεται ότι αντιπροσωπεύουν όλες τις κατηγορίες των μικροοργανισμών που έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώνουν περισσότερα, από το κανονικό, πολυφωσφορικά στη μάζα τους. Στη συγκέντρωση των X_{PAO} δεν συμπεριλαμβάνονται τα αποθηκευμένα προϊόντα X_{PP} και X_{PHA} , αλλά μόνο η 'αληθινή' βιομάζα.

X_{PHA} [$M(COD)L^{-3}$]: Εσωκυτταρικά αποθηκευμένα προϊόντα των πολυφωσφορικών βακτηριδίων, PAO. Περιλαμβάνονται τα πολυ-υδροξυ-αλκανοειδή (PHA), το γλυκογόνο κ.α., αλλά δεν συμπεριλαμβάνονται στη μάζα των πολυφωσφορικών βακτηριδίων. Το X_{PHA} είναι ένα λειτουργικό συστατικό που απαιτείται για τη δημιουργία του μοντέλου αλλά δεν μπορεί να προσδιοριστεί απευθείας με αναλυτικές μετρήσεις των PHA ή του γλυκογόνου. Μπορεί να προσδιοριστεί έμμεσα από μια ανάλυση του COD, όπου και θα πρέπει να ικανοποιείται η ισορροπία μάζας. Για τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς, θεωρείται ότι το PHA έχει τη χημική δομή των πολυ-υδροξυ-βουτυρικών $(C_4H_6O_2)_n$.

X_{PP} [$M(P)L^{-3}$]: Πολυφωσφορικά. Είναι εσωκυτταρικά αποθηκευμένα ανόργανα υλικά των πολυφωσφορικών βακτηριδίων και μέρος του σωματιδιακού φωσφόρου και μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά. Για τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς, τα πολυφωσφορικά θεωρείται ότι έχουν τη χημική σύσταση $(K_0.33Mg_0.33PO_3)_n$.

X_S [$M(COD)L^{-3}$]: Αργά βιοδιασπάσιμο οργανικό υλικό. Η αργά βιοδιασπάσιμη ύλη, αποτελούμενη από σχετικά σύνθετα μόρια, δεν εισέρχεται στο κύτταρο, μπορεί ωστόσο να υφίσταται ενζυματική δράση εξωκυτταρικά (υδρόλυση) και να μετατρέπεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη ύλη και στη συνέχεια να χρησιμοποιείται. Θεωρείται ότι τα προϊόντα της υδρόλυσης (S_F) μπορούν να υποστούν και ζύμωση.

X_{TSS} [$M(TSS)L^{-3}$]: Ολικά αιωρούμενα στερεά, TSS. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά εισέρχονται στο μοντέλο και υπολογίζεται η συγκέντρωσή τους μέσω στοιχειομετρικών αναλογιών. Επειδή η απομάκρυνση και κατακρήμνιση του φωσφόρου δημιουργεί ανόργανα στερεά, η πρόβλεψη της συγκέντρωσης των TSS είναι σημαντική.

3.2.2 Διεργασίες μοντέλου

Ακολουθεί η παρουσίαση των διεργασιών του ASM2, όπως αυτή περιγράφηκε από τον Μπούσουλα Άγγελο (Μπούσουλας Άγγελος, 2010).

Σε συμφωνία με την ονοματολογία της IAWQ, τα σωματιδιακά συστατικά συμβολίζονται με X και τα διαλυτά με S . Ο δείκτης i αποδίδεται σε κάθε συστατικό και ο δείκτης j αποδίδεται σε κάθε μία διεργασία. Οι συντελεστές που εκφράζουν τους ρυθμούς των διεργασιών δηλώνονται με ρ_j , όπου το j αναφέρεται στην αντίστοιχη διεργασία.

Η βασική εξίσωση ισορροπίας μάζας μέσα στα όρια οποιουδήποτε ορισμένου συστήματος είναι:

Είσοδος - Έξοδος + Αντίδραση = Συγκέντρωση

Οι όροι εισόδου και εξόδου είναι μεταφορικοί όροι και βασίζονται στα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος που προσομοιώνεται. Ο όρος αντίδρασης του συστήματος r_i προκύπτει αθροίζοντας τα γινόμενα των στοιχειομετρικών συντελεστών v_{ji} και των εκφράσεων των ρυθμών των διεργασιών (κινητικές) ρ_j για το συστατικό i για το οποίο γράφεται η εξίσωση μάζας.

Έτσι λοιπόν: $r_i = \sum v_{ji} * \rho_j$

Μέσα στον πίνακα, ένας στοιχειομετρικός συντελεστής, v_{jk} , της κάθε διεργασίας j μπορεί να επιλεγεί να είναι αδιάστατος με τιμές +1 ή -1. Για όλους τους υπόλοιπους στοιχειομετρικούς συντελεστές μπορούν να δίνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις, που να τηρούν την ισορροπία μάζας για το κάθε συστατικό μέσα σε συγκεκριμένα ορισμένο σύστημα. Εναλλακτικά, το v_{ji} μπορεί να δοθεί με τη μορφή απόλυτων τιμών $M_i M_k^{-1}$, όπου το M_k είναι η μονάδα μάζας του κάθε συστατικού k

πάνω στο οποίο έχει βασιστεί η στοιχειομετρία (το συστατικό που έχει τιμή $v_{jk} = +1$ ή -1).

Ένα άλλο όφελος από τον πίνακα είναι η δυνατότητα ελέγχου της συνέχειας. Η συγκέντρωση ενός συστατικού μέσα στο σύστημα μπορεί να επηρεάζεται από μία σειρά διαφορετικών διεργασιών. Ένα σημαντικό όφελος από αυτή την απεικόνιση του πίνακα είναι ότι επιτρέπει γρήγορη και εύκολη αναγνώριση της διαίτας του κάθε συστατικού, γεγονός που υποβοηθά την επεξεργασία των εξισώσεων διατήρησης της μάζας. Πρέπει, το άθροισμα των στοιχειομετρικών συντελεστών, όταν όλοι είναι στις ίδιες μονάδες, να δίνει μηδέν. Με αυτό τον τρόπο, αθροίζοντας τους συντελεστές κατά γραμμή, ελέγχεται και η συνέχεια του συστήματος.

Η στοιχειομετρία στο ASM1 βασίζεται σε τρεις εξισώσεις συνέχειας, του COD, του ηλεκτρικού φορτίου και του αζώτου. Το ASM2 προσθέτει την εξίσωση συνέχειας του φωσφόρου σε αυτές τις τρεις αλλά και των ολικών αιωρούμενων στερεών X_{TSS} . Η εξίσωση συνέχειας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\sum v_{ji} * i_{ci} = 0 \text{ για όλα τα συστατικά } i \text{ (2)}$$

όπου $v_{ji} = 0$ στοιχειομετρικός συντελεστής του συστατικού i της διεργασίας j [$M_i M_k^{-1}$], $i_{ci} = 0$ συντελεστής μετατροπής για την μετατροπή των μονάδων του συστατικού i στις μονάδες του συστατικού c , όπου c είναι COD ή N ή P ή TSS ή ηλεκτρικό σθένος.

Στο ASM2 οι εξισώσεις συνέχειας χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των στοιχειομετρικών συντελεστών του S_{O_2} (S_{NO_3} και S_{N_2} στη διάσπαση νιτρικών) από το COD, του S_{NH_4} από το άζωτο, του S_{PO_4} από το φώσφορο, του S_{ALK} και των X_{TSS} από την ισορροπία διατήρησης μάζας των στερεών. Ο Πίνακας 2 είναι μια περίληψη της ταυτότητας των συντελεστών μετατροπής i_{ci} που πρέπει να εφαρμοστούν στην εξίσωση (2). Αυτοί οι συντελεστές μετατροπής λαμβάνονται από τη χημική στοιχειομετρία, οπουδήποτε είναι δυνατόν. Τα παραδείγματα είναι:

$COD_{,5} = -64 \text{ g } O_2 / 14 \text{ g } NO_3\text{-N}$ από $NO_3^- + H_2O + 2 H^+ - 7 NH_4^+ + 2O_2$ ή ένα μόριο νιτρικού αζώτου (14 gN) έχει αρνητικό COD ("ελευθερώνει το οξυγόνο") από δύο μόρια οξυγόνου (64 gO₂). Όλοι οι συντελεστές μετατροπής που δίνονται με απόλυτες τιμές στον Πίνακα 2 μπορούν να ληφθούν από τη χημική στοιχειομετρία. Όλοι οι συντελεστές που προσδιορίζονται με ένα σύμβολο i_{ci} πρέπει να ληφθούν από χημική ανάλυση.

Για παράδειγμα, ο στοιχειομετρικός συντελεστής για το συστατικό 2 ($i=2$) στην τρίτη διεργασία ($j=3$) μπορεί να ληφθεί από την εξίσωση συνέχειας του COD που βασίζεται στην εξίσωση 2.1, σύμφωνα με:

$$V_{3,2} = -(V_{3,1} * COD_{,1} + V_{3,3} * COD_{,3} + \dots + V_{3,n} * COD_{,n}) / COD_{,2}$$

$$\text{ή } V_{3,2} = -[\sum V_{3,i} * COD_{,i}] - V_{3,2} * COD_{,2} / COD_{,2}$$

Η εισαγωγή των εξισώσεων συνέχειας σε μια αφηρημένη μορφή μπορεί να εμφανιστεί περίπλοκη. Εντούτοις, η έννοια αυτή βοηθά στην απλοποίηση της ανάπτυξης του κώδικα του προγράμματος (IWA, 2000).

Οι στοιχειομετρικοί συντελεστές για τα S_{NH_4} , S_{PO_4} , S_{ALK} και X_{TSS} μπορούν να υπολογισθούν από την εξίσωση συνέχειας (σχέση 2) μέσω του Πίνακα 3.2, π.χ. $v_{1,PO_4} = -[(1-f_{SI}) \cdot i_{PSF} + f_{SI} \cdot i_{PSI} - 1 \cdot i_{PXS}]/1$

Πίνακας 3-2 Συντελεστές μετατροπής i_{ci} που εφαρμόζονται στις εξισώσεις συνέχειας του ASM2. Οι μονάδες του i_{ci} είναι $McMi^{-1}$, πχ. $i_{N,2} = i_{NSF} \text{ gN (gCOD)}^{-1}$ ή $i_{φορτίο,3} = -1/64 \text{ moles}^+ \text{ gCOD}^{-1}$ (IWA, 2000)

C	Εξίσωση συνέχειας	Μονάδες	COD	N	P	Ηλεκτρικό φορτίο	Μάζα
			$i_{COD,i}$ g COD	$i_{N,i}$ g N	$i_{P,i}$ g P	$i_{φορτίο,i}$ mole ⁺	$i_{TSS,i}$ g TSS
Συντελεστής i	Συστατικό						
1	S_{O_2}	g O ₂	-1	0	0	0	0
2	S_F	g COD	1	i_{NSF}	i_{PSF}	0	0
3	S_A	g COD	1	0	0	1/64	0
4	S_{NH_4}	g N	0	1	0	1/14	0
5	S_{NO_3}	g N	-64/14	1	0	-1/14	0
6	S_{PO_4}	g P	0	0	1	-1.5/31	0
7	S_I	g COD	1	i_{NSI}	i_{PSI}	0	0
8	S_{ALK}	mole HCO ₃ ⁻	0	0	0	-1	0
9	S_{N_2}	g N	-24/14	1	0	0	0
10	X_I	g COD	1	i_{NXI}	i_{PXI}	0	i_{TSSXI}
11	X_S	g COD	1	i_{NXS}	i_{PXS}	0	i_{TSSXS}
12	X_H	g COD	1	i_{NBM}	i_{PBM}	0	i_{TSSBM}
13	X_{PAO}	g COD	1	i_{NBM}	i_{PBM}	0	i_{TSSBM}
14	X_{PP}	g P	0	0	1	0	3.23
15	X_{PHA}	g COD	1	0	0	0	0.60
16	X_{AUT}	g COD	1	i_{NBM}	i_{PBM}	0	i_{TSSBM}
17	X_{TSS}	g TSS	0	0	0	0	-1 ^(α)
18	X_{MeOH}	g TSS	0	0	0	0	1
19	X_{MeP}	g TSS	0	0	0.205	0	1

α) Αφού τα TSS υπολογίζονται δύο φορές, αυτός ο συντελεστής πρέπει να είναι αρνητικός

Όλοι οι συντελεστές i_{ci} είναι παράμετροι του μοντέλου και πρέπει να υπολογιστούν από πειράματα.

Οι οργανικές ενώσεις υψηλού μοριακού βάρους, τα κολλοειδή ή η σωματιδιακή οργανική ύλη δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας από τους μικροοργανισμούς αλλά πρέπει να υποστούν εξωκυτταρική ενζυματική αντίδραση (υδρόλυση). Η διεργασία μετατροπής της αργά βιοδιασπάσιμης ύλης σε εύκολα βιοδιασπάσιμη (υδρόλυση) λέγεται διεργασία υδρόλυσης. Είναι αδιευκρίνιστο εάν τα προϊόντα της υδρόλυσης υπάρχουν στα λύματα ή εάν χρησιμοποιούνται κατευθείαν από τους μικροοργανισμούς που καταλύουν την υδρόλυση. Τυπικά, η διεργασία της υδρόλυσης θεωρείται επιφανειακή αντίδραση, η οποία συμβαίνει σε επαφή με τους μικροοργανισμούς που παρέχουν τα ένζυμα.

Πίνακας 3-3 Στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης (IWA, 2000)

Διεργασία	S_F	S_{NH4}	S_{PO4}	S_I	S_{ALK}	X_S	X_{TSS}
1. Αερόβια υδρόλυση	$1-f_{SI}$	$v_{1,NH4}$	$v_{1,PO4}$	f_{SI}	$v_{1,ALK}$	-1	$v_{1,TSS}$
2. Ανοξική υδρόλυση	$1-f_{SI}$	$v_{2,NH4}$	$v_{2,PO4}$	f_{SI}	$v_{2,ALK}$	-1	$v_{2,TSS}$
3. Αναερόβια υδρόλυση	$1-f_{SI}$	$v_{3,NH4}$	$v_{3,PO4}$	f_{SI}	$v_{3,ALK}$	-1	$v_{3,TSS}$

Υπάρχουν πειραματικά στοιχεία, εκ των οποίων προκύπτει ότι οι αντιδράσεις υδρόλυσης εξαρτώνται από τους διαθέσιμους δέκτες ηλεκτρονίων, και έτσι το ASM2 διαχωρίζει την υδρόλυση σε αερόβια, ανοξική και αναερόβια. Είναι, εντούτοις, ένας δύσκολος στόχος να υπολογιστούν οι σταθερές του ρυθμού της υδρόλυσης υπό διαφορετικούς όρους αποδεκτών ηλεκτρονίων.

Διεργασία 1: η αερόβια υδρόλυση του αργά βιοδιασπάσιμου υποστρώματος χαρακτηρίζει την υδρόλυση υπό αερόβιες συνθήκες ($S_{O_2} > 0$).

Διεργασία 2: η ανοξική υδρόλυση του αργά βιοδιασπάσιμου υποστρώματος χαρακτηρίζει την υδρόλυση υπό ανοξικές συνθήκες ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} > 0$). Αυτή η διεργασία είναι χαρακτηριστικά πιο αργή από την αερόβια υδρόλυση.

Διεργασία 3: η αναερόβια υδρόλυση του αργά βιοδιασπάσιμου υποστρώματος χαρακτηρίζει την υδρόλυση υπό αναερόβιες συνθήκες ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} \approx 0$). Αυτή η διεργασία δεν έχει μελετηθεί καλά και έτσι δεν υπάρχουν πληροφορίες για το τί συμβαίνει στην υδρόλυση κάτω από αναερόβιες συνθήκες, αλλά είναι πιθανώς πιο αργή από την αερόβια υδρόλυση.

Ο Πίνακας 3-3 συνοψίζει την στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης. Θεωρείται ότι με την υδρόλυση το αργά βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα X_S διασπάται σε εύκολα βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα S_F , ενώ απελευθερώνεται ένα μικρό κλάσμα f_{SI} αδρανούς οργανικού υλικού S_I . Οι στοιχειομετρικοί συντελεστές για το S_{NH_4} , S_{PO_4} και S_{ALK} μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση συνέχειας (σχέση 2). Αυτοί οι τρεις συντελεστές παίρνουν θετικές τιμές.

Οι προτεινόμενες εξισώσεις για τις διεργασίες υδρόλυσης 1-3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-9. Ο ρυθμός της υδρόλυσης είναι παρόμοιος με εκείνο του ASM1, χρησιμοποιείται η έννοια των διακοπών λειτουργίας (switching functions) για τα S_{O_2} και S_{NO_3} για να “ανοίγουν” και να “κλείνουν” οι κινητικές των διεργασιών ανάλογα με τις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η ταχύτητα της υδρόλυσης είναι σε πρώτη τάξη αναλογία με την ενεργή ετεροτροφική βιομάζα και αυξάνεται τείνοντας σε σταθερή μέγιστη τιμή όσο ο λόγος του προσροφημένου υλικού προς την προσροφούσα βιομάζα $[(X_S/X_H)/(K_X+(X_S/X_H))]$ αυξάνεται. Προτείνεται ότι μόνο οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί μπορούν να καταλύσουν την υδρόλυση και ότι κάτω από ανοξικές ή αναερόβιες συνθήκες (ζύμωση) ο ρυθμός της μειώνεται με τους διορθωτικούς συντελεστές n_{NO_3} και n_{FE} , για ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες αντίστοιχα.

Η υδρόλυση του σωματιδιακού βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου συμπεριλαμβάνεται ως ξεχωριστή διεργασία στο ASM1, αλλά όχι στο ASM2. Αυτή

η διεργασία είναι απαραίτητη εάν η περιεκτικότητα σε άζωτο του X_S μεταβάλλεται. Για την απλοποίηση του ASM2, θεωρείται ότι το X_S περιέχει σταθερή ποσότητα αζώτου i_{NXS} και φωσφόρου i_{PXS} . Χωρίς αυτήν την απλούστευση, θα απαιτούνταν στο μοντέλο έξι περισσότερες διεργασίες υδρόλυσης και δύο επιπλέον σωματιδιακά συστατικά.

Η διεργασία της αμμωνιοποίησης συμπεριλαμβάνεται στο ASM1 προκειμένου να περιγραφεί η μετατροπή του διαλυμένου οργανικού αζώτου σε αμμωνιακό άζωτο. Στο ASM2 θεωρείται ότι τα ζυμώσιμα υλικά, S_F , περιέχουν σταθερή ποσότητα αζώτου και φωσφόρου, i_{NSf} και i_{PSf} αντίστοιχα. Αυτό επιτρέπει να αγνοηθεί η διεργασία της αμμωνιοποίησης. Χωρίς την παραπάνω απλοποίηση, θα απαιτούνταν δύο επιπλέον διεργασίες (η αμμωνιοποίηση καθώς επίσης και η διεργασία δημιουργίας S_{PO4} από οργανικό φώσφορο), ενώ θα έπρεπε να εισαχθούν και δύο περισσότερα συστατικά, το διαλυτό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο και ο φώσφορος.

Πίνακας 3-4 Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης και αποσύνθεσης των ετεροτροφικών μ/ο (IWA, 2000)

Διεργασία	S_{O_2}	S_F	S_A	S_{NO_3}	X_I	X_S	X_H
4.Αερόβια ανάπτυξη με S_F	$1 - (1/Y_H)$	$- 1/Y_H$					1
5.Αερόβια ανάπτυξη με S_A	$1 - (1/Y_H)$		$-1/Y_H$				1
6.Ανοξική ανάπτυξη με S_F		$- 1/Y_H$		$-\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$	$\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$		1
7.Ανοξική ανάπτυξη με S_A			$-1/Y_H$	$-\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$	$\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$		1
8.Ζύμωση		-1	1				1
9.Λύση					f_{Xi}	$1-f_{Xi}$	-1

Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί X_H είναι υπεύθυνοι για την υδρόλυση του αργά βιοδιασπάσιμου υποστρώματος X_S , την αερόβια διάσπαση των ζυμώσιμων οργανικών υποστρωμάτων S_F και των προϊόντων S_A της ζύμωσης (αερόβια ανάπτυξη), την ανοξική αποδόμηση των S_F και S_A και απομάκρυνση των νιτρικών (απονιτροποίηση) και την αναερόβια ζύμωση των S_F σε S_A . Επιπλέον αυτοί οι οργανισμοί υπόκεινται σε αποσύνθεση και λύση. Η στοιχειομετρία και οι κινητικές των διεργασιών που περιγράφονται κατωτέρω παρουσιάζονται στους Πίνακες 3-4 και 3-9 αντίστοιχα.

Διεργασίες 4 και 5: Η αερόβια ανάπτυξη των ετεροτροφικών οργανισμών στα ζυμώσιμα υποστρώματα S_F και στα προϊόντα της ζύμωσης S_A προσομοιώνεται με δύο παράλληλες διεργασίες τέσσερα και πέντε, οι οποίες καταναλώνουν τα δύο διασπάσιμα οργανικά υποστρώματα S_F και S_A . Και για τις δυο διεργασίες χρησιμοποιούνται ίδιοι συντελεστές μετατροπής υποστρώματος σε βιομάζα Y_H και ρυθμοί ανάπτυξης μ_m . Ο ρυθμός των διεργασιών έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε ο

μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας να μην είναι μεγαλύτερος του μ_m , ακόμα και η συγκέντρωση του υποστρώματος, των S_F ή των S_A , είναι αρκετά υψηλή. Αυτές οι διεργασίες απαιτούν οξυγόνο, S_{O_2} , θρεπτικά συστατικά, S_{NH_4} και S_{PO_4} , και ενδεχομένως αλκαλικότητα, S_{ALK} , ενώ παράγουν αιωρούμενα στερεά X_{TSS} .

Διεργασίες 6 και 7: Η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών στα ζυμώσιμα υποστρώματα, S_F , και στα προϊόντα ζύμωσης, S_A , και η απονιτροποίηση προσομοιώνεται επίσης με δύο παράλληλες διεργασίες έξι και επτά. Αυτές οι δύο διεργασίες είναι παρόμοιες με τις αερόβιες διεργασίες ανάπτυξης, αλλά απαιτούν νιτρικό άζωτο S_{NO_3} , ως δέκτη ηλεκτρονίων και όχι το οξυγόνο. Η στοιχειομετρία για το νιτρικό άζωτο υπολογίζεται υποθέτοντας ότι όλο το νιτρικό άζωτο, S_{NO_3} , μετατρέπεται σε αέριο άζωτο S_{N_2} . Αναλυτικότερα, θεωρείται ότι τα S_F και S_A μειώνονται κατά $1/Y_H$, ενώ η αντίστοιχη απαίτηση σε οξυγόνο είναι $(1-Y_H)/(2,86*Y_H)$. Η απονιτροποίηση απελευθερώνει αλκαλικότητα, η στοιχειομετρία της οποίας παρουσιάζεται για την εξίσωση συνέχειας. Η απονιτροποίηση θεωρείται ότι αναχαιτίζεται από την παρουσία οξυγόνου ενώ ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης μ_m μειώνεται υπό αερόβιες συνθήκες, από τον συντελεστή n_{NO_3} , θεωρώντας ότι δεν απονιτροποιούν όλοι οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί X_H ή ότι ο ρυθμός απονιτροποίησης είναι χαμηλότερος.

Διεργασία 8: Η διεργασία της ζύμωσης προσομοιώνεται από την διεργασία οκτώ. Υπό αναερόβιες συνθήκες ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} \approx 0$), υποτίθεται ότι οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί είναι ικανοί να κάνουν ζύμωση, με την οποία τα εύκολα βιοδιασπάσιμα υποστρώματα S_F μετασχηματίζονται στα προϊόντα S_A . Παρόλο που αυτή η διεργασία μπορεί ενδεχομένως να προκαλέσει την αύξηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, εισάγεται στο μοντέλο ως μια απλή διεργασία μετασχηματισμού χωρίς ανάπτυξη. Μια διεργασία ανάπτυξης θα απαιτούσε πιο σύνθετες κινητικές και περισσότερες στοιχειομετρικές παραμέτρους και συντελεστές, που θα ήταν και δύσκολα υπολογίσιμες, και ενδεχομένως διαφορετικούς συντελεστές απόδοσης για τα S_F και S_A για τις διεργασίες 4-7. Η διεργασία της ζύμωσης απελευθερώνει αρνητικά φορτισμένα προϊόντα ζύμωσης, S_A , και επομένως έχει απαίτηση σε αλκαλικότητα. Αυτό προβλέπεται από την εξίσωση συνέχειας.

Η ζύμωση είναι μια διεργασία που, μέχρι σήμερα, δεν είναι απόλυτα γνωστή διεργασία και για την αξιόπιστη εφαρμογή της απαιτείται ακριβής χαρακτηρισμός των λυμάτων. Ελάχιστα είναι γνωστά για τις κινητικές αυτής της διεργασίας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ένα μεγάλο εύρος κινητικών παραμέτρων για τη μοντελοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Διεργασία 9: Η διεργασία της λύσης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών προσομοιώνεται από την διεργασία εννέα. Αυτή η διεργασία ενσωματώνει το άθροισμα όλων των διεργασιών φθοράς των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Έχει σχεδιαστεί σε αναλογία με το ASM1 και ο ρυθμός της είναι ανεξάρτητος από τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Πίνακας 3-5 Στοιχειομετρία των διεργασιών των πολυφωσφορικών βακτηριδίων (IWA, 2000)

Διεργασία	S_{O_2}	S_A	S_{PO_4}	X_I	X_S	X_{PAO}	X_{PP}	X_{PHA}
10. Αποθήκευση των X_{PHA}		-1	Y_{PO_4}				$-Y_{PO_4}$	1
11. Αποθήκευση των X_{PP}	$-Y_{PHA}$		-1				1	$-Y_{PHA}$
12. Αερόβια ανάπτυξη των X_{PAO}	$1-1/Y_H$		$-i_{PBM}$			1		$-1/Y_H$
13. Λύση των X_{PAO}			v_{13,PO_4}	f_{Xi}	$1-f_{Xi}$	-1		
14. Λύση των X_{PP}			1				-1	
15. Λύση των X_{PHA}								-1

Μερικοί μικροοργανισμοί, οι X_{PAO} στο μοντέλο ASM2, είναι γνωστοί για τη δυνατότητά τους να αποθηκεύουν στη μάζα τους φώσφορο υπό τη μορφή πολυφωσφορικών, X_{PP} . Έως αυτή την περίοδο, αυτοί οι οργανισμοί δεν έχουν χαρακτηριστεί και μελετηθεί καλά. Αρχικά θεωρήθηκε ότι όλοι αυτοί οι μικροοργανισμοί ανήκουν στο είδος *Acinetohacter*. Ωστόσο, σήμερα θεωρείται ότι το *Acinetohacter* συμβάλλει, αλλά δεν επικρατεί πάντα στις διεργασίες βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου.

Αρχικά θεωρείτο ότι τα πολυφωσφορικά βακτηρίδια, PAO, δεν θα μπορούσαν να απονιτροποιήσουν, τώρα όμως τα στοιχεία που έχουν συλλεγεί δείχνουν ότι μερικοί από αυτούς μπορούν να απονιτροποιήσουν. Η απελευθέρωση φωσφόρου είναι μερικές φορές πιο αργή, παρουσία του νιτρικών ιόντων και αυτή η παρατήρηση δεν προβλέπεται στο ASM2. Το γλυκογόνο αποδεικνύεται ότι είναι ένα σημαντικό υλικό αποθήκευσης των πολυφωσφορικών βακτηριδίων PAO, αλλά για απλοποίηση δεν χρησιμοποιείται στο ASM2. Όλοι αυτοί οι περιορισμοί οδηγούν στους περιορισμούς της δυνατότητας εφαρμογής του μοντέλου.

Όσο μεγαλύτερες προσπάθειες γίνονται για να χαρακτηριστούν οι PAO, τόσο πιο σύνθετη γίνεται αυτή η ομάδα μικροοργανισμών. Η εισαγωγή ενός πολύ λεπτομερούς μηχανιστικού μοντέλου για τις διεργασίες που είναι υπεύθυνες για τη βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου είναι πρόωρη. Έτσι έχει επιλεγεί ένα απλό μοντέλο, που να επιτρέπει την πρόβλεψη της βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου, αλλά δεν συμπεριλαμβάνει ακόμα όλα τα παρατηρημένα φαινόμενα. Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να είναι η βάση για περαιτέρω ανάπτυξη.

Το ακόλουθο μοντέλο για τη συμπεριφορά των πολυφωσφορικών βακτηριδίων, X_{PAO} , υποθέτει ότι αυτά τα βακτηρίδια δεν μπορούν να απονιτροποιήσουν και ότι μπορούν μόνο να αυξηθούν με τα εσωκυτταρικά αποθηκευμένα οργανικά υλικά, X_{PHA} . Και οι δύο αυτές υποθέσεις είναι πολύ αυστηροί περιορισμοί του μοντέλου ASM2 και μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω επεκτάσεις. Η στοιχειομετρία και οι κινητικές των διεργασιών που περιγράφονται κατωτέρω παρουσιάζονται στους Πίνακες 5 και 8 αντίστοιχα.

Διεργασία 10: Η διεργασία αποθήκευσης των X_{PHA} προσομοιώνεται από την διεργασία δέκα. Υποτίθεται λοιπόν ότι τα πολυφωσφορικά βακτηρίδια μπορούν να

απελευθερώσουν ορθοφωσφορικά από την υδρόλυση των πολυφωσφορικών X_{PP} , χρησιμοποιώντας την εκλυόμενη ενέργεια από την υδρόλυση των αποθηκευμένων πολυφωσφορικών για αποθήκευση των εξωκυτταρικών προϊόντων ζύμωσης S_A στη μορφή μόνο του ΡΗΑ. Η διεργασία αυτή, αρχικά, παρατηρήθηκε υπό αναερόβιες συνθήκες αλλά δεδομένου ότι τελευταία η διεργασία αυτή έχει αναφερθεί ότι συμβαίνει σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες, στην κινητική της διεργασίας δεν περιλαμβάνονται περιοριστικοί όροι για το οξυγόνο S_{O_2} και τα νιτρικά S_{NO_3} . Η πειραματική παρακολούθηση αυτής της διεργασίας είναι εύκολη εάν μετράται η απελευθέρωση του φωσφόρου παρά η αποθήκευση οργανικών.

Η εμπειρία δείχνει όμως ότι ο ρυθμός αποθήκευσης των οργανικών ουσιών είναι σχετικά σταθερός ενώ η απελευθέρωση του φωσφόρου ποικίλλει, δίνοντας έτσι μια μεταβλητή στοιχειομετρική σχέση. Η βάση για τη στοιχειομετρία της διεργασίας επομένως, επιλέχθηκε να είναι οι οργανικές ουσίες που λαμβάνονται, S_A , και αποθηκεύονται, X_{PHA} . Η αξιόπιστη εκτίμηση της σταθεράς του ρυθμού ανάπτυξης q_{PHA} και της στοιχειομετρικής παραμέτρου Y_{PO_4} απαιτεί την ανεξάρτητη μέτρηση της απομάκρυνσης του S_A και της απελευθέρωσης του S_P .

Διεργασία 11: Η διεργασία αποθήκευσης των ορθοφωσφορικών στη μορφή των εσωκυτταρικών πολυφωσφορικών προσομοιώνεται από την διεργασία 11. Η διεργασία αυτή χρειάζεται ενέργεια, η οποία κερδίζεται από την αναπνοή των αποθηκευμένων οργανικών X_{PHA} από τα πολυφωσφορικά βακτηρίδια X_{PAO} . Η επαναδημιουργία των πολυφωσφορικών είναι μια απαίτηση για την ανάπτυξη των ΡΑΟ, τα οποία αναπτύσσονται μόνο με κατανάλωση αποθηκευμένων οργανικών X_{PHA} . Η αποθήκευση των X_{PP} παρατηρείται ότι σταματάει εάν η περιεκτικότητα σε φώσφορο των ΡΑΟ γίνει πάρα πολύ υψηλή. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στην προσθήκη ενός αναχαιτιστικού όρου στο ρυθμό της διεργασίας, ο οποίος γίνεται ενεργός όταν ο λόγος X_{PP} / X_{PAO} πλησιάζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του K_{MAX} .

Διεργασία 12: Η διεργασία ανάπτυξης των πολυφωσφορικών βακτηριδίων προσομοιώνεται από την διεργασία 12. Αυτά τα βακτηρίδια θεωρείται ότι αναπτύσσονται μόνο με κατανάλωση των εσωκυτταρικών αποθηκευμένων οργανικών προϊόντων X_{PHA} . Δεδομένου ότι μόρια φωσφόρου απελευθερώνονται συνεχώς από τη λύση των X_{PP} , είναι δυνατό να υποτεθεί ότι τα βακτηρίδια καταναλώνουν ορθοφωσφορικά, S_{PO_4} , ως θρεπτική ουσία για την παραγωγή βιομάζας. Η ανάπτυξη των ΡΑΟ προσομοιώνεται ως μια υποχρεωτικά αερόβια διεργασία. Είναι γνωστό ότι οι ΡΑΟ μπορεί να αναπτυχθούν με κατανάλωση των διαλυτών υποστρωμάτων (π.χ. S_A), αλλά είναι απίθανο τέτοια υποστρώματα να είναι διαθέσιμα υπό αερόβιες συνθήκες σε εγκαταστάσεις βιολογικής απομάκρυνσης θρεπτικών. Γι' αυτό το λόγο στο μοντέλο δεν υπολογίζεται αυτή η παράμετρος.

Διεργασίες 13, 14 και 15: Οι διεργασίες λύσης των πολυφωσφορικών βακτηριδίων και των αποθηκευμένων προϊόντων τους προσομοιώνονται από τις διεργασίες 13, 14 και 15. Ο θάνατος, η ενδογενής αναπνοή και η συντήρηση των κυττάρων οδηγούν σε απώλεια ή αποσύνθεση όλων των κλασμάτων των ΡΑΟ. Δεδομένου ότι τα αποθηκευμένα προϊόντα X_{PP} και X_{PHA} υπολογίζονται ξεχωριστά

από τη βιομάζα των X_{PAO} , και τα τρία συστατικά θα έχουν ξεχωριστές διεργασίες αποσύνθεσης. Στο ASM2 οι διεργασίες αυτές είναι πρώτης τάξης. Εάν οι ρυθμοί και των τριών διεργασιών ήταν ίδιοι, η σύνθεση των μικροοργανισμών δεν θα άλλαζε λόγω της αποσύνθεσης. Υπάρχουν πειραματικά στοιχεία ότι τα X_{PP} αποσυντίθεται γρηγορότερα από τα X_{PAO} και X_{PHA} . Αυτό το επιπλέον έλλειμμα που δημιουργείται στα πολυφωσφορικά μπορεί να προβλεφθεί από την επιλογή ενός αυξημένου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης, b_{PP} , για τη λύση αυτού του συστατικού. Τα προϊόντα της λύσης θεωρείται ότι είναι ορθοφωσφορικά S_{PO4} και προϊόντα ζύμωσης S_A , ενώ κατά την λύση των PAO παράγονται και αδρανή οργανικά.

Πίνακας 3-6 Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης και αποσύνθεσης των αυτοτροφικών μ/ο (IWA, 2000)

Διεργασία	S_{O2}	S_{NH4}	S_{NO3}	S_{PO4}	X_I	X_S	X_{AUT}
16. Αποθήκευση των X_{PHA}	$-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$-i_{NBM}-(1/Y_A)$	$1/Y_A$	$-i_{PBM}$			1
17. Αποθήκευση των X_{PP}		$v_{17,NH4}$		$v_{17,PO4}$	f_{XI}	$1-f_{XI}$	-1

Η νιτροποίηση θεωρείται ότι είναι μια διεργασία ενός σταδίου. Αγνοείται η παραγωγή νιτρώδους αζώτου και θεωρείται ότι η αμμωνία S_{NH4} μετατρέπεται απευθείας σε νιτρικό άζωτο S_{NO3} . Το ενδιάμεσο συστατικό, νιτρώδες άζωτο, δεν συμπεριλαμβάνεται ως συστατικό του μοντέλου. Στα πλαίσια της νιτροποίησης, η προσομοίωση της παραγωγής και της κατανάλωσης νιτρώδους αζώτου θα ήταν σχετικά εύκολη. Εντούτοις, το νιτρώδες άζωτο επίσης παράγεται και καταναλώνεται στα πλαίσια της απονιτροποίησης, όπου η προσθήκη του στο μοντέλο θα αύξανε την πολυπλοκότητα του. Η προσομοίωση, όμως, του νιτρώδους αζώτου στη νιτροποίηση αλλά όχι στην απονιτροποίηση δεν θα ήταν συνεπής και θα μπορούσε να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις του μοντέλου.

Η στοιχειομετρία και οι κινητικές των διεργασιών που περιγράφονται κατωτέρω, παρουσιάζονται στους Πίνακες 3-6 και 3-9 αντίστοιχα.

Διεργασία 16: Η διεργασία της ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών προσομοιώνεται από την διεργασία 16. Οι νιτροποιητικοί οργανισμοί είναι υποχρεωτικά αερόβιοι, καταναλώνουν το αμμώνιο ως υπόστρωμα και ως θρεπτική ουσία, παράγουν νιτρικό άζωτο ενώ παράλληλα απαιτείται διαλυτός φώσφορος. Η νιτροποίηση μειώνει την αλκαλικότητα. Η διεργασία προσομοιώνεται όπως προτείνεται στο ASM1 με την εξαίρεση της πρόσληψης φωσφόρου στη βιομάζα.

Διεργασία 17: Η διεργασία της λύσης των νιτροποιητών προσομοιώνεται από την διεργασία 17. Η διεργασία της λύσης των νιτροποιητών διαμορφώνεται σε αναλογία με το ASM1 και με τη διεργασία της λύσης των ετεροτροφικών οργανισμών.

Δεδομένου ότι τα προϊόντα της λύσης (X_S και τελικά S_F) είναι διαθέσιμα υποστρώματα μόνο για τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς, η ενδογενής

αναπνοή των νιτροποιητών γίνεται φανερή σαν αυξανόμενη ανάπτυξη και κατανάλωση οξυγόνου από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Κατά τη λύση των νιτροποιητών, παράγονται επίσης και αδρανή οργανικά X_i .

Πίνακας 3-7 Στοιχειομετρία και κινητική των διεργασιών που περιγράφουν την ταυτόχρονη κατακρήμνιση του φωσφόρου (IWA, 2000)

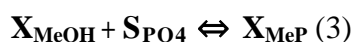
Διεργασία (στοιχειομετρία)	S_{PO4}	S_{ALK}	X_{MeOH}	X_{MeP}	X_{TSS}
18.Κατακρήμνιση	-1	$v_{19,ALK}$	-3.45	4.87	1.42
19.Επαναδιάλυση	1	$v_{20,ALK}$	3.45	-4.87	-1.42
Κινητικές	Ρυθμός διεργασιών ρ_j				
18.Κατακρήμνιση	$k_{PRE} * S_{PO4} * X_{MeOH}$		$k_{PRE} = 1m^3 \cdot 9gFe(OH)_3^{-1} \cdot d^{-1}$		
19.Επαναδιάλυση	$k_{RED} * X_{MeP}$		$K_{RED} = 0.6 \cdot d^{-1}$		

Στα συστήματα βιολογικής απομάκρυνσης θρεπτικών, τα μέταλλα, που είναι που υπάρχουν στα λύματα (π.χ. Ca^{2+}), μαζί με την υψηλή συγκέντρωση απελευθερωμένων διαλυτών ορθοφωσφορικών, S_{PO4} , μπορούν να οδηγήσουν στη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου (π.χ. με την μορφή φωσφορικού άλατος του ασβεστίου).

Περαιτέρω, η ταυτόχρονη κατακρήμνιση του φωσφόρου μέσω της προσθήκης των αλάτων σιδήρου ή αργιλίου είναι μια πολύ κοινή διεργασία για την απομάκρυνση φωσφόρου. Η ταυτόχρονη κατακρήμνιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου εάν η αναλογία άνθρακα φωσφόρου είναι δυσμενώς μικρή.

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι χαμηλές συγκεντρώσεις εκροής σε ορθοφωσφορικά, S_{PO4} , οι οποίες παρατηρούνται στην πράξη και που οφείλονται εν μέρει στη χημική κατακρήμνιση, στο μοντέλο προτείνεται ένα πολύ απλό πρότυπο καθίζησης, το οποίο μπορεί να βαθμονομηθεί για ποικίλες καταστάσεις. Για αυτόν το λόγο, δύο διεργασίες (κατακρήμνιση και επαναδιάλυση) και δύο περισσότερα συστατικά (X_{MeOH} και X_{MeP}) προστίθενται στο ASM2. Εάν η χημική κατακρήμνιση δεν μελετάται, αυτές οι προσθήκες μπορούν να διαγραφούν από το μοντέλο.

Διεργασία 18 και 19: Οι διεργασίες της κατακρήμνισης και της επαναδιάλυσης του φωσφόρου S_{PO4} προσομοιώνονται από τις διεργασίες 18 και 19. Το μοντέλο καθίζησης είναι βασισμένο στην υπόθεση ότι η κατακρήμνιση και η επαναδιάλυση είναι αντίστροφες διεργασίες, οι οποίες σε σταθερές συνθήκες θα ήταν σε ισορροπία σύμφωνα με την αντίδραση:



Η κατακρήμνιση και η επαναδιάλυση μπορούν να προσομοιωθούν με τους ακόλουθους ρυθμούς διεργασιών αντιστοίχως:

$$\rho_{18} = k_{PRE} \cdot S_{PO4} \cdot X_{MeOH} \quad (4)$$

$$\rho_{19} = k_{RED} \cdot X_{MeP} \quad (5)$$

Εάν οι δύο εργασίες είναι σε ισορροπία ($v_{18,i} \cdot \rho_{18} = v_{19,i} \cdot \rho_{19}$), τότε μπορεί να παραχθεί μία σταθερά ισορροπίας:

$$k_{eq} = \frac{v_{19,i} \cdot k_{RED}}{v_{18,i} \cdot k_{RPE}} = \frac{S_{PO4} \cdot X_{MeOH}}{X_{MeP}} \quad (6)$$

Οι διεργασίες 18 και 19 που εισάγονται είναι βασισμένες στην υπόθεση ότι τα X_{MeOH} και τα X_{MeP} αποτελούνται από υδροξείδιο του σιδήρου $Fe(OH)_3$ και φωσφορούχο σίδηρο, $FePO_4$, αντίστοιχα. Αυτό οδηγεί στη στοιχειομετρία που υποδεικνύεται στον Πίνακα 3-9. Οι υποδεικνυόμενοι ρυθμοί των διεργασιών οδηγούν σε συγκεντρώσεις ορθοφωσφορικών στο ίζημα οι οποίες σε σταθερές συνθήκες είναι χαρακτηριστικές της χημικής απομάκρυνσης με προσθήκη $FeCl_3$. Σε αυτήν την περίπτωση, η προσθήκη Fe^{3+} στην είσοδο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας μπορεί να προσομοιωθεί από την επιλογή X_{MeOH} στην στοιχειομετρία εισόδου με την προϋπόθεση ότι $1 \text{ g } Fe^{3+} \text{ m}^{-3}$ οδηγεί σε $1,91 \text{ g } Fe(OH)_3 \text{ m}^{-3} = 1,91 \text{ g } MeOH \text{ m}^{-3}$ (που αυξάνει επίσης τα X_{TSS} εισόδου και μειώνει την αλκαλικότητα).

Πίνακας 3-8 Διεργασίες, κινητικές και στοιχειομετρία μοντέλου ASM2 (IWA, 2000)

Διεργασίες	S _{O2}	S _F	S _A	S _{NH4}	S _{NO3}	S _{PO4}	S _I	S _{ALK}	S _{N2}	X _I	X _S	X _H	X _{PAO}	X _{PP}	X _{PHA}	X _{AUT}	X _{TSS}	X _{MeOH}	X _{MeP}
1		1.00		0.01			0.00	0.001			-1.00						-0.75		
2		1.00		0.01			0.00	0.001			-1.00						-0.75		
3		1.00		0.01			0.00	0.001			-1.00						-0.75		
4	-0.59	-1.59		-0.022		-0.004		-0.001				1.00					0.90		
5	-0.59		-1.59	-0.070		-0.02		0.021				1.00					0.90		
6		-1.59		-0.022	-0.21	-0.004		0.014	0.21			1.00					0.90		
7			-1.59	-0.070	-0.21	-0.02		0.036	0.21			1.00					0.90		
8		-1.00	1.00	0.030		0.01		0.014											
9				0.031		0.01		0.002		0.10	0.90	-1.00					-0.15		
10			-1.00			0.40		-0.004						-0.40	1.00		-0.69		
11	-0.20					-1.00		0.048						1.00	-0.20		3.11		
12	-0.60			-0.070		-0.02		-0.004					1.00		-1.60		-0.06		
13				0.031		0.01		0.002		0.10	0.90		-1.00				-0.15		
14						1.00		-0.048						-1.00			-3.23		
15			1.00					-0.016							-1.00		-0.60		
16	-18.00			-4.240	4.17	-0.02		-0.600								1.00	0.90		
17				0.031		0.01		0.002		0.10	0.90					-1.00	-0.15		
18						-1.00			0.048								1.42	-4.45	4.87
19						1.00			-0.048								-1.42	3.45	-4.87

Πίνακας 3-9 Διεργασίες και ρυθμοί διεργασιών του μοντέλου προσομοίωσης ASM2 (IWA, 2000)

Διεργασία	Ρυθμός ρ
Διεργασίες υδρόλυσης	
1.Αερόβια υδρόλυση	$K_h * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2}} * \frac{X_S/X_H}{X_S/X_H + K_X} * X_H$
2.Ανοξική υδρόλυση	$K_h * n_{NO_3} * \frac{K_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2}} * \frac{S_{NO_3}}{S_{NO_3} + K_{NO_3}} * \frac{X_S/X_H}{X_S/X_H + K_X} * X_H$
3.Αναερόβια υδρόλυση	$K_h * n_{fe} * \frac{K_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2}} * \frac{S_{NO_3}}{S_{NO_3} + K_{NO_3}} * \frac{X_S/X_H}{X_S/X_H + K_X} * X_H$
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί X _H	
4.Ανάπτυξη με S _F	$\mu_H * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_F}{K_F + S_F} * \frac{S_F}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_H$
5.Ανάπτυξη με S _A	$\mu_H * \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_A}{K_A + S_A} * \frac{S_A}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_H$
6.Απονιτροποίηση με S _F	$\mu_H * n_{NO_3} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_F}{K_F + S_F} * \frac{S_F}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_H$
7.Απονιτροποίηση με S _A	$\mu_H * n_{NO_3} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_A}{K_A + S_A} * \frac{S_A}{S_F + S_A} * \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} * \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_H$
8.Ζύμωση	$a_{fe} * \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} * \frac{S_F}{K_{fe} + S_F} * \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} * \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} * X_H$

9.Λύση	$b_H * X_H$
Πολυφωσφορικά βακτηρίδια X_{PAO}	
10.Αποθήκευση των X_{PHA}	$q_{PHA} * \frac{S_A}{S_A + K_A} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{X_{PP}/X_{PAO} + K_{PP}} * X_{PAO}$
11.Αποθήκευση των X_{PP}	$q_{PP} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2}} * \frac{S_{PO_4}}{S_{PO_4} + K_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * \frac{X_{PH_4}/X_{PAO}}{X_{PH_4}/X_{PAO} + K_{PH_4}} * \frac{K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}}{K_{MAX} + K_{IPP} - X_{PP}/X_{PAO}} * X_{PAO}$
12.Αερόβια ανάπτυξη με X_{PHA}	$\mu_{PAO} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2}} * \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4}} * \frac{S_{PO_4}}{S_{PO_4} + K_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * \frac{X_{PH_4}/X_{PAO}}{X_{PH_4}/X_{PAO} + K_{PH_4}} * X_{PAO}$
13.Λύση των X_{PAO}	$b_{PAO} * X_{PAO} * S_{ALK}/(K_{ALK} + S_{ALK})$
14.Λύση των X_{PP}	$b_{PP} * X_{PP} * S_{ALK}/(K_{ALK} + S_{ALK})$
15.Λύση των X_{PHA}	$b_{PHA} * X_{PHA} * S_{ALK}/(K_{ALK} + S_{ALK})$
Νιτροποιητικοί μικροοργανισμοί X_{AUT}	
16.Ανάπτυξη	$\mu_{AUT} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2}} * \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4}} * \frac{S_{PO_4}}{S_{PO_4} + K_{PO_4}} * \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + K_{ALK}} * X_{AUT}$
17.Λύση	$b_{AUT} * X_{AUT}$
Κατακρήμνιση φωσφόρου με προσθήκη $Fe(OH)_3$	
18.Κατακρήμνιση	$k_{PRE} * S_{O_4P} * S_{MeOH}$
19.Επαναδιάλυση	$k_{RED} * X_{MeP} * S_{ALK}/(K_{ALK} + S_{ALK})$

3.3 Τα μοντέλα ASM3 και ASM2d

Το μοντέλο ASM3 αναπτύχθηκε το 1999 με σκοπό την βιολογική απομάκρυνση του αζώτου σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, όπως και το ASM1. Το ASM3 υπάρχει η πρόθεση να γίνει το νέο μοντέλο αναφοράς, διορθώνοντας ορισμένες ατέλειες οι οποίες είχαν εμφανιστεί στο ASM1 (Κρομμυδάς Δημήτριος, 2005). Η βασική διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα είναι ότι στο ASM3, σε αντίθεση με τον πρόγονό του, αναγνωρίζεται ότι το κύτταρο των ετερότροφων βακτηρίων έχει εσωτερική δομή (Gernaey et al, 2003). Μια δεύτερη διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα είναι ότι στο ASM3 γίνεται πιο εύκολα βαθμονόμηση των τιμών των παραμέτρων του. Το ASM3 βρίσκει εφαρμογή και περιγράφει καλύτερα συστήματα όπου γίνεται επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων ή σε μονάδες με μεγάλο πλήθος αναερόβιων ζωνών (Gernaey et al, 2003).

Το μοντέλο ASM2, το οποίο αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, περιγράφει κατά ένα μεγάλο ποσοστό την βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου. Δεν αναφέρεται όμως, στην ικανότητα των βακτηρίων, που έχουν τη δυνατότητα να συσσωρεύουν και να αποθηκεύουν τον φώσφορο στο μόριό τους (Phosphate Accumulating Organisms, PAO), να πραγματοποιούν και απονιτροποίηση (Κρομμυδάς Δημήτριος, 2005). Αυτό ακριβώς το γεγονός συμπεριλαμβάνεται στο ASM2d, με την εισαγωγή των κατάλληλων διεργασιών στη δομή του (Gernaey et al, 2003).

4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ GPS-X

Το GPS-X είναι ένα πρόγραμμα λογισμικού που σχεδιάστηκε συγκεκριμένα για το σχεδιασμό και την προσομοίωση της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Η κεντρική ενότητα του GPS-X είναι η προσομοίωση, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε σταθερές είτε σε δυναμικές συνθήκες. Η δυναμική προσομοίωση δεν είχε ευρεία εφαρμογή για πολλές δεκαετίες διότι για την πραγματοποίησή της ήταν αναγκαία η εξεύρεση επακριβούς λύσης για μια σειρά από διαφορικές εξισώσεις. Το GPS-X, χρησιμοποιεί όλη τη διαθέσιμη τεχνολογία των υπολογιστών και ενσωματώνει όλες τις προχωρημένες τεχνολογίες διεργασιών επεξεργασίας αποβλήτων, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη να εξετάσει τις πολύπλοκες σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων μονάδων επεξεργασίας μίας εγκατάστασης ακόμη και σε δυναμικές συνθήκες. Η κατανόηση αυτών των σχέσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό, την λειτουργία και τον έλεγχο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (Hydromantis Inc., 1999).



Εικόνα 4-1 Αρχικό παράθυρο του λογισμικού GPS-X

4.1 Βιβλιοθήκες προγράμματος

Στο GPS-X οι μεταβλητές χωρίζονται σε σταθερές (state variables) και δευτερογενείς ή σύνθετες (composite variables). Οι σταθερές μεταβλητές είναι οι σημαντικότερες, καθώς προσδιορίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος των εξισώσεων του μοντέλου. Κάποιες σταθερές μεταβλητές, για παράδειγμα, είναι οι ετεροτροφικοί και αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί, το διαλυμένο οξυγόνο και το αμμωνιακό και νιτρικό άζωτο. Οι σύνθετες μεταβλητές από την άλλη υπολογίζονται από τις σταθερές μεταβλητές και συνεπώς εξαρτώνται από αυτές. Η εξέτασή τους είναι πολύ σημαντική καθώς αυτές μετρώνται συνήθως σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Σύνθετες μεταβλητές, για παράδειγμα, είναι τα ολικά αιωρούμενα στερεά και το ολικό άζωτο.

Ένα σετ σταθερών και σύνθετων μεταβλητών ορίζει μία βιβλιοθήκη του προγράμματος. Οι βιβλιοθήκες στο GPS-X αποτελούνται από διαφορετικό αριθμό σταθερών μεταβλητών, ενώ όλες περιέχουν 15 σύνθετες μεταβλητές, μεταβλητές δηλαδή που προκύπτουν μέσω κλασμάτων από τις βασικές μεταβλητές όπως διαλυτό, σωματιδιακό και ολικό BOD₅, COD, TKN και TSS. Οι διαθέσιμες βιβλιοθήκες του GPS-X είναι οι ακόλουθες:

- **CN:** Βιβλιοθήκη Άνθρακα-Αζώτου (12 σταθερές, 15 σύνθετες μεταβλητές). Προσομοιώνει την απομάκρυνση BOD και COD, την νιτροποίηση και την απονιτροποίηση για όλες τις διαθέσιμες διεργασίες.
- **CNP:** Βιβλιοθήκη Άνθρακα-Αζώτου-Φωσφόρου (17 σταθερές, 15 σύνθετες μεταβλητές). Προσομοιώνει την απομάκρυνση BOD και COD, την νιτροποίηση, την απονιτροποίηση και την βιολογική και χημική απομάκρυνση φωσφόρου για όλες τις διαθέσιμες διεργασίες.
- **CN2:** Προχωρημένη βιβλιοθήκη Άνθρακα - Αζώτου (19 σταθερές, 15 σύνθετες μεταβλητές). Προσομοιώνει τις ίδιες διεργασίες με την βιβλιοθήκη CN αλλά με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα ακόλουθα: νιτρικό και νιτρώδες άζωτο ξεχωριστά, τα πτητικά οξέα και την αλκαλικότητα.
- **IP:** Βιβλιοθήκη βιομηχανικών ρυπαντών (22 σταθερές, 15 σύνθετες μεταβλητές). Ίδια βιβλιοθήκη με την CN, εκτός του ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό μοντέλων συγκεκριμένων βιομηχανικών συστατικών όπως των φαινολών.
- **CN2IP:** Βιβλιοθήκη προχωρημένων βιομηχανικών ρυπαντών (29 σταθερές, 15 σύνθετες μεταβλητές). Ίδια βιβλιοθήκη με την IP, με την διαφορά ότι περιέχει όλες τις διεργασίες και μεταβλητές της βιβλιοθήκης CN2 αντί της CN, και μόνο 10 πρόσθετες βιομηχανικές μεταβλητές.
- **OPEN:** Ανοικτή βιβλιοθήκη (15 σταθερές μεταβλητές). Για σχεδιασμό μοντέλων εκτός της επεξεργασίας λυμάτων.

Με τις πρώτες τρεις βιβλιοθήκες ο χρήστης μπορεί να προσομοιώσει την επεξεργασία αστικών λυμάτων ενώ οι υπόλοιπες τρεις βιβλιοθήκες είναι χρήσιμες σε περιπτώσεις επεξεργασίας υγρών βιομηχανικών αποβλήτων.

Στο GPS-X οι σταθερές μεταβλητές είναι κοινές σε κάθε μοντέλο της ίδιας βιβλιοθήκης. Εφόσον αυτές είναι οι ουσιώδεις μεταβλητές, το GPS-X παρέχει μια αξιόπιστη βάση για τον συνδυασμό των μοντέλων των διαφορετικών τμημάτων της εγκατάστασης. Όλα τα μοντέλα σε μια βιβλιοθήκη περιέχουν εκφράσεις για κάθε σταθερή μεταβλητή. Οι τιμές των μεταβλητών αυτών είναι σημαντικές στα σημεία εισόδου και εξόδου κάθε μονάδας, διότι σε αυτά τα σημεία η παροχή από και προς κάθε άλλη μονάδα τερματίζει.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα χαρακτηριστικά των λυμάτων που εμπεριέχονται σε κάθε βιβλιοθήκη.

Πίνακας 4-1 Χαρακτηριστικά λυμάτων σε κάθε βιβλιοθήκη (Hydromantis Inc., 1999)

Χαρακτηριστικά λυμάτων	CN	CNP	IP	Adv.CN	Adv. IP	OPEN
Διαλυμένο οξυγόνο	✓	✓	✓	✓	✓	
Σωματιδιακά αδρανή	✓	✓	✓	✓	✓	
Διαλυτά αδρανή	✓	✓	✓	✓	✓	
Αργά βιοδιασπάσιμο οργανικό υλικό	✓	✓	✓	✓	✓	
Διαλυτό υδρολύσιμο οργανικό υλικό				✓	✓	
Ταχέως βιοδιασπάσιμο οργανικό υλικό	✓	✓	✓	✓	✓	
Διαλυτά προϊόντα ζύμωσης		✓				
Πτητικά οξέα (VFA)		✓				
Μη πτητικά αδρανή στερεά (ash)				✓	✓	
Προϊόντα αποσύνθεσης βακτηρίων	✓	✓	✓	✓	✓	
Εσωκυτταρικά αποθηκευμένα υλικά	✓					
Αποθηκευμένο γλυκογόνο		✓				
Σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο	✓	✓	✓	✓	✓	
Διαλυτό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο	✓	✓	✓	✓	✓	
Αμμώνιο και αμμωνία	✓	✓	✓	✓	✓	
Νιτρικό και νιτρώδες άζωτο	✓	✓	✓			
Νιτρώδες άζωτο				✓	✓	
Νιτρικό άζωτο				✓	✓	
Αέριο άζωτο	✓	✓				
Σωματιδιακό αδρανές άζωτο				✓	✓	
Διαλυτό αδρανές άζωτο		✓		✓	✓	

Χαρακτηριστικά λυμάτων	CN	CNP	IP	Adv.CN	Adv. IP	OPEN
Διαλυτός φώσφορος		✓				
Πολυ-υδροξυ-αλκανοειδή (PHA)		✓				
Αποθηκευμένα πολυφωσφορικά		✓				
Αποθηκ. πολυφωσφορ. (προς απελευθέρωση)		✓				
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί	✓	✓	✓	✓	✓	
Αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί	✓	✓	✓			
Νιτροσομονάδες				✓	✓	
Μικροοργ. που οξειδώνουν το νιτρώδες άζωτο				✓	✓	
Πολυφωσφορικά βακτηρίδια (PAO)		✓				
Υδροξείδια μετάλλων		✓				
Φωσφορικά μέταλλα (MePO ₄)		✓				
Αλκαλικότητα	✓	✓		✓	✓	
10 οριζόμενες μεταβλητές					✓	
15 οριζόμενες μεταβλητές						✓
30 οριζόμενες μεταβλητές			✓			

4.2 Μοντέλα εισαγωγής δεδομένων εισόδου

Τα μοντέλα εισαγωγής των δεδομένων εισόδου, που είναι διαθέσιμα στο GPS-X εξαρτώνται από τη βιβλιοθήκη που έχει επιλεγθεί για την προσομοίωση του εκάστοτε συστήματος. Παρόλο που τα ονόματα των μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε όλες τις βιβλιοθήκες είναι τα ίδια, με σκοπό να διαφάνεται η κοινή βάση των μεταβλητών εισόδου, ο τρόπος με τον οποίο οι σταθερές αυτές μεταβλητές υπολογίζονται διαφέρει. Ωστόσο στα μοντέλα της κάθε βιβλιοθήκης, η οποιαδήποτε επιλογή αφορά μόνο τον τύπο της απαιτούμενης πληροφορίας στην είσοδο και όχι το τελικό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα διαθέσιμα μοντέλα εισαγωγής δεδομένων στην βιβλιοθήκη CNP, στην οποία έγιναν και οι διάφορες αναλύσεις που θα περιγραφούν στο επόμενο κεφάλαιο (Hydromantis Inc., 1999):

- **States model:** Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο μόνο εάν υπάρχει πλήρης χαρακτηρισμός των λυμάτων και έχουν υπολογιστεί πειραματικά οι σταθερές μεταβλητές. Εάν ο χρήστης δηλαδή επιλέξει αυτό το μοντέλο, τότε θα πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμες τιμές για τις σταθερές μεταβλητές του πίνακα 1, όπως και τιμές για τους στοιχειομετρικούς συντελεστές που απαιτούνται για τον υπολογισμό των σύνθετων μεταβλητών.

- **Bod model:** Το μοντέλο του BOD θα πρέπει να χρησιμοποιείται όταν δεν είναι διαθέσιμες μετρήσεις του COD. Εξαιτίας των προσεγγίσεων και της φύσης των μετρήσεων του BOD, ειδική προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην σωστή εκτίμηση των σωματιδιακών αδρανών στην είσοδο. Εάν επιλεγεί το συγκεκριμένο μοντέλο, τότε ο χρήστης πρέπει να εισάγει ως δεδομένα το BOD, το TKN, τα SS, το διαλυτό φώσφορο και αρκετές στοιχειομετρικές παραμέτρους, απαραίτητες για να υπολογιστούν οι αναγκαίες σταθερές μεταβλητές. Επιπλέον χρειάζονται κάποιες πρόσθετες μεταβλητές όπως τα διαλυτά αδρανή οργανικά, η ετεροτροφική, αυτοτροφική και πολυφωσφορική βιομάζα, τα αδρανή υπολείμματα φθοράς της βιομάζας, τα εσωκυτταρικά αποθηκευμένα προϊόντα, τοPHA, τα αποθηκευμένα πολυφωσφορικά, τα ζυμώσιμα προϊόντα, το διαλυμένο οξυγόνο, τα νιτρικά και η αλκαλικότητα. Οι τιμές όλων των τελευταίων είναι συνήθως μηδέν, εκτός από τα διαλυτά αδρανή οργανικά και την αλκαλικότητα.
- **Cod model:** Το μοντέλο codbased είναι κατάλληλο εάν είναι διαθέσιμες μετρήσεις του COD στην είσοδο και αν οι ξεχωριστές συνιστώσες (π.χ. τα αδρανή) των λυμάτων είναι σχετικά σταθερές σε σχέση με το ολικό COD. Εάν επιλεγεί το συγκεκριμένο μοντέλο, τότε ο χρήστης πρέπει να εισάγει ως δεδομένα το COD στην είσοδο, το TKN, τα SS, το διαλυτό φώσφορο και αρκετές στοιχειομετρικές παραμέτρους, απαραίτητες για να υπολογιστούν οι αναγκαίες σταθερές μεταβλητές.
- **ASM2 model:** Το μοντέλο ASM2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς εάν η είσοδος χαρακτηρίζεται με βάση το COD και τα αιωρούμενα στερεά σαν κύριες συνιστώσες. Αναπτύχθηκε από την ομάδα εργασίας της IAWQ (Henze et al, 1994). Εάν επιλεγεί το συγκεκριμένο μοντέλο, τότε ο χρήστης πρέπει να εισάγει ως δεδομένα το COD στην είσοδο, το TKN, τα SS και αρκετές στοιχειομετρικές παραμέτρους, απαραίτητες για να υπολογιστούν οι αναγκαίες σταθερές μεταβλητές. Κάποιες επιπλέον σταθερές μεταβλητές μπορούν να καθοριστούν αλλά συνήθως έχουν πολύ μικρές τιμές και μπορούν να αγνοηθούν.
- **Cod – Bod model:** Το μοντέλο codbod χρησιμοποιεί το COD, το BOD₅ και τα SS ως κύριες συνιστώσες του για το χαρακτηρισμό της εισόδου. Για την αποφυγή προβλημάτων που συχνά εμφανίζονται κατά το χαρακτηρισμό των λυμάτων (π.χ. πολύ χαμηλά χ), το μοντέλο δίνει έμφαση στις μετρήσεις του COD. Τα SS χρησιμοποιούνται μόνο για τον υπολογισμό των VSS και μέσω του icv (XCOD/VSS) να υπολογίζεται το XCOD ενώ το BOD₅ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του fbod (BOD₅/BOD₂₀). Εάν επιλεγεί το συγκεκριμένο μοντέλο, τότε ο χρήστης πρέπει να εισάγει ως δεδομένα το COD στην είσοδο, το TKN, τα SS και αρκετές στοιχειομετρικές παραμέτρους, απαραίτητες για να υπολογιστούν οι αναγκαίες σταθερές μεταβλητές. Κάποιες επιπλέον σταθερές μεταβλητές μπορούν να καθοριστούν αλλά συνήθως έχουν πολύ μικρές τιμές και μπορούν να αγνοηθούν.

4.3 Μοντέλα ενεργού ιλύος

Όπως και με τα μοντέλα εισαγωγής των δεδομένων εισόδου, τα μοντέλα ενεργού ιλύος που είναι διαθέσιμα στο GPS-X εξαρτώνται από τη βιβλιοθήκη που έχει επιλεγεί για την προσομοίωση του εκάστοτε συστήματος. Παρακάτω ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των διαθέσιμων μοντέλων στην βιβλιοθήκη CNP:

- **Activated Sludge Model No 1:** Παρόλο που το συγκεκριμένο μοντέλο είναι διαθέσιμο στην βιβλιοθήκη CNP, δεν έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει την βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου, ωστόσο μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τις υπόλοιπες διεργασίες. Βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο ASM1 της IAWQ, όπως αυτό περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.
- **Mantis Model:** Ομοίως με το παραπάνω μοντέλο, το μοντέλο mantis δεν έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει την βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου, ωστόσο μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τις υπόλοιπες διεργασίες.
- **Activated Sludge Model No 2:** Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο ASM2 της IAWQ, όπως αυτό περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.
- **Activated Sludge Model No 2d:** Βελτιωμένη έκδοση του ASM2, η οποία εισήχθη λόγω της απονιτροποίησης που πραγματοποιούν τα poly-P βακτήρια, που μέχρι τότε δεν είχε μαθηματικοποιηθεί. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με την προσθήκη δύο επιπλέον διεργασιών στο ASM2, οδηγώντας έτσι στο ASM2d. Οι διεργασίες αυτές είναι η αποθήκευση πολυφωσφορικών και η ανάπτυξη των poly-P υπό ανοξικές συνθήκες.
- **General Model:** Το μοντέλο General αναπτύχθηκε από τον Dold (Hydromantis Inc., 1999), βασιζόμενο σε ένα συνδυασμό του ASM1 (Henze et al, 1987) και στο μοντέλο του Wentzel et. al. (Wentel et al, 1989) για τους πολυφωσφορικούς μικροοργανισμούς (Barker and Dold, 1997). Για τον σωστό συνδυασμό των παραπάνω μοντέλων, ειδικές τροποποιήσεις και προεκτάσεις ενσωματώθηκαν στις συνιστώσες και των δύο μοντέλων. Το μοντέλο που προέκυψε ονομάστηκε general διότι μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας στην προσομοίωση αερόβιων, ανοξικών-αερόβιων ή αναερόβιων-ανοξικών-αερόβιων συστημάτων παρουσιάζοντας την κατάλληλη ισορροπία μαζών μεταξύ των τριών ειδών μικροοργανισμών, των πολυφωσφορικών και μη πολυφωσφορικών ετεροτροφικών και των αυτοτροφικών.
- **New General Model:** Το New General Model (Barker and Dold, 1997) αποτελεί βελτίωση του General Model. Είναι πολυπλοκότερο σε αυτή τη νέα του μορφή, αφού κατά πρώτον περιγράφει με περισσότερες διεργασίες το κάθε σύστημα και έπειτα η στοιχειομετρία του είναι βασισμένη σε περισσότερο ακριβή πειραματικά δεδομένα, γεγονός που ίσως δίνει τη δυνατότητα καλύτερης περιγραφής της πραγματικότητας.

4.4 Μοντέλα καθίζησης

Στο GPS-X τα μοντέλα καθίζησης διαχωρίζονται σε μονοδιάστατα ή διδιάστατα και μπορούν να λαμβάνουν υπόψη βιολογικές αντιδράσεις ή όχι (reactive ή no-reactive). Ειδικότερα τα διαθέσιμα μοντέλα είναι (Hydromantis Inc., 1999):

- ◆ Μονοδιάστατα, χωρίς αντιδράσεις: noreact 1d, simple 1d.
- ◆ Μονοδιάστατα, με αντιδράσεις: asm2 1d, general 1d, mantis 1d.
- ◆ Διδιάστατα, χωρίς αντιδράσεις: simple 2d.
- ◆ Διδιάστατα, με αντιδράσεις: asm2 2d, general 2d.

Η ονοματολογία των μοντέλων καθίζησης που περιλαμβάνουν βιολογικές αντιδράσεις, βασίζεται στο όνομα του μοντέλου αιωρούμενης ανάπτυξης που χρησιμοποιείται για να περιγράψει αυτές τις βιολογικές αντιδράσεις. Για παράδειγμα το asm2 1d χρησιμοποιεί το μοντέλο asm2.

Στα μονοδιάστατα μοντέλα η δεξαμενή καθίζησης χωρίζεται σε ένα αριθμό από επίπεδα (συνήθως 10) σταθερής συγκέντρωσης το καθένα. Για τη διεκπεραίωση του μοντέλου γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

1. Τα εισερχόμενα στερεά διανέμονται στιγμιαία και ομοιόμορφα κατά μήκος ολόκληρου του επιπέδου.
2. Θεωρείται ότι πραγματοποιείται μόνο κατακόρυφη ροή.

Τα μοντέλα βασίζονται στη θεωρία της ροής στερεών όπου για κάθε επίπεδο παριστάνεται μια εξίσωση ισορροπίας μάζας, που προσομοιώνει την κατανομή των στερεών κατά μήκος της καθίζησης υπό σταθερές και δυναμικές συνθήκες.

Τα διδιάστατα μοντέλα καθίζησης συνδυάζουν τη συνιστώσα της ροής στερεών που χρησιμοποιείται στα μονοδιάστατα μοντέλα σε μια σειρά από χωρία ροής. Η ροή στα χωρία αυτά μπορεί να χαρακτηριστεί ιδανική (ideal flow), μπορεί να προσεγγιστεί με μια εξίσωση Laplace (online Laplacian) ή μπορεί να υπολογιστεί εκτός του GPS-X χρησιμοποιώντας ένα οποιοδήποτε υπολογιστικό πακέτο δυναμικής ροής και να παρέχονται να δεδομένα που θα προκύπτουν σαν ένα αρχείο δεδομένων (from data file).

Το μοντέλο περιλαμβάνει κάναβο 100 κελιών (10 κάθετων και 10 οριζόντιων) μεταξύ των οποίων υπολογίζονται οι ισορροπίες μάζας. Η διαφορά με τα μονοδιάστατα μοντέλα είναι ότι τώρα θεωρείται εκτός από κάθετη και οριζόντια ροή σε κάθε κελί. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα κελιά είναι ίσου μεγέθους, το οποίο υπολογίζει το GPS-X ανάλογα με τις διαστάσεις της δεξαμενής. Το ποσοστό ροής που μπαίνει και βγαίνει από κάθε κελί υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ταχύτητα ροής με την ορθογωνική επιφάνεια.

Το πλεονέκτημα των διδιάστατων μοντέλων σε σχέση με τα μονοδιάστατα είναι ότι κατά τη διάρκεια παροδικών φορτίσεων, τα διδιάστατα μοντέλα παρουσιάζουν καλύτερα τη μέγιστη συγκέντρωση στερεών στην εκροή. Επίσης, δίδεται η δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού του ύψους του στρώματος λάσπης κατά μήκος

της δεξαμενής ενώ με μονοδιάστατο μοντέλο παρουσιάζεται ένα μέσο ύψος κατά μήκος ολόκληρης της δεξαμενής.

4.5 Ενότητες προγράμματος

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι επιμέρους ενότητες του προγράμματος GPS-X, που σχεδιάστηκε συγκεκριμένα για το σχεδιασμό και την προσομοίωση της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων χρησιμοποιώντας όλη τη διαθέσιμη τεχνολογία των υπολογιστών και ενσωματώνοντας όλες τις προχωρημένες τεχνολογίες διεργασιών επεξεργασίας λυμάτων.

4.5.1 Προσομοίωση

Ο προσομοιωτής είναι η βάση όλων των χαρακτηριστικών εφαρμογών σχεδίασης και προσομοίωσης που βρίσκονται στο GPS-X. Μέσω αυτού επιτυγχάνεται η προσομοίωση περισσότερων από 50 πρότυπων εγκαταστάσεων που περιλαμβάνονται με το GPS-X, καθώς επίσης και τα σχεδιασμένα μοντέλα του χρήστη.

Στο GPS-X όταν τοποθετείται ένα εικονίδιο στο κεντρικό παράθυρο επιλογών και καθορίζεται το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση, αυτόματα αυτό <<διαβάζεται>> από την βιβλιοθήκη στην οποία περιέχεται. Κατόπιν, αφού καθοριστεί η σύνδεση μεταξύ των διαφόρων αντικειμένων, το GPS-X συνδέει όλα τα μοντέλα μεταξύ τους και δημιουργεί ένα δυναμικό μοντέλο ολόκληρου του συστήματος που επιλέχθηκε, εγκαθιστώντας εξισώσεις ισορροπίας μαζών για κάθε σταθερή μεταβλητή. Έπειτα ο χρήστης καθορίζει όλα τα δεδομένα εισαγωγής των μεταβλητών και παραμέτρων των μοντέλων (μπορούν να επιλεγούν και οι προκαθορισμένες τιμές του κάθε μοντέλου που παρέχει αυτόματα το GPS-X). Τελικό βήμα πριν την προσομοίωση είναι η μετάφραση του συστήματος σε έναν κώδικα και η δημιουργία προγράμματος που θα εκτελέσει τους υπολογισμούς.

Αναλυτικότερα, η παραπάνω διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά τη μετάφραση μέσω ενός ειδικού προγράμματος του GPS-X (GPS-X translator), γράφονται οι εξισώσεις ισορροπίας μάζας για κάθε μονάδα/αντικείμενο ανάλογα με τη σύνδεση μεταξύ τους και έπειτα μεταφράζονται στη γλώσσα προγραμματισμού Advanced Continuous Simulation Language (ACSL). Η ACSL είναι το πρόγραμμα προσομοίωσης, το οποίο χειρίζεται τις λεπτομέρειες της αριθμητικής ολοκλήρωσης. Ακολουθεί μέσω του compilation η μετάφραση σε έναν κώδικα – αντικείμενο και τέλος η μετατροπή σε ένα μοντέλο που θα εκτελέσει τις πράξεις (εκτελέσιμος κώδικας).

4.5.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Ανάλυση ευαισθησίας είναι η διαδικασία κατά την οποία, πραγματοποιώντας προσομοιώσεις, μπορεί να ελέγχεται η επίδραση των αλλαγών της τιμής μιας ανεξάρτητης μεταβλητής του μοντέλου, σε κάποιες σταθερές μεταβλητές. Το GPS-X επιτρέπει να παρουσιαστούν αναλύσεις ευαισθησίας χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε λειτουργική, στοιχειομετρική, κινητική ή φυσική παράμετρο σαν ανεξάρτητη μεταβλητή, ενώ παρέχεται η δυνατότητα να γίνεται η ανάλυση σε σταθερές και δυναμικές συνθήκες.

Με την ανάλυση ευαισθησίας σε σταθερές συνθήκες εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του συστήματος σε διαφορετικές τιμές μιας παραμέτρου. Εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής της τιμής μιας ανεξάρτητης μεταβλητής του μοντέλου (w , air flow, step feed) στις συγκεντρώσεις των MLSS, του DO και του SRT, αφού το σύστημα κάθε φορά βρίσκεται σε σταθερές συνθήκες.

Στην ανάλυση ευαισθησίας σε δυναμικές συνθήκες, παρουσιάζεται πώς μεταβάλλεται η συγκέντρωση μιας σταθερής μεταβλητής με το χρόνο για κάποιες συγκεκριμένες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής. Σε κάθε περίπτωση προϋποτίθεται μια αρχική συγκέντρωση (για τα MLSS, DO, κλπ) και καθορισμένη αλλαγή σε μια ανεξάρτητη μεταβλητή του μοντέλου (w , air flow, step feed).

Υπάρχει όμως, η δυνατότητα να παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης μιας σταθερής μεταβλητής απευθείας με την ανεξάρτητη μεταβλητή σε καθορισμένες όμως χρονικές στιγμές. Η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως phase dynamic ανάλυση ευαισθησίας.

4.5.3 Βελτιστοποίηση

Στην προσομοίωση, ο όρος βελτιστοποίηση αναφέρεται στη εύρεση της βέλτιστης ταιριαστής τιμής μιας μεταβλητής μεταξύ των δεδομένων που μετρήθηκαν στην πραγματικότητα ή έστω είναι επιθυμητά και των δεδομένων που προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου. Σκοπός της βελτιστοποίησης είναι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των στόχων (πραγματικές μετρήσεις). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αλλαγές στις παραμέτρους ή τη δομή του μοντέλου.

Υπάρχουν αρκετά πεδία στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί η βελτιστοποίηση κατά την προσομοίωση εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων, όπως η βαθμονόμηση των μοντέλων, ο σχεδιασμός και η λειτουργία των μονάδων. Για παράδειγμα, μετά τη δημιουργία ενός μοντέλου, είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί αν οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται είναι οι κατάλληλες ώστε να ταιριάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πραγματικά (βαθμονόμηση). Επίσης, κατά το σχεδιασμό και λειτουργία εγκαταστάσεων είναι δυνατό να υπολογιστούν οι τιμές κάποιων παραμέτρων ώστε να επιτυγχάνεται συγκεκριμένη ποιότητα εκροής.

Το GPS-X χρησιμοποιεί την απλοποιημένη μέθοδο Nelder-Mead για το μοντέλο βελτιστοποίησης που ενσωματώνει. Η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά ασφαλής για μια μεγάλη ποικιλία προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Τα είδη της βελτιστοποίησης που μπορούν να παρουσιαστούν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την time series και την probability optimization, χρησιμοποιώντας είτε σταθερές είτε δυναμικές συνθήκες.

4.6 Δυνατότητες του GPS-X

Με το GPS-X επιτυγχάνεται η βελτίωση της λειτουργίας της εγκατάστασης, της αποδοτικότητας και των ποιοτικών χαρακτηριστικών της εκροής, με κατάλληλη βελτιστοποίηση των εγκαταστάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κεφαλαίων και χαμηλότερες λειτουργικές δαπάνες.

Το GPS-X χρησιμοποιεί την τελευταία λέξη της τεχνολογίας, εκμεταλλευόμενο τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στο σχεδιασμό των διεργασιών, στην προσομοίωση και παρακολούθηση της λειτουργίας μιας εγκατάστασης, στο γραφικό περιβάλλον και περιέχει εργαλεία που απλοποιούν το σχεδιασμό του μοντέλου, την προσομοίωση της λειτουργίας σε σταθερές και σε δυναμικές συνθήκες καθώς και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τα εργαλεία βαθμονόμησης επιτρέπουν τη ρύθμιση με ακρίβεια των κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων οποιουδήποτε μοντέλου εγκατάστασης για να προσομοιωθεί με ακρίβεια η πραγματική λειτουργία της εγκατάστασης.

Η βελτιωμένη λειτουργία μιας μονάδας βιολογικού καθαρισμού δεν απαιτεί πάντα την αύξηση του μεγέθους των μονάδων ή την χρήση πιο πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου. Μπορεί να βελτιωθεί η δυναμικότητα, η αποδοτικότητα της λειτουργίας και η βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των επεξεργασμένων λυμάτων με βελτιστοποίηση των υπαρχουσών εγκαταστάσεων συντελώντας σε εξοικονόμηση κεφαλαίων και σε χαμηλότερα λειτουργικά κόστη.

Το GPS-X είναι ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- Βελτιστοποίηση των υπαρχουσών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής ποικίλων μορφών ελέγχου, τροποποιήσεις των διεργασιών και χαμηλότερου κόστους.
- Βελτίωση του σχεδιασμού νέων εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Τα ακόλουθα είναι ένας κατάλογος παραδειγμάτων για το πώς ένα βαθμονομημένο μοντέλο, σχεδιασμένο με το πρόγραμμα GPS-X, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων από άποψη σχεδιασμού, διεργασιών, κατάρτισης χειριστών, ερευνών μείωσης του κόστους, της διαχείρισης και του στρατηγικού προγραμματισμού καθώς και ως ένα εργαλείο έρευνας και διδασκαλίας σε ένα ακαδημαϊκό περιβάλλον.

Ενδεικτικά μέσω του GPS-X επιτρέπεται (Μπούσουλας Άγγελος, 2010):

- Διερεύνηση των επιπτώσεων του αυξανόμενου οργανικού και υδραυλικού φορτίου σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις.
- Αξιολόγηση των δυνατοτήτων λειτουργίας των εγκαταστάσεων, όσον αφορά τη συμμόρφωση τους με τα όρια που επιβάλλει η Ευρωπαϊκή Οδηγία.
- Διερεύνηση της επίδρασης της μη λειτουργίας μίας δεξαμενής καθίζησης για μεγαλύτερο διάστημα από το προβλεπόμενο.
- Διερεύνηση της μέγιστης δυναμικότητας του χωνευτή σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης καθώς και του χρονικού διαστήματος επαναφοράς της λειτουργίας του μετά από μία αστοχία της λειτουργίας της εγκατάστασης.
- Διερεύνηση της επίπτωσης χρήσης διαφορετικών τιμών παροχών εσωτερικής επανακυκλοφορίας καθώς και διαφορετικών όγκων ανοξικών και αναερόβιων δεξαμενών για τις διεργασίες νιτροποίησης και απονιτροποίησης.
- Διερεύνηση των επιπτώσεων της υπερβολικής φόρτισης της βιολογικής βαθμίδας που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αυξημένης περισσειας ιλύος και τη συνεπαγόμενη φόρτιση των κατάντη έργων επεξεργασίας της ιλύος.
- Διερεύνηση της πιθανής μείωσης του ενεργειακού κόστους μέσω της εφαρμογής της αυτόματης ρύθμισης της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου με ρυθμιστές ελέγχου, βάσει πραγματικών δεδομένων εισόδου.
- Αξιολόγηση των οικονομικά πιο αποδοτικών επιλογών για αναβάθμιση των μονάδων (πχ. επαναδιαστασιολόγηση του αντιδραστήρα).
- Με τη χρησιμοποίηση των εκτιμήσεων αυξανόμενης μελλοντικής οργανικής και υδραυλικής φόρτισης μπορεί να καθοριστεί το αναγκαίο χρονικό διάστημα επέκτασης ή αναβάθμισης των εγκαταστάσεων.
- Το GPS-X μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση των λειτουργών των εγκαταστάσεων και να παίζει το ρόλο ενός εργαλείου κατάρτισης. Το προσαρμοσμένο περιβάλλον επικοινωνίας επιτρέπει την μελέτη της μονάδας μέσω προσομοιώσεων για τον προσδιορισμό των αποτελεσμάτων των ενεργειών τους και την απόκτηση εμπειρίας.

5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Στις προηγούμενες ενότητες έγινε μια περιγραφή της λειτουργίας και των δυνατοτήτων του λειτουργικού προγράμματος. Παράλληλα περιγράφηκε αναλυτικά το μοντέλο ενεργού ιλύος 2 (ASM2), το οποίο ενσωματώνει το GPS-X και είναι διαθέσιμο για την προσομοίωση της λειτουργίας μιας υπάρχουσας εγκατάστασης. Στην παρούσα εργασία έγινε διερεύνηση της λειτουργίας μιας Ε.Ε.Λ. με τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

❖ *Δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης:*

Στην εφαρμογή, η ορθογωνική δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι διαστάσεων 20x100 m, μέσου βάθους 3 m και συνολικής επιφάνειας 12,000 m² και ως μοντέλο καθίζησης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο sim2d.

❖ *Βιολογικοί αντιδραστήρες:*

Ο συνολικός όγκος περιλαμβάνει τον όγκο της ανοξικής και αναερόβιας δεξαμενής και της δεξαμενής αερισμού. Οι βιοαντιδραστήρες είναι κατάλληλα διαμερισματοποιημένοι, με αναερόβια ζώνη επιλογής μικροοργανισμών (D1), ανοξική ζώνη (D2/3), αερόβιες ζώνες (A1, A2, A3 και A4) και ζώνη απαερίωσης (A5). Οι όγκοι του κάθε διαμερίσματος είναι :

- $V_{D1} = 1405 \text{ m}^3$
- $V_{D2/3} = 7880 \text{ m}^3$
- $V_{A1}=V_{A2} = 4585 \text{ m}^3$
- $V_{A3}=V_{A4} = 2847 \text{ m}^3$
- $V_{A5} = 695 \text{ m}^3$

Επιπλέον, με δεδομένη την ύπαρξη ενός μεγάλου όγκου καναλιού, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η επανακυκλοφορία της ιλύος, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ο όγκος αυτός στη προσομοίωση, καθώς αναμένεται έστω και με μικρούς ρυθμούς επιτέλεση αρκετών βιολογικών διεργασιών εντός αυτού.

❖ *Συνολική επιφάνεια των δεξαμενών καθίζησης:*

Ο διαχωρισμός της βιομάζας από τα επεξεργασμένα λύματα, πραγματοποιείται σε μια ορθογωνική δεξαμενή καθίζησης, συνολικής επιφάνειας 4344 m² και ύψους 3 m. Ως μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το sim2d, το οποίο δίνει τις μικρότερες

αποκλίσεις από τα πραγματικά δεδομένα λειτουργίας της εγκατάστασης (Μπούσουλας Αγγελος, 2010).

❖ *Παχυντής βαρύτητας πρωτοβάθμιας ιλύος:*

Η ιλύς που απομακρύνεται από τις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης οδηγείται προς τις εγκαταστάσεις πάχυνσης της ιλύος με στόχο την αύξηση των στερεών σε 6 % περίπου. Στην εφαρμογή, ο παχυντής βαρύτητας είναι διαστάσεων μέσου βάθους 5 m και συνολικής επιφάνειας 120 m² και ως μοντέλο καθίζησης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο simple1d.

❖ *Μηχανική πάχυνση περίσσειας ιλύος:*

Η περίσσεια ενεργός ιλύς απομακρύνεται και οδηγείται στο αντλιοστάσιο περίσσειας ενεργού ιλύος από όπου καταθλίβεται προς την εγκατάσταση μηχανικής πάχυνσης. Επειδή στην εφαρμογή δεν προβλέπεται η ύπαρξη μηχανικού παχυντή, χρησιμοποιείται ένας παχυντής βαρύτητας βάθους 3 m και συνολικής επιφάνειας 800 m² και ως μοντέλο καθίζησης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο simple1d.

❖ *Μονάδα χώνευσης ιλύος:*

Το μίγμα των παχυμένων ιλύων σταθεροποιείται με αναερόβια χώνευση σε θερμοκρασία 30-35 °C. Η χώνευση της ιλύος επιτελείται σε έναν αναερόβιο χωνευτή, συνολικού ωφέλιμου όγκου 6700 m³. Ο χρόνος παραμονής σχεδιασμού της ιλύος ανέρχεται σε περίπου 17 ημέρες, για διάσπαση περίπου 43 % των οργανικών στερεών του μίγματος της πρωτοβάθμιας και της δευτεροβάθμιας ιλύος. Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο καθίζησης το μοντέλο basic και το μίγμα σταθεροποιείται με αναερόβια χώνευση σε θερμοκρασία 35 °C.

❖ *Μονάδα αφυδάτωσης ιλύος*

Η χωνευμένη ιλύς οδηγείται στην μονάδα αφυδάτωσης η οποία είναι συνολικής επιφάνειας 1500 m² και ως μοντέλο λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο press με δόση πολυμερών 145 g/m³.

Στα σενάρια που εφαρμόστηκαν δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στα φορτία εκροής ώστε αυτά είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας 91/271 της Ε.Ε. για ευαίσθητους αποδέκτες, όσον αφορά τις συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου, στερεών και ολικού αζώτου. Σε γενικές γραμμές, οι απαιτήσεις της Οδηγίας 91/271 παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

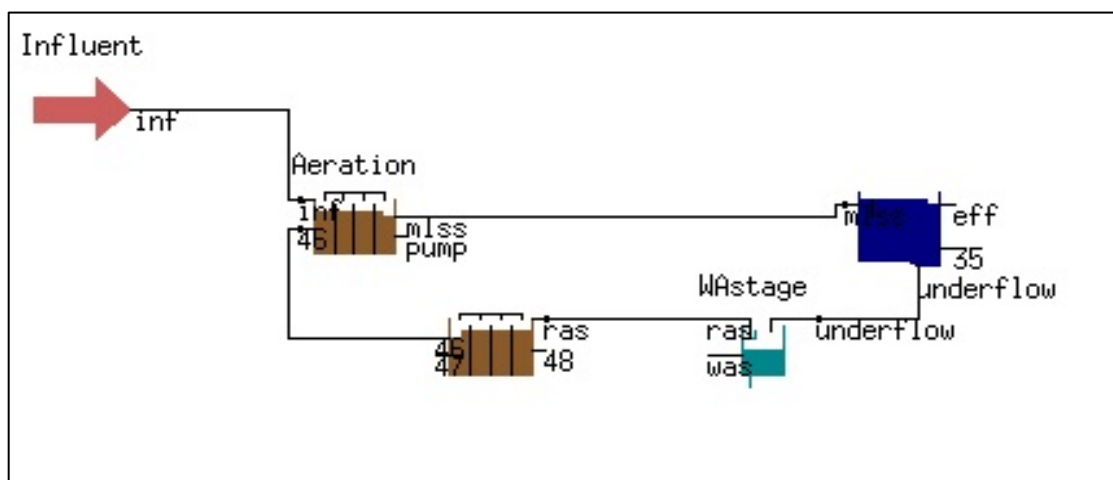
Πίνακας 5-5-1 Οδηγία 91/271/ΕΕ

Κανονικοί Αποδέκτες		
Παράμετρος Ρύπανσης	Μέγιστο Επιτρεπόμενο Όριο	Ελάχιστη ποσοστιαία μείωση (εναλλακτικά*)
BOD₅ στους 20°C (χωρίς νιτροποίηση)	25 mg/l**	70-90%
COD	125 mg/l**	75%
SS (για οικισμούς με ι.π. άνω των 10.000)	35 mg/l**	90%
(για οικισμούς με ι.π. μεταξύ 2.000 και 10.000)	60 mg/l**	70%
Ευαίσθητοι Αποδέκτες (ισχύουν τα ανωτέρω όρια και επιπλέον τα ακόλουθα)		
P_{total} (για οικισμούς με ι.π. μεταξύ 10.000 και 100.000)	2 mg/l	80%
(για οικισμούς με ι.π. άνω των 100.000)	1 mg/l****	
N_{total} (για οικισμούς με ι.π. μεταξύ 10.000 και 100.000)	15 mg/l****	70-80%
(για οικισμούς με ι.π. άνω των 100.000)	10 mg/l****	

* εναλλακτικά εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ελάχιστο επιβαλλόμενο όριο μείωσης ρύπανσης

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

***ως μέση ετήσια τιμή



Εικόνα 5-1 Σχηματική αναπαράσταση του βιολογικού τμήματος της Ε.Ε.Α. στην οποία έγιναν οι αναλύσεις

Το σημαντικότερο στοιχείο ενός προσομοιώματος είναι η σωστή βαθμονόμησή του, ώστε τα αποτελέσματα που δίνει να είναι σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα της εγκατάστασης. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε και σε προηγούμενες επιστημονικές μελέτες του τομέα (Μπούσουλας Αγγελος, 2010), οπότε στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το βαθμονομημένο μοντέλο της εγκατάστασης. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής επίσης, το τμήμα της εγκατάστασης που χρειάστηκε να προσομοιωθεί για τις μετέπειτα αναλύσεις ήταν αυτό του βιολογικού αντιδραστήρα και της δεξαμενής τελικής καθίζησης, σχηματική αναπαράσταση του οποίου δίνεται στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 5-1).

Παρακάτω παρατίθενται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εισροής στην βιολογική βαθμίδα της εγκατάστασης, όπως επίσης και οι τιμές των στοιχειομετρικών, κινητικών, λειτουργικών παραμέτρων και των παραμέτρων καθίζησης του βαθμονομημένου μοντέλου, για τη λειτουργία της εγκατάστασης κατά τον μήνα Ιανουάριο. Τέλος να αναφερθεί ότι το μοντέλο εισαγωγής των δεδομένων εισροής, όπως επίσης και αυτό της ενεργού ιλύος που χρησιμοποιήθηκε είναι το asm2.

Πίνακας 5-2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά λυμάτων στην είσοδο της εγκατάστασης

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Q	65,931	m ³ /d
COD	540.00	mg/l
TSS	183.00	mg/l
VSS	140.91	mg/l
TN	58.00	mgN/l
TKN	58.00	mgN/l
NH ₄	50.46	mgN/l
T _{λ_{υμ}}	19.70	°C

Πίνακας 5-3 Λειτουργικά χαρακτηριστικά εγκατάστασης

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Παροχή εσωτερικής ανακυκλοφορίας (Q _R)	175,000	m ³ /d
Μέγιστη δυνατή Q _R (maxQ _R)	259,200	m ³ /d
Συντελεστής επανακυκλοφορίας (r)	106.00	%
Χρόνος παραμονής στερεών (srt)	8.20	d
D _{OD1/2/7}	0.0	gO ₂ /m ³
D _{OD3}	3.0	gO ₂ /m ³
D _{OD4}	2.5	gO ₂ /m ³
D _{OD5}	2.0	gO ₂ /m ³
D _{OD6}	1.5	gO ₂ /m ³

Πίνακας 5-4 Κινητικές παράμετροι εγκατάστασης

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Συντελεστής παραγωγής αυ/φικής βιομάζας Y_A	0.20	-
Συντελεστής παραγωγής ετε/φικής βιομάζας Y_H	0.62	-
N στη βιομάζα i_{XB}	0.086	gN/gCOD
Αδρανές ποσοστό κατά τη λύση της βιομάζας	0.10	-

Πίνακας 5-5 Στοιχειομετρικές παράμετροι εγκατάστασης

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
<i>Ετεροτροφική βιομάζα</i>		
Μέγιστη ταχύτητα ανάπ. ετε/φικής βιομάζας μ_{maxH}	7.0	1/d
Μέγιστη ειδική ταχύτητα ζύμωσης q_{fe}	5.0	1/d
Σταθερά Monod για τροφή K_s	4.0	gCOD/m ³
Σταθερά Monod για οξυγόνο K_{OA}	0.3	gO ₂ /m ³
Σταθερά Monod για νιτρικά K_{NO}	0.5	gN/m ³
Σταθερά Monod για αμμωνιακό N K_{NA}	0.7	gN/m ³
Συντελεστής αποσύνθεσης b_H	0.4	1/d
Διορθωτικός συντ. για ανοξικές συνθήκες η_{NO3}	0.9	-
<i>Αυτοτροφική βιομάζα</i>		
Μέγιστη ταχύτητα ανάπ. Αυ/φικής βιομάζας μ_{maxA}	0.68	1/d
Συντελεστής αποσύνθεσης b_A	0.15	1/d
<i>Υδρόλυση</i>		
Μέγιστος ειδικός ρυθμός υδρόλυσης K_b	3.0	1/d
Διορθωτικός συντ. για ανοξικές συνθήκες η_{NO3}	0.1	-

Πίνακας 5-6 Παράμετροι καθιζησιμότητας ιλύος

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Συντελεστής καθιζησιμότητας	0.5	-
Μέγιστη ταχύτητα καθίζησης	274.0	m/d
Μέγιστη ταχύτητα καθίζησης Vesilind	410.0	m/d
Μη καθιζήσιμο ποσοστό	10	%

6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στόχος του πρώτου μέρους της μαθηματικής προσομοίωσης στην δεδομένη Ε.Ε.Α. είναι η διερεύνηση της επίδραση της θερμοκρασίας (T) και του χρόνου παραμονής στερεών (srt), ο οποίος είναι και μία βασική λειτουργική παράμετρος, στην απόκριση της εγκατάστασης. Επίσης για κάθε srt που εξετάστηκε, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου για κάποιες στοιχειομετρικές και κινητικές μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές είναι ο ρυθμός παραγωγής της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας (Y_H και Y_A αντίστοιχα) και ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας στους 20 °C (μ_{max_H} και μ_{max_A} αντίστοιχα).

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν σε κάθε ένα από τα σενάρια ήταν η συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα (MLSS), η συνολική απαίτηση σε οξυγόνο της εγκατάστασης (Total Air Flow), η συγκέντρωση ολικού και διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή (COD και CODs αντίστοιχα), η συγκέντρωση ολικών στερεών στην εκροή (TSS) και οι συγκεντρώσεις αζώτου στην εκροή τόσο του ολικού (TN) όσο και των νιτρικών (NO_3N) και αμμωνιακών (NH_4N).

Ακολουθούν αναλυτικά η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια.

6.1 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας των λυμάτων

Η θερμοκρασία είναι ένα πολύ κρίσιμο στοιχείο και επηρεάζει αρκετά τις διεργασίες των μικροοργανισμών. Σύμφωνα με τους Henze, Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic «η επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας, $\mu_{max_{A,T}}$ είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποφασιστική. Κάθε 6 °C μείωσης της θερμοκρασίας, το $\mu_{max_{A,T}}$ υποδιπλασιάζεται.» (Henze et al, 2008). Όπως θα φανεί και σε επόμενες αναλύσεις, το $\mu_{max_{A,T}}$ έχει μεγάλη επιρροή στις συγκεντρώσεις των μεταβλητών που εξετάστηκαν. Κρίθηκε επομένως σκόπιμο να εξετασθεί πώς επηρεάζει η διακύμανση της θερμοκρασίας την απόκριση της εγκατάστασης. Καθώς η θερμοκρασία λυμάτων είναι 19.7 °C, θεωρήθηκε ότι διακύμανση τριών βαθμών Κελσίου καλύπτει τις πιθανές ακραίες τιμές θερμοκρασιών για το συγκεκριμένο μήνα λειτουργίας (Ιανουάριο).

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 6-1, αύξηση της θερμοκρασίας (T) οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών (MLSS) στον βιολογικό αντιδραστήρα. Το παραπάνω είναι αναμενόμενο καθώς για μεγαλύτερες θερμοκρασίες αυξάνονται οι ρυθμοί ανάπτυξης της βιομάζας και συνεπώς, απαιτούνται μικρότερες συγκεντρώσεις για ίδια αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί πως ακόμα και για τη δυσμενέστερη περίπτωση, αυτής δηλαδή του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής στερεών και της μικρότερης θερμοκρασίας, η εγκατάσταση λειτουργεί εντός των επιτρεπτών ορίων

που εξασφαλίζουν την ομαλή και οικονομική λειτουργία του αερισμού ($2000 < MLSS < 5000$).

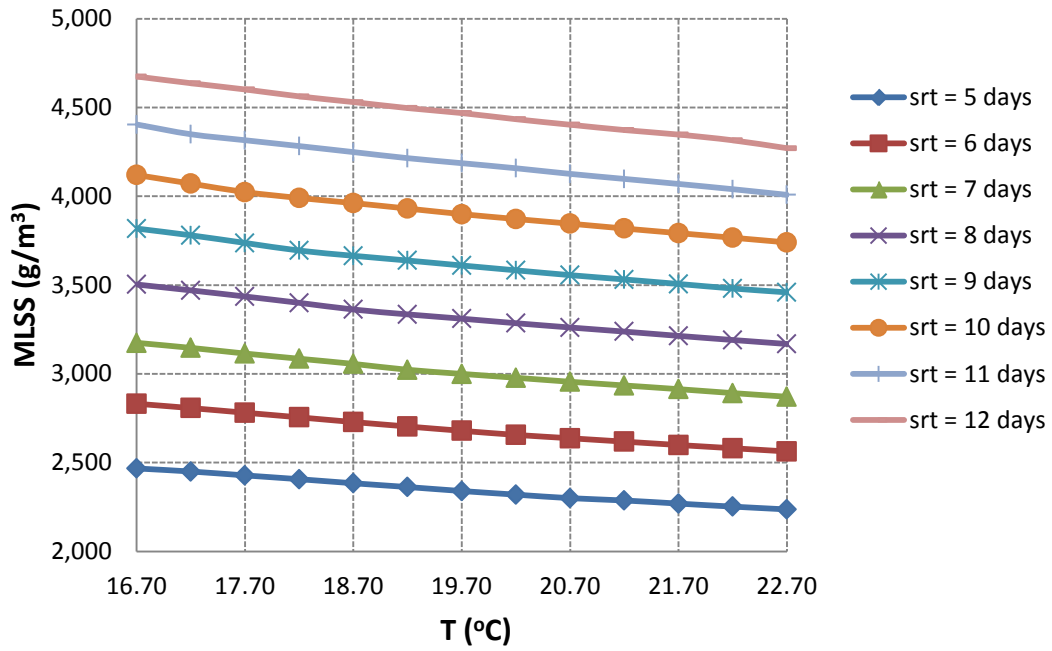
Η συνολική παροχή σε αέρα της εγκατάστασης (σχήμα 6-2) επηρεάζεται σημαντικά από την θερμοκρασία. Η εκρηκτική άνοδος στην τιμή της συνολικής παροχής σε αέρα που παρατηρείται για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας συναρτήσεως του χρόνου παραμονής στερεών (srt), υποδηλώνει την πραγματοποίηση νιτροποίησης, η οποία απαιτεί σημαντική ποσότητα οξυγόνου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6-7, για κάθε χρόνο παραμονής στερεών, υπάρχει μία τιμή της θερμοκρασίας κάτω από την οποία δεν πραγματοποιείται πρακτικώς νιτροποίηση. Η τιμή αυτή προσδιορίζει και το σημείο στο οποίο μεταβάλλεται απότομα η ολική απαίτηση σε αέρα της εγκατάστασης. Για την ίδια τιμή φυσικά παρατηρείται και απότομη αλλαγή στις συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (σχήμα 6-6) και νιτρικών (σχήμα 6-8) στην εκροή, κάτι αναμενόμενο, καθώς οι δύο αυτές μεταβλητές έχουν άμεση συσχέτιση με την διεργασία της νιτροποίησης.

Οι συγκεντρώσεις ολικών στερεών (TSS) (σχήμα 6-5) και ολικού και διαλυτού οργανικού φορτίου (COD και COD_s αντίστοιχα) (σχήμα 6-3 & 6-4) δεν επηρεάζονται από την θερμοκρασία. Οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται στα COD και COD_s οφείλονται πιθανότατα σε δευτερογενείς παράγοντες, όπως η φθορά των μικροοργανισμών. Αξίζει να επισημανθεί πως τόσο η συγκέντρωση του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή όσο και αυτή των ολικών στερεών είναι συμβατές με τα όρια της οδηγίας σε όλα τις εξεταζόμενες προσομοιώσεις.

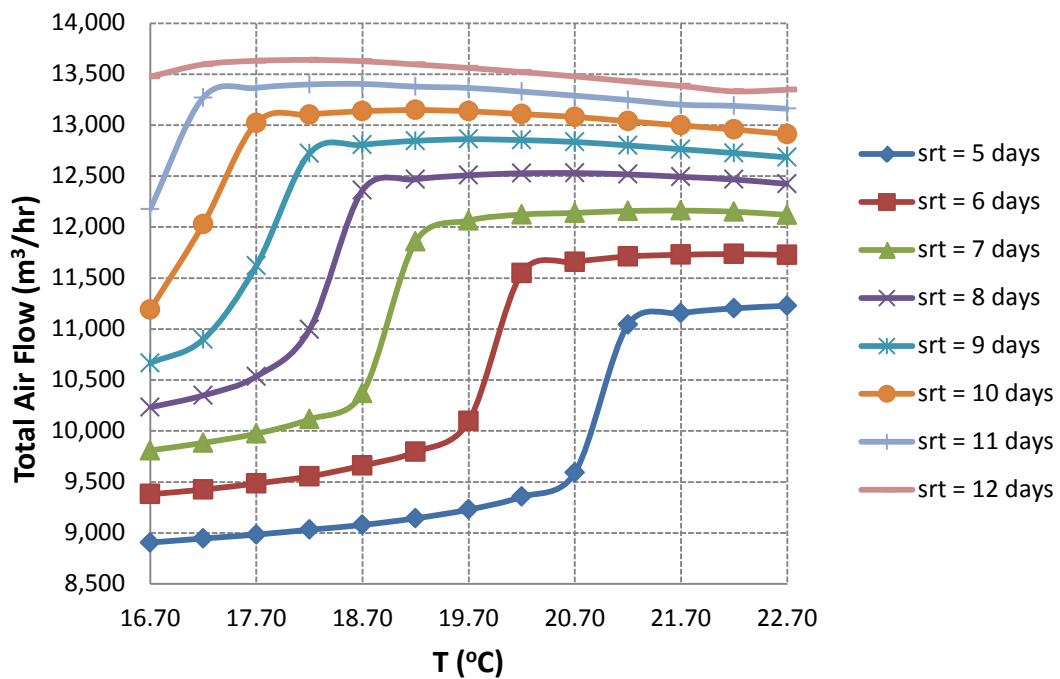
Ο κρίσιμος παράγοντας λειτουργίας της εγκατάστασης ανάλογα τη θερμοκρασία λειτουργίας είναι η νιτροποίηση. Για τη δεδομένη κατά τα άνω θερμοκρασία λειτουργίας, δηλαδή 19.7 °C, η εγκατάσταση λειτουργεί εντός των ορίων της οδηγίας για χρόνο παραμονής μεγαλύτερο ή ίσο των οκτώ ημερών (srt ≥ 8 d), ενώ για αύξηση της θερμοκρασίας κατά μία μονάδα η εγκατάσταση είναι σύμφωνη με την οδηγία ακόμα και για χρόνο παραμονής στερεών έξι ημερών.

Τέλος, ας μην παραλειφθεί να σημειωθεί ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα σχήματα 6-6 και 6-8. Η ολική συγκέντρωση αζώτου στην εκροή είναι κυρίως η συγκέντρωση νιτρικών, σε ποσοστό μάλιστα άνω του 80 % σε πολλές περιπτώσεις. Για να λειτουργήσει λοιπόν η εγκατάσταση πιο αποδοτικά ως προς την συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μεγαλύτερη απονιτροποίηση, κάτι το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με μεγαλύτερους όγκους ανοξικών και αναερόβιων δεξαμενών, όπως επίσης και με αύξηση της παροχής εσωτερικής ανακυκλοφορίας, κάτι το οποίο θα εξετασθεί παρακάτω.

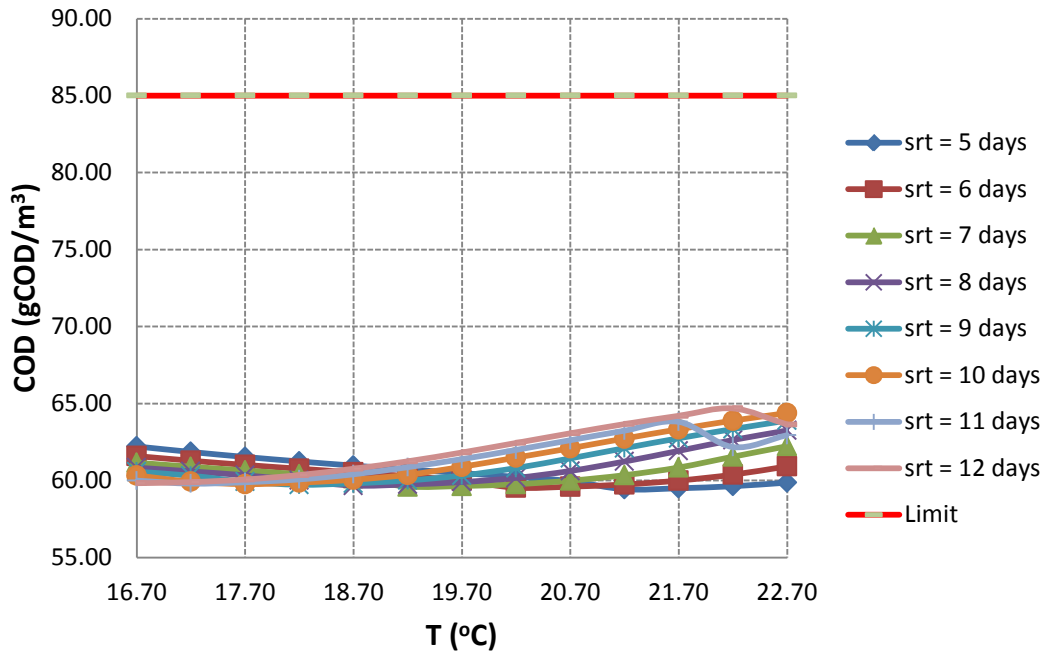
Ακολουθούν τα διαγράμματα απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσεως της θερμοκρασίας των λυμάτων και του χρόνου παραμονής στερεών.



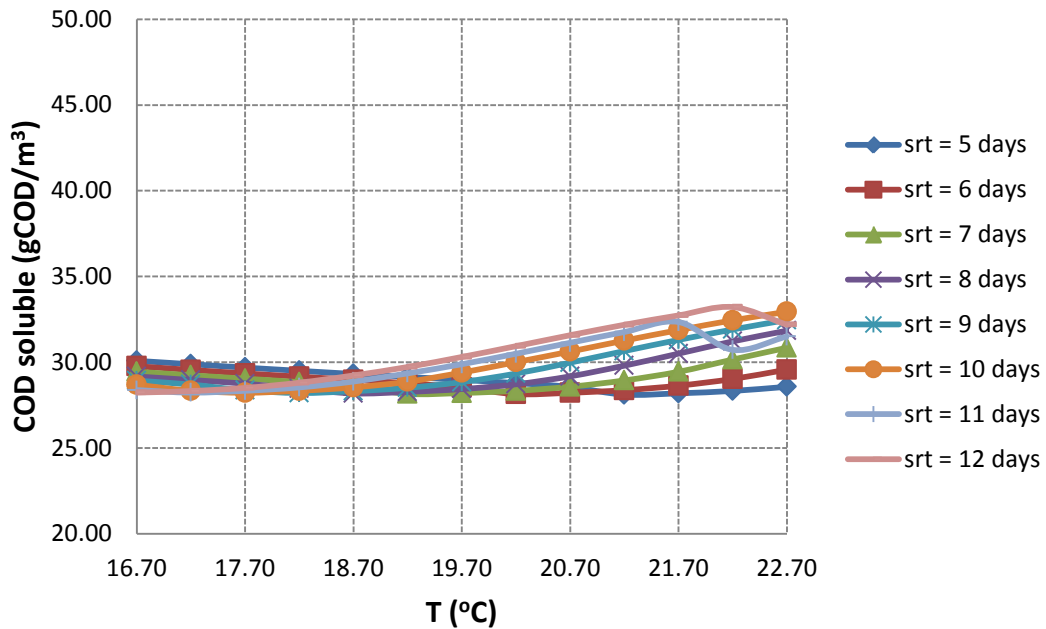
Σχήμα 6-1 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας



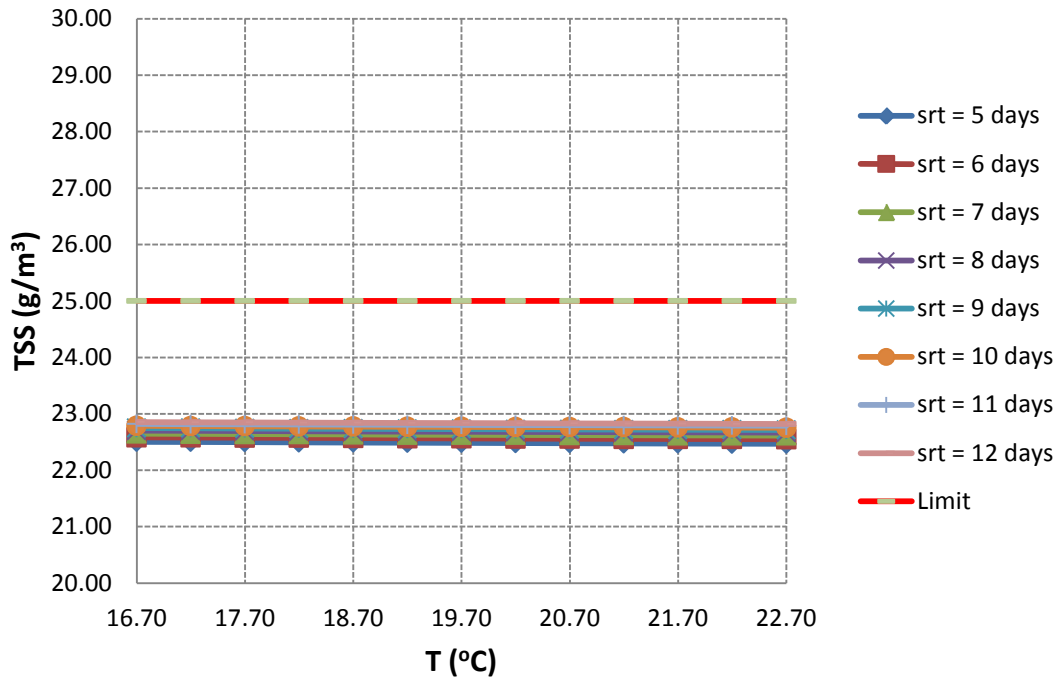
Σχήμα 6-2 Διακύμανση της ολικής απαίτησης σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας



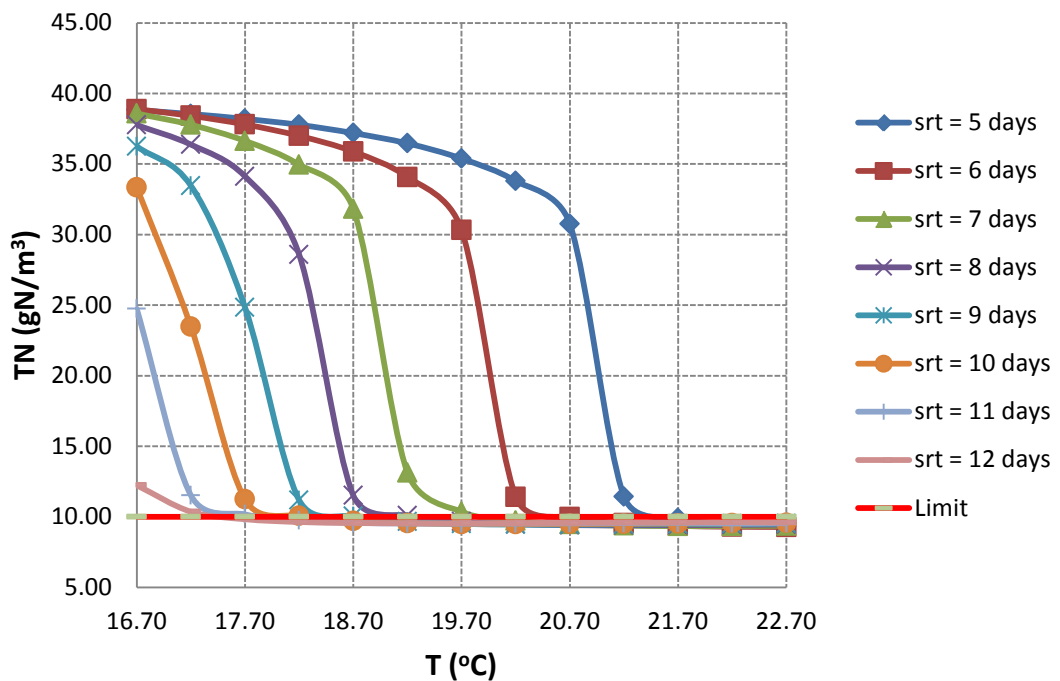
Σχήμα 6-3 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας



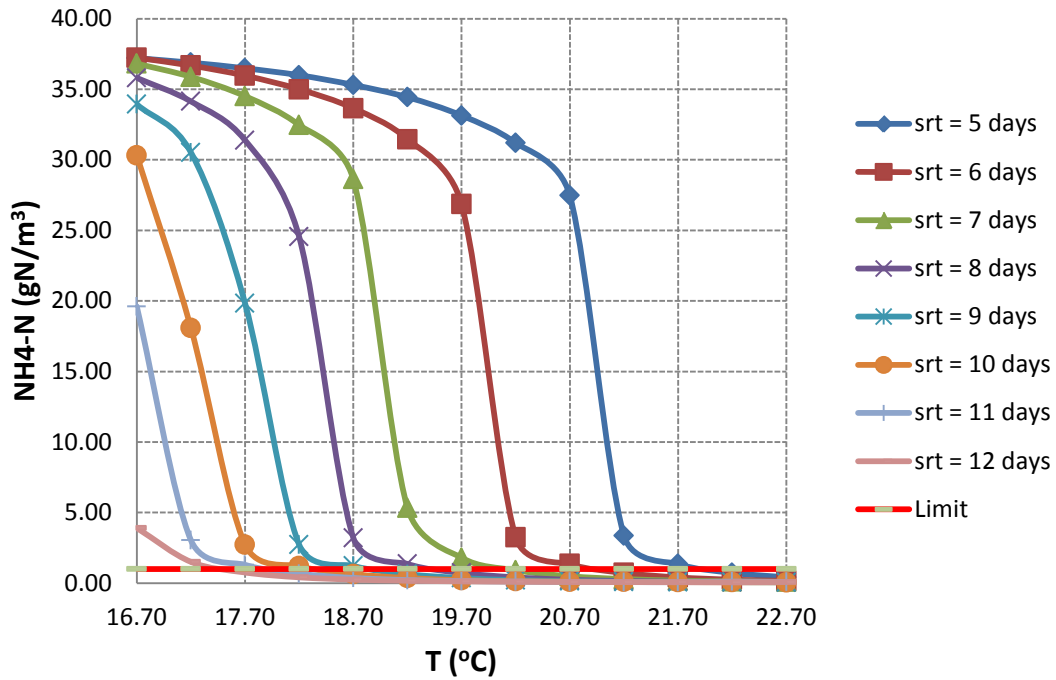
Σχήμα 6-4 Διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας



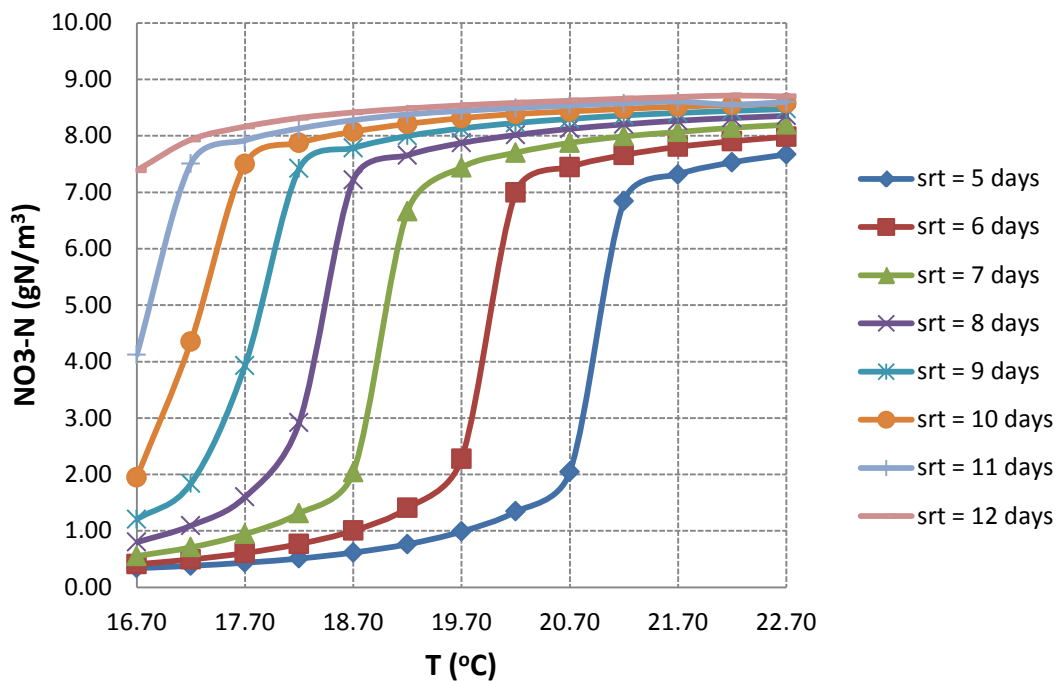
Σχήμα 6-5 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας



Σχήμα 6-6 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας



Σχήμα 6-7 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας



Σχήμα 6-8 Διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας

6.2 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσεως του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας

Ο προσδιορισμός των κινητικών ανάπτυξης βακτηρίων και κατανάλωσης οργανικού φορτίου είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την ακριβή πρόβλεψη του βαθμού βιοαποδόμησης των οργανικών ενώσεων στο φυσικό (Ducklow H.W. and Shiah F.-K., 1993) και τεχνητό περιβάλλον (Grady et al., 1996). Κατά τη βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ο καθορισμός των τιμών μίας σειράς κινητικών και στοιχειομετρικών παραμέτρων, όπως η μέγιστη ειδική ταχύτητα αύξησης των μικροοργανισμών (μ_{max}), ο συντελεστής μετατροπής υποστρώματος σε βιομάζα (Y) και ο ρυθμός βακτηριακής φθοράς (b), έχει διττό στόχο. Οι συγκεκριμένες παράμετροι αφενός αποτελούν τη βάση μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και τη λειτουργία μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Henze et al., 1995), αφετέρου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αναχαιτίσεως της βιολογικής διεργασίας από οργανικούς (Ellis T.G. and Anselm C.V., 1999) και ανόργανους τοξικούς ρυπαντές (Cabrerero et al., 1998). Η σωστή λοιπόν εκτίμηση των παραπάνω μεταβλητών κατά τη βαθμονόμηση ενός προσομοιώματος για μία συγκεκριμένη Ε.Ε.Λ. είναι ιδιαίτερα σημαντική, οπότε και σκόπιμο είναι να πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να αξιολογηθεί και ποσοτικά η μεταβολή των αποτελεσμάτων συναρτήσεως της δεδομένης μεταβλητής.

Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για τον συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας και συγκεκριμένα από το σχήμα 6-9, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση στερεών αυξάνεται τόσο με την αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών (srt) όσο και με την αύξηση του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας (Y_H). Παρατηρείται ότι ακόμη και για χρόνο παραμονής στερεών ίσο με 12 ημέρες (46 % μεγαλύτερο από τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας της εγκατάστασης – 8.2 ημέρες) η συγκέντρωση των στερεών βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων για την ομαλή και οικονομική λειτουργία του αερισμού ($2000 < MLSS < 5000$) για όλες τις τιμές του Y_H . Ανεξαρτήτως χρόνου παραμονής, για βαθμιαία αύξηση του Y_H κατά 0.1 παρατηρείται αύξηση της τάξεως του 1.50 % στην συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών.

Η ολική απαίτηση σε αέρα της εγκατάστασης αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών (srt), ενώ παρατηρείται μείωση με την αύξηση του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας (σχήμα 6-10). Η λειτουργία της εγκατάστασης, συνεπώς, γίνεται οικονομικότερη για μεγάλους συντελεστές παραγωγής και μικρούς χρόνους παραμονής στερεών. Και εδώ, ανεξαρτήτως χρόνου παραμονής, για βαθμιαία αύξηση του Y_H κατά 0.1 παρατηρείται μείωση της τάξεως του 0.90 % στην ολική απαίτηση οξυγόνου, με αυξητική τάση όσο αυξάνεται το Y_H .

Η συγκέντρωση του ολικού οργανικού φορτίου στην έξοδο της εγκατάστασης (σχήμα 6-11) παραμένει πρακτικά αμετάβλητη για τις διάφορες τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας. Αξίζει να τονισθεί ότι για όλους τους συνδυασμούς χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή

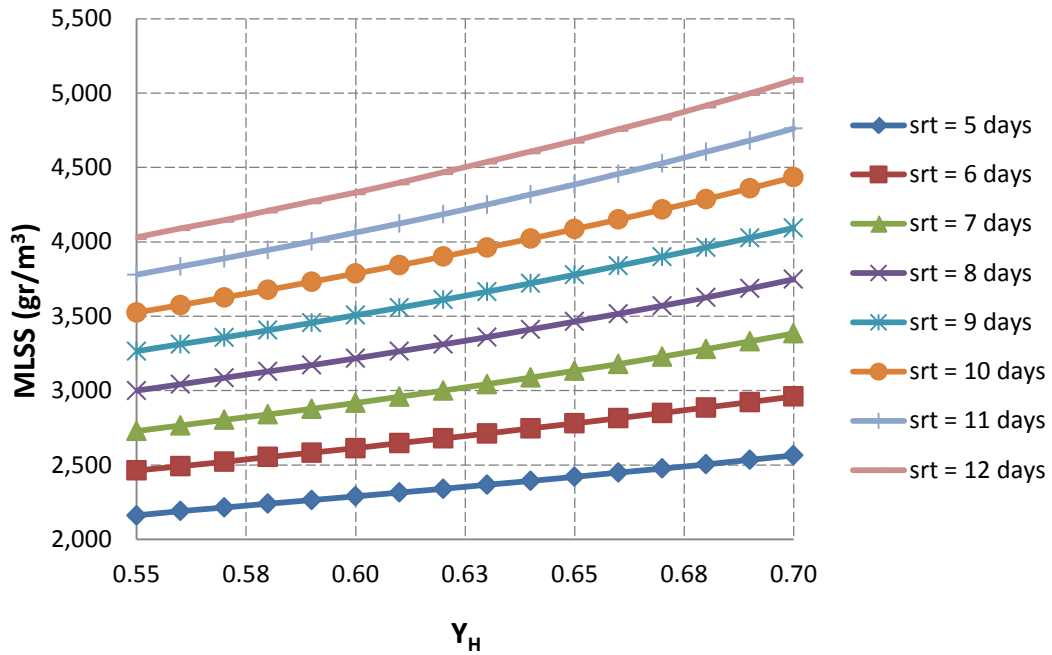
παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας που εξετάστηκαν, η παραπάνω συγκέντρωση βρίσκεται εντός των ορίων που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή οδηγία.

Το διαλυτό οργανικό φορτίο στην έξοδο της εγκατάστασης παραμένει και αυτό πρακτικά ανεπηρέαστο για τις διάφορες τιμές του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας, ενώ οι πολύ μικρές διαφορές που παρατηρούνται συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών οφείλονται πιθανότατα σε δευτερογενείς παράγοντες όπως η φθορά των μικροοργανισμών (σχήμα 6-12).

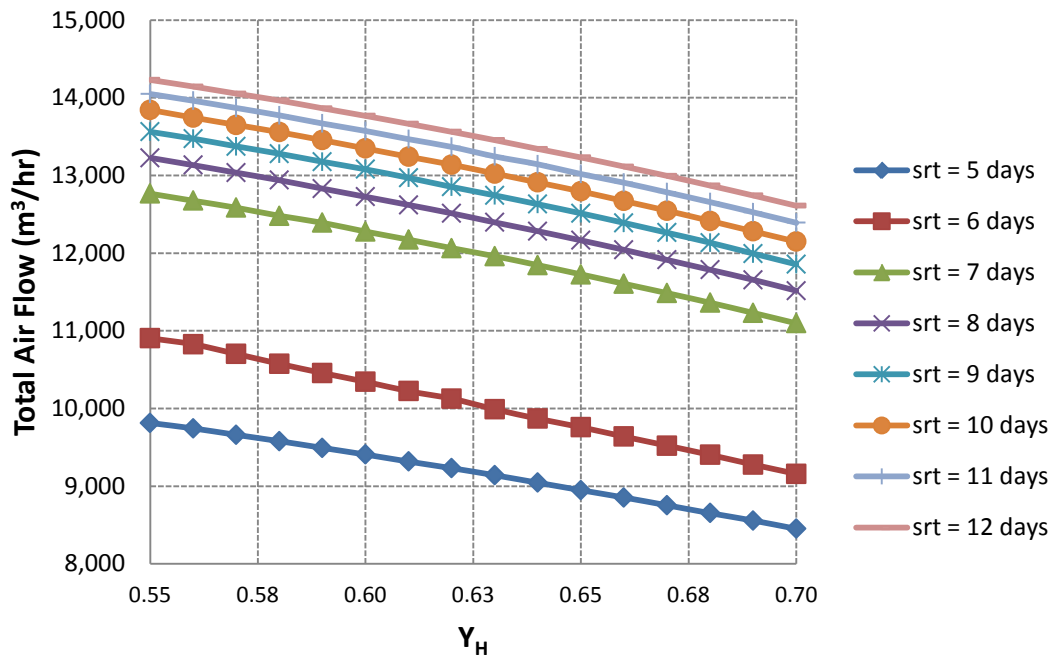
Μία πρώτη παρατήρηση που εξάγεται και πρέπει να σημειωθεί σχετικά με την συγκέντρωση των ολικών στερεών (σχήμα 6-13), είναι πως η εγκατάσταση είναι σύμφωνη με τα όρια της οδηγίας για όλες τις εξεταζόμενες διερευνήσεις. Ακόμη, παρατηρείται η πρακτική ανεξαρτησία της δεδομένης μεταβλητής από τις διάφορες τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.

Ως προς την συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην εκροή (σχήμα 6-14), η εγκατάσταση δεν ανταποκρίνεται επαρκώς για χρόνους παραμονής πέντε και έξι ημερών ($srt = 5 \text{ \& } 6 \text{ d}$). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μη πραγματοποίηση νιτροποίησης, όπως προκύπτει και από το σχήμα 6-15. Ακόμη, για όλες τις άλλες περιπτώσεις, η ολική συγκέντρωση αζώτου στην εκροή είναι συμβατή και σε μερικές περιπτώσεις οριακά εκτός των ορίων της Ευρωπαϊκής οδηγίας ενώ, τέλος, δεν επηρεάζεται ούτε από τον χρόνο παραμονής στερεών ούτε και από τον συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας. Επίσης, για χρόνο παραμονής στερεών ίσο με επτά ημέρες υπάρχει υπέρβαση του ορίου του 1 gN/m^3 στη συγκέντρωση αμμωνιακών. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η εγκατάσταση λειτουργεί χωρίς προβλήματα ως προς τη συγκέντρωση αμμωνιακών στην εκροή, και μάλιστα εδώ, όπως και στη συγκέντρωση ολικού φορτίου νιτρικών, τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από τον συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.

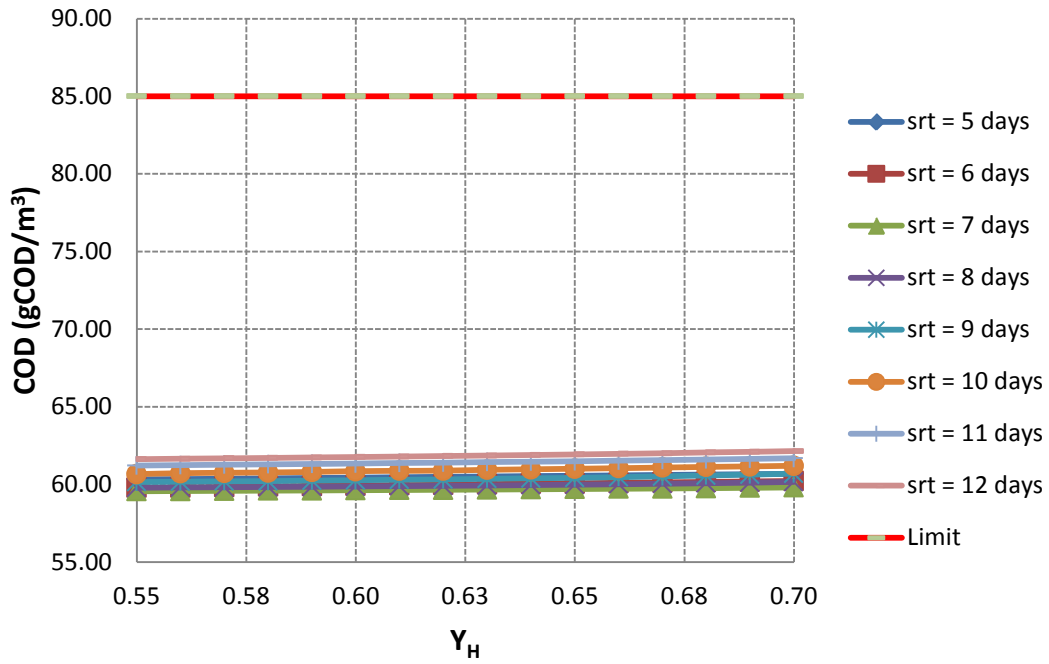
Από το σχήμα 6-16 φαίνεται η πρακτική ανεξαρτησία της συγκέντρωσης νιτρικών στην εκροή από το συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας, ενώ υπάρχει μία εξάρτηση από το χρόνο παραμονής στερεών. Προκύπτει, λοιπόν, πως οι συγκεντρώσεις των αζωτούχων μεταβλητών στην εκροή επηρεάζονται κυρίως από το χρόνο παραμονής στερεών. Το παραπάνω είναι αναμενόμενο καθώς το srt σχετίζεται άμεσα με τις διεργασίες των μικροοργανισμών. Ένα σημαντικό συμπέρασμα από το σχήμα 6-16 είναι ότι η ολική συγκέντρωση αζώτου στην εκροή είναι κυρίως η συγκέντρωση νιτρικών, σε ποσοστό μάλιστα άνω του 80 % σε πολλές περιπτώσεις. Για να λειτουργεί, λοιπόν, η εγκατάσταση πιο αποδοτικά και αποτελεσματικά ως προς τη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μεγαλύτερη απονιτροποίηση. Τέλος, για χρόνο παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών έχουμε μικρές συγκεντρώσεις λόγω της απουσίας νιτροποίησης.



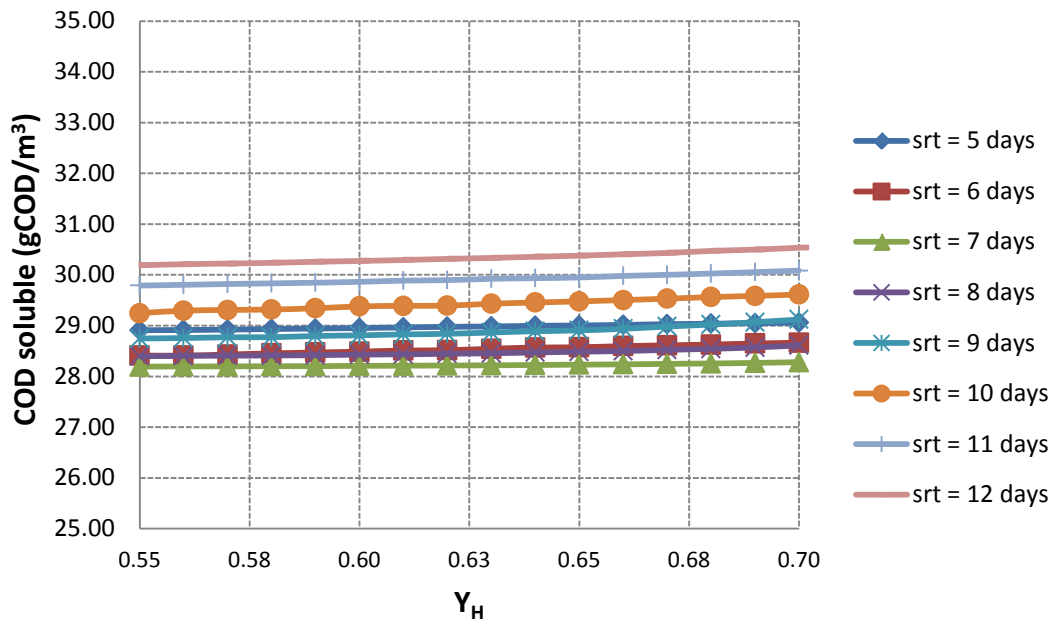
Σχήμα 6-9 Διακόμανση της συγκέντρωσης ολικών στερεών στον Β.Α. για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας



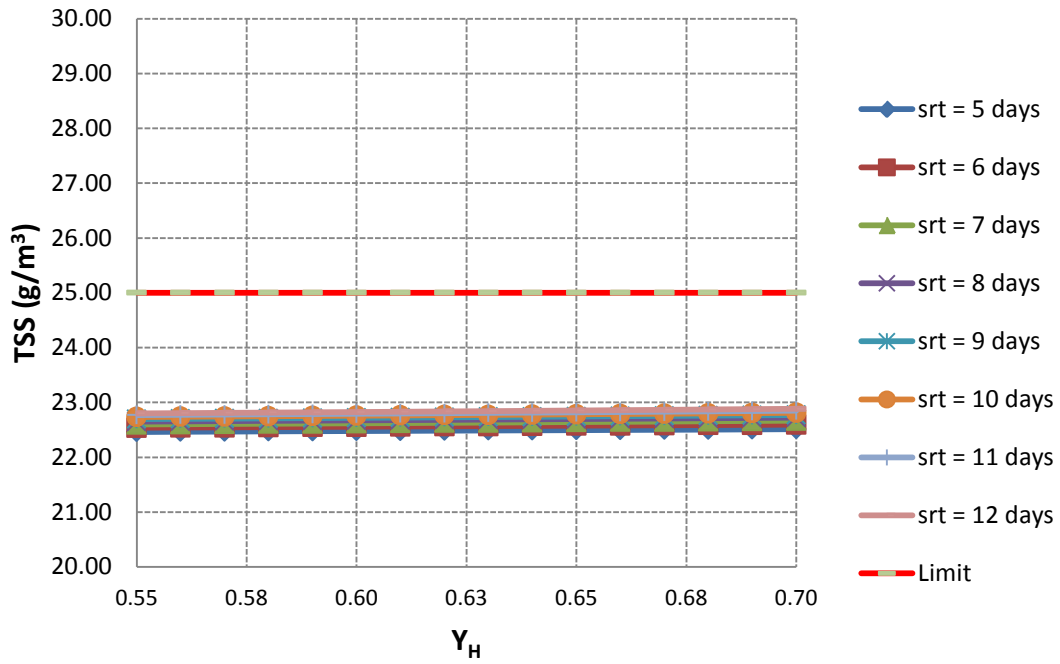
Σχήμα 6-10 Διακόμανση ολικής απαίτησης σε αέρα της Ε.Ε.Α. για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας



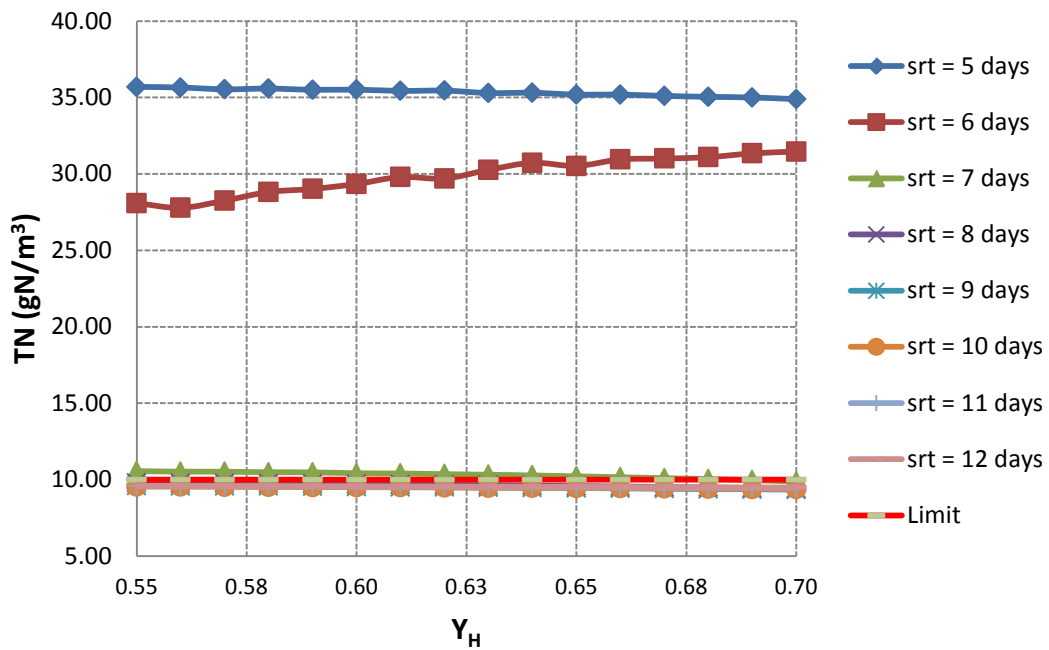
Σχήμα 6-11 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας



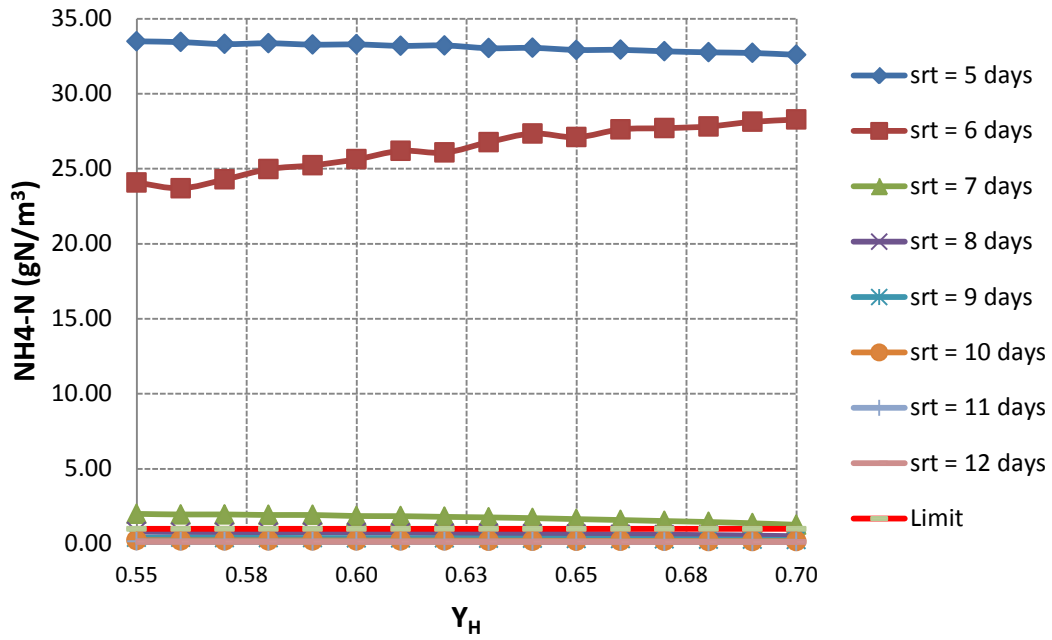
Σχήμα 6-12 Διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας



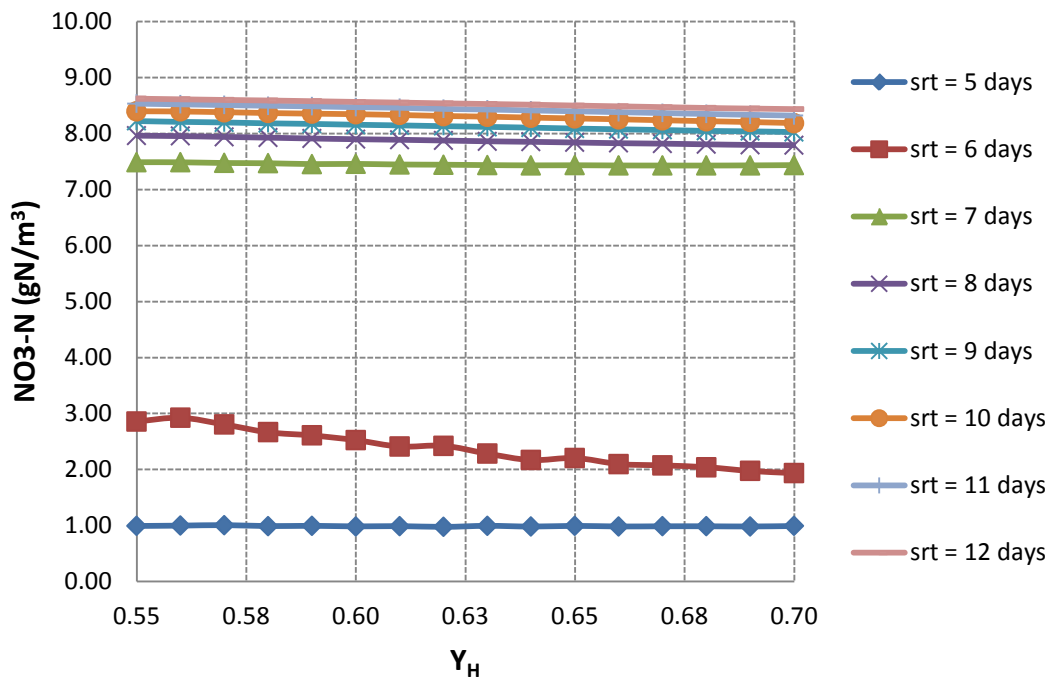
Σχήμα 6-13 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-14 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-15 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-16 Διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή για διαφορετικές τιμές χρόνου παραμονής στερεών και συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας

6.3 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσεως του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας

Όπως και με τον συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας, είναι εξίσου σημαντικό να αξιολογηθεί η ποσοτική και ποιοτική επίδραση του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας στις εξεταζόμενες παραμέτρους, ειδικότερα αν ληφθεί υπόψη η σημασία των αυτοτροφικών μικροοργανισμών στη διεργασία της νιτροποίησης.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αύξηση του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικών οργανισμών, σε αντίθεση με αυτή των ετεροτροφικών (σχήμα 6-17 & σχήμα 6-9), οδηγεί σε πολύ μικρή αύξηση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα. Η εξήγηση είναι, ότι οι αυτοτροφικοί μ/ο αποτελούν ένα πολύ μικρό μέρος των ολικών αιωρούμενων στερεών και συνεπώς η αύξηση αυτή είναι αμελητέα. Μάλιστα, φαίνεται να υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών ($R^2 = 0.99$ για γραμμή τάσης 1^{ου} βαθμού). Τέλος, σε όλες τις παραπάνω αναλύσεις, η συγκέντρωση των στερεών βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων για την ομαλή και οικονομική λειτουργία του αερισμού ($2000 < MLSS < 5000$).

Από το σχήμα 6-18, προκύπτει ότι η συνολική απαίτηση σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από το συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικών μικροοργανισμών (σχήμα 6-18). Επίσης, παράλληλα με την αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών, αυξάνονται και οι απαιτήσεις της εγκατάστασης σε αέρα, ενώ οι πολύ μικρές απαιτήσεις για χρόνο παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών οφείλονται στην απουσία νιτροποίησης, όπως προκύπτει και από το σχήμα 6-22 και έχει προαναφερθεί και στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων κατά την ανάλυση ευαισθησίας της ετεροτροφικής βιομάζας.

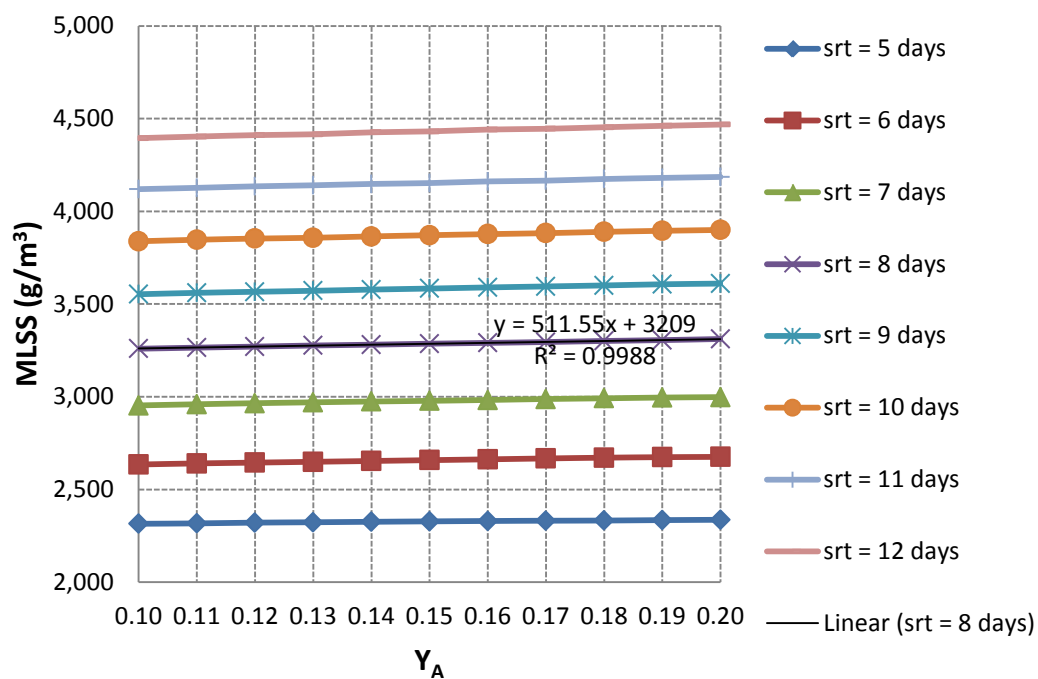
Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, παρατηρείται συμμόρφωση της Ε.Ε.Λ. με τις απαιτήσεις της οδηγίας για συγκέντρωση ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή, ενώ ο συντελεστής παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας δεν επηρεάζει πρακτικώς τα αποτελέσματα (σχήμα 6-18). Οι μικρές διαφορές που καταγράφονται στη συγκέντρωση του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής (σχήμα 6-19) οφείλονται κατά πάσα πιθανότητα σε δευτερογενή φαινόμενα, όπως αυτό της φθοράς της βιομάζας.

Επιπλέον, η εγκατάσταση είναι συμβατή ως προς τις απαιτήσεις της οδηγίας για τη συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή, η οποία μάλιστα, όπως φαίνεται και από το σχήμα 6-20, δεν επηρεάζεται αποφασιστικά από το συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας.

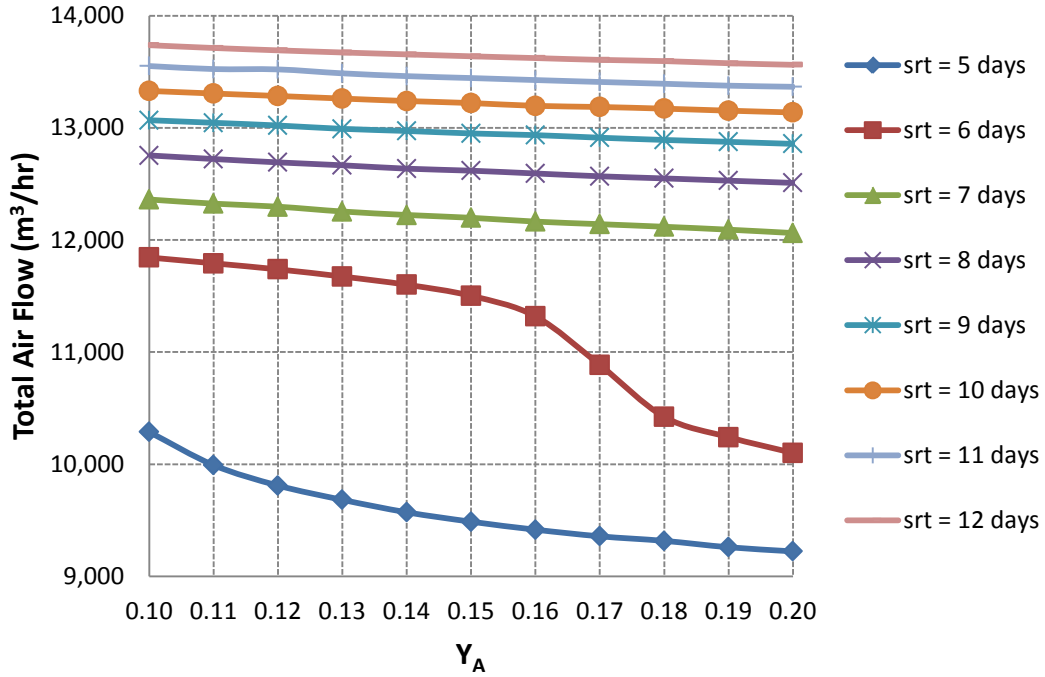
Για $srt = 5$ & 6 d παρατηρείται υπέρβαση των ορίων της οδηγίας για τη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή (σχήμα 6-21), γεγονός που οφείλεται στην απουσία νιτροποίησης, όπως προαναφέρθηκε. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η εγκατάσταση λειτουργεί σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία. Η συγκέντρωση μάλιστα του ολικού

αζώτου και των αμμωνιακών δεν επηρεάζεται από το συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.

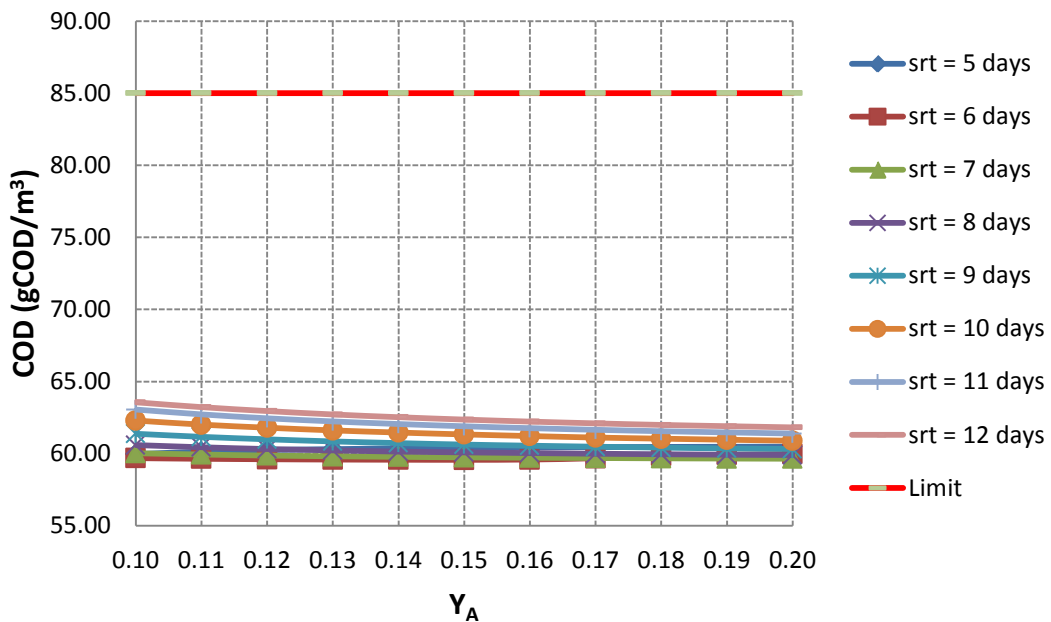
Όσον αφορά στη συγκέντρωση νιτρικών στην εκροή, αυτή είναι ανεξάρτητη από το συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας, όπως διακρίνεται στο σχήμα 6-23. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από το συγκεκριμένο γράφημα είναι ότι η ολική συγκέντρωση αζώτου στην εκροή είναι κυρίως η συγκέντρωση νιτρικών, σε ποσοστό μάλιστα άνω του 80 % σε πολλές περιπτώσεις. Τέλος, για χρόνο παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών εμφανίζονται μικρές συγκεντρώσεις λόγω της απουσίας νιτροποίησης.



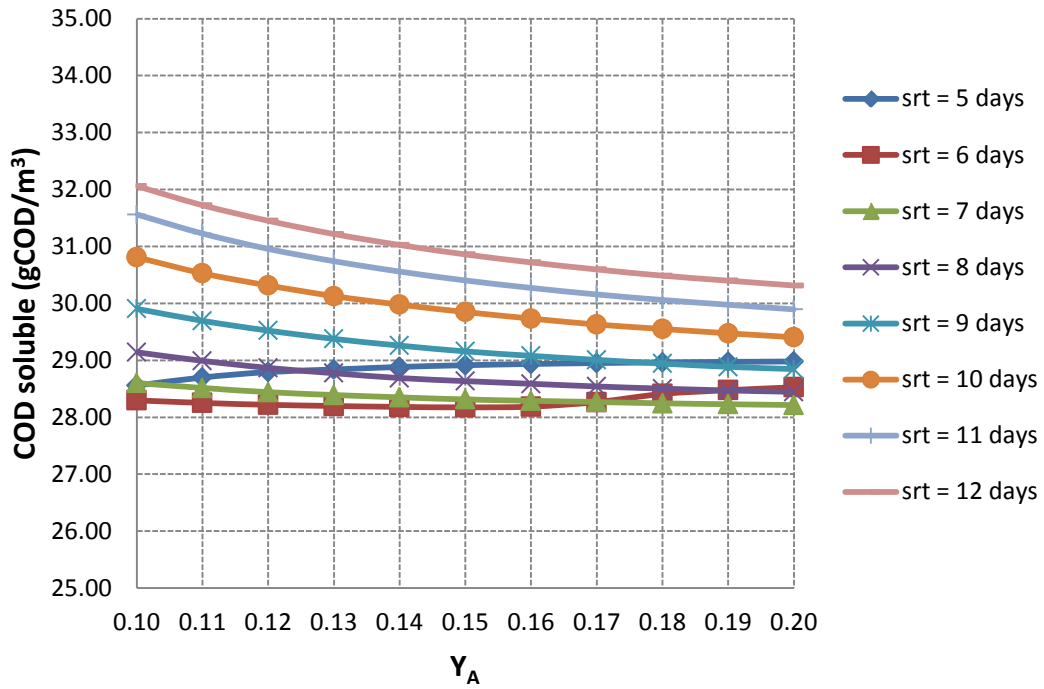
Σχήμα 6-17 Διακύμανση της συγκέντρωσης ολικών στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας



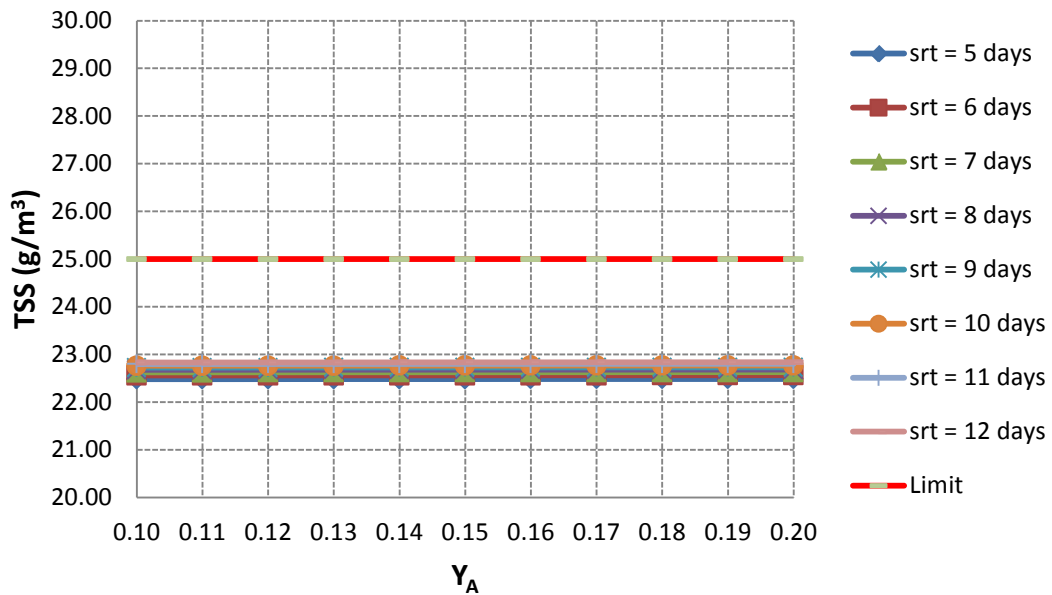
Σχήμα 6-18 Διακύμανση της ολικής απαίτησης σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας



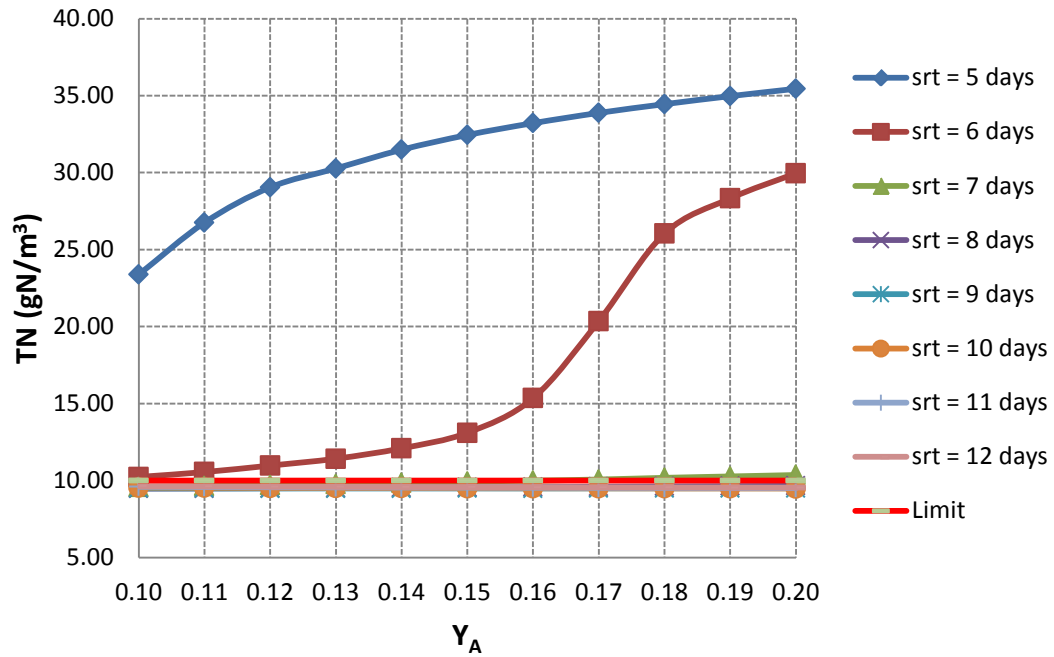
Σχήμα 6-19 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας



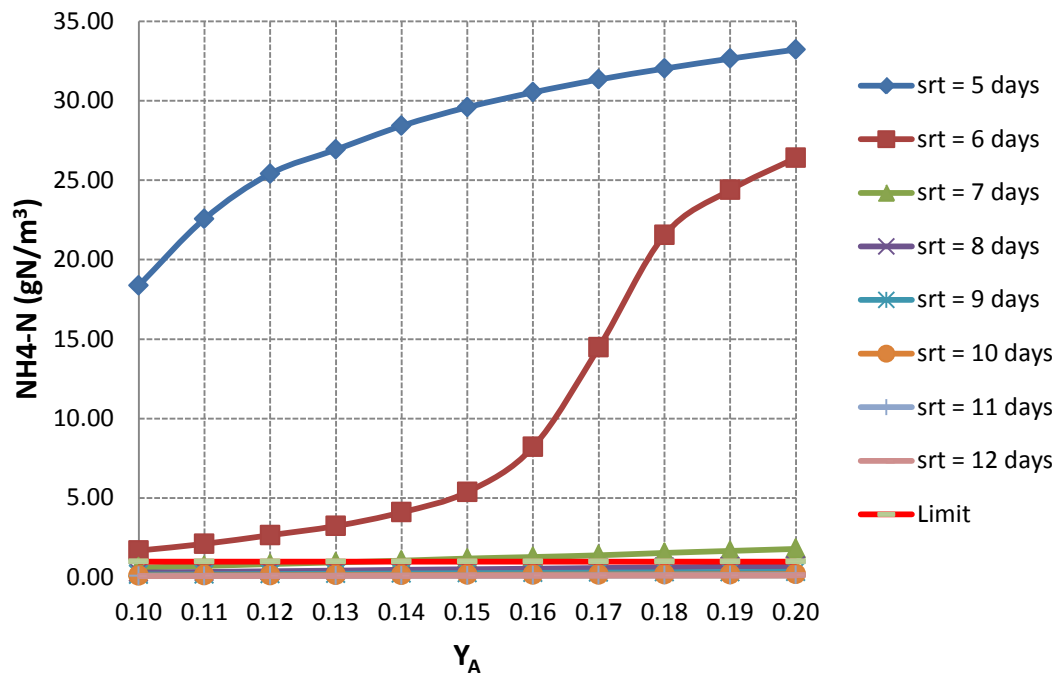
Σχήμα 6-20 Διακόμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας



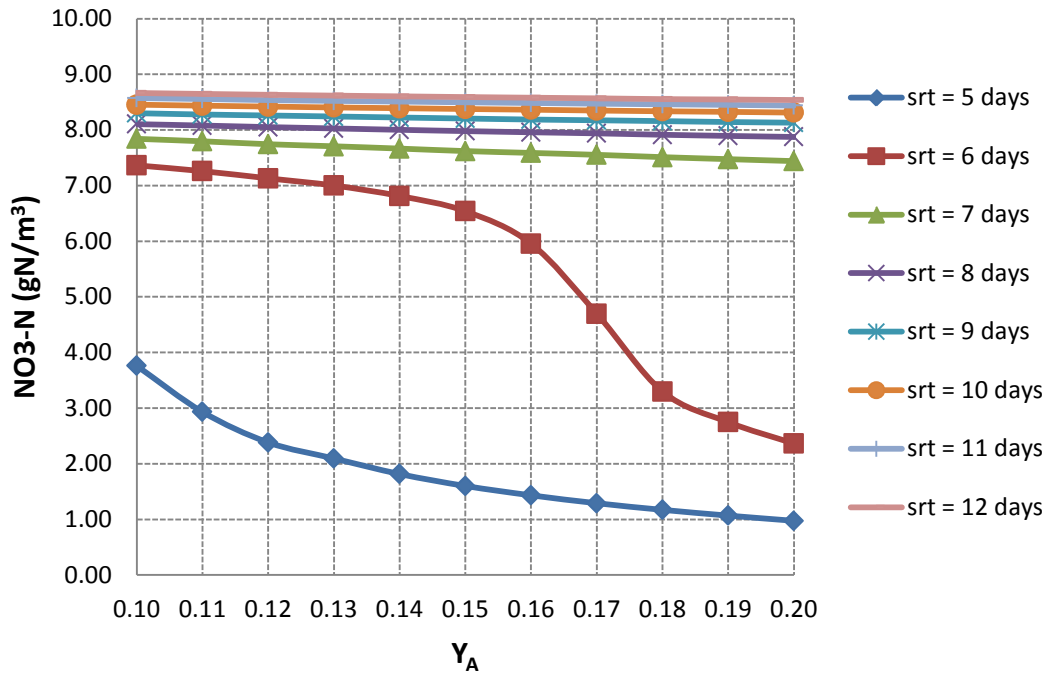
Σχήμα 6-21 Διακόμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-22 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-23 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-24 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών νιτρικών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής αυτοτροφικής βιομάζας

6.4 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας

Ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας ($\mu_{\max H}$) είναι μία στοιχειομετρική παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου μέσω της διεργασίας της ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες.

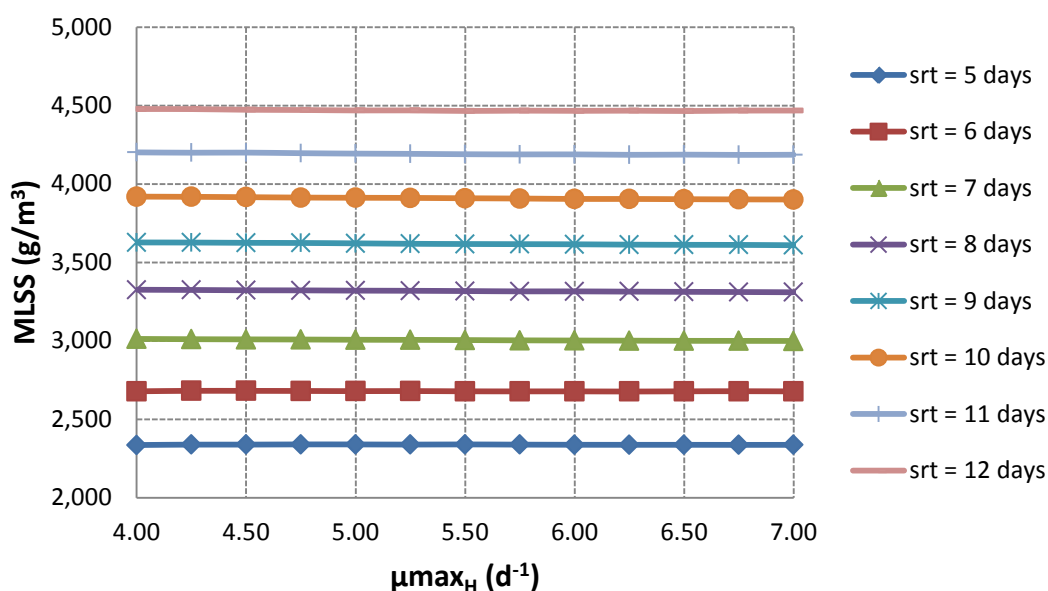
Βάσει του σχήματος 6-25, συμπεραίνεται ότι η συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στη δεξαμενή είναι ανεξάρτητη του $\mu_{\max H}$. Επιπλέον, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει συσχέτιση της συνολικής απαίτησης σε αέρα της εγκατάστασης με το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών (σχήμα 6-26). Οι χαμηλές τιμές για χρόνους παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών οφείλονται στην απουσία νιτροποίησης, το οποίο διακρίνεται και στο σχήμα 6-31.

Όσον αφορά τη συγκέντρωση ολικών στερεών στην εκροή, η Ε.Ε.Λ. βρίσκεται σε συμφωνία με τα όρια της οδηγίας για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Ακόμη, η συγκεκριμένη μεταβλητή σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι ανεξάρτητη του $\mu_{\max H}$ και του srt (σχήμα 6-27). Το παραπάνω είναι αναμενόμενο, καθώς η συγκεκριμένη συγκέντρωση εξαρτάται κυρίως από την φόρτιση στερεών των δεξαμενών καθίζησης, η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση των διαστάσεων των

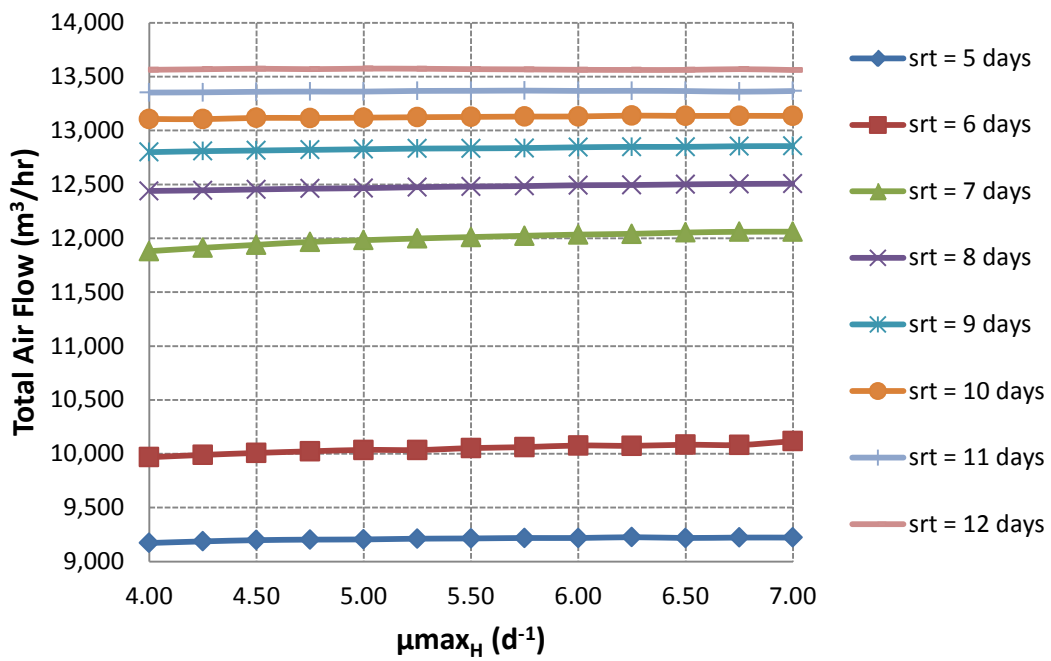
δεξαμενών, της παροχής εισροής και επανακυκλοφορίας και της συγκέντρωσης ολικών αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα.

Ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας δεν επηρεάζει τη συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην εκροή (σχήμα 6-28) για τους δεδομένους χρόνους παραμονής στερεών. Αυτό οφείλεται πιθανότητα σε υπερδιαστασιολόγηση του βιολογικού αντιδραστήρα, οπότε και για μικρότερες τιμές του $\mu_{\max H}$ δεν παρατηρείται αδυναμία απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου. Σε όλα τα σενάρια μάλιστα, η εγκατάσταση λειτουργεί εντός των ορίων της οδηγίας ως προς το $COD_{\text{εκροής}}$. Οι πολύ μικρές διαφορές που παρατηρούνται στη συγκέντρωση διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή σε σχέση με το χρόνο παραμονής στερεών (σχήμα 6-29) είναι πιθανώς αποτέλεσμα δευτερογενών φαινομένων, όπως αυτό της φθοράς της βιομάζας.

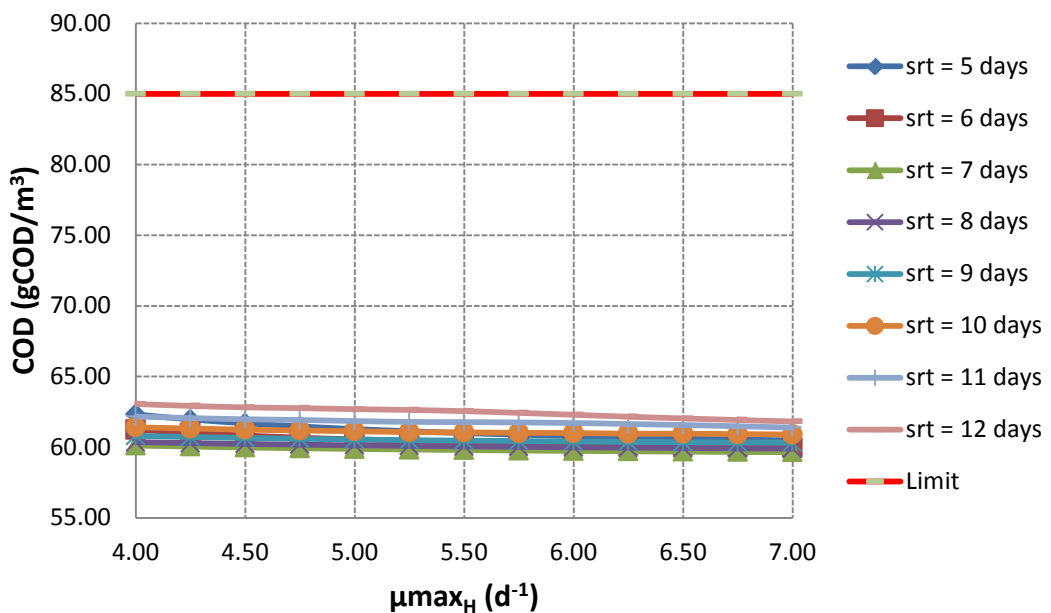
Για χρόνο παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών, παρατηρείται ουσιαστικά αδυναμία απομάκρυνσης αζώτου, ενώ για όλους τους άλλους χρόνους παραμονής η εγκατάσταση βρίσκεται οριακά εντός ορίων, σύμφωνα με τα στοιχεία του σχήματος 6-30. Ειδικότερα, για όλα τις περιπτώσεις με $\mu_{\max H} \geq 6 \text{ d}^{-1}$ και $srt \geq 7 \text{ d}$ μπορεί να θεωρηθεί ότι η εγκατάσταση λειτουργεί ικανοποιητικά, ενώ για $srt \leq 6 \text{ d}$ δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση (σχήμα 6-31). Ακόμη, για $srt \geq 8 \text{ d}$ ικανοποιείται το όριο του 1 gN/m^3 ανεξαρτήτως μεγίστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας. Τέλος, σχετικά με τη συγκέντρωση νιτρικών στην εκροή, καταγράφεται ανεξαρτησία της μεταβλητής από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας (σχήμα 6-32).



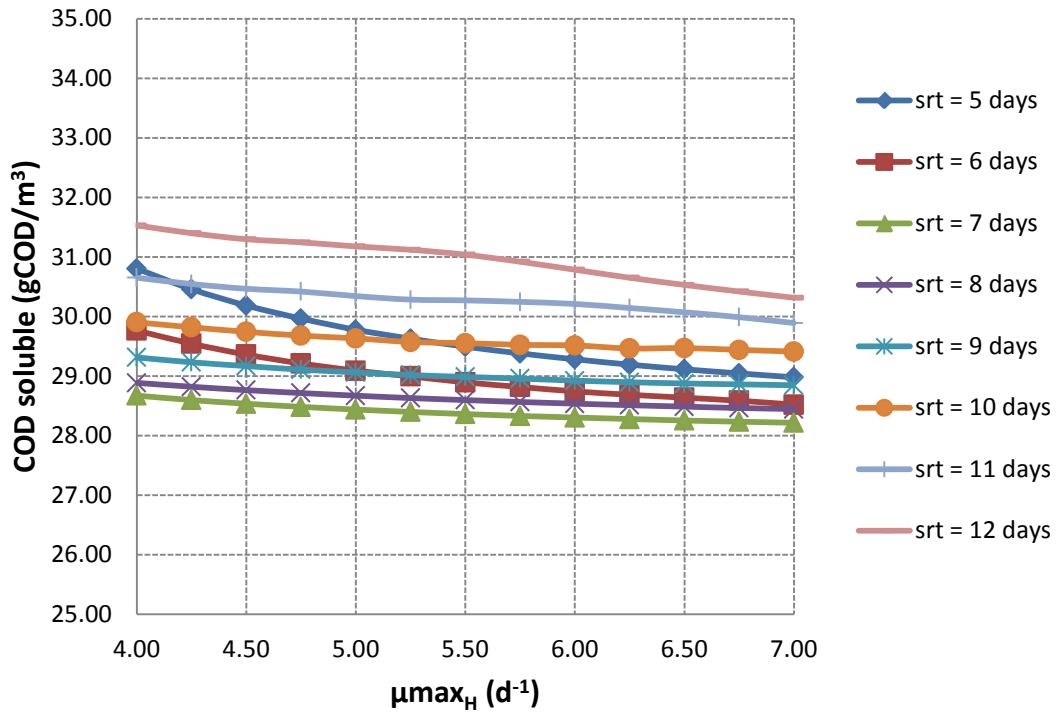
Σχήμα 6-25 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας



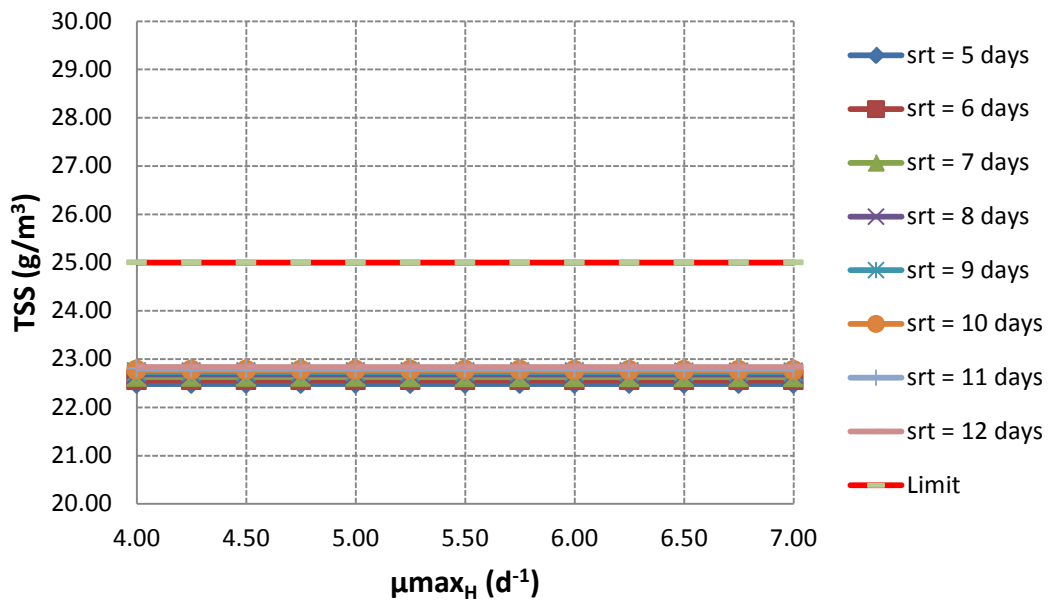
Σχήμα 6-26 Διακύμανση της ολικής απαίτησης σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας



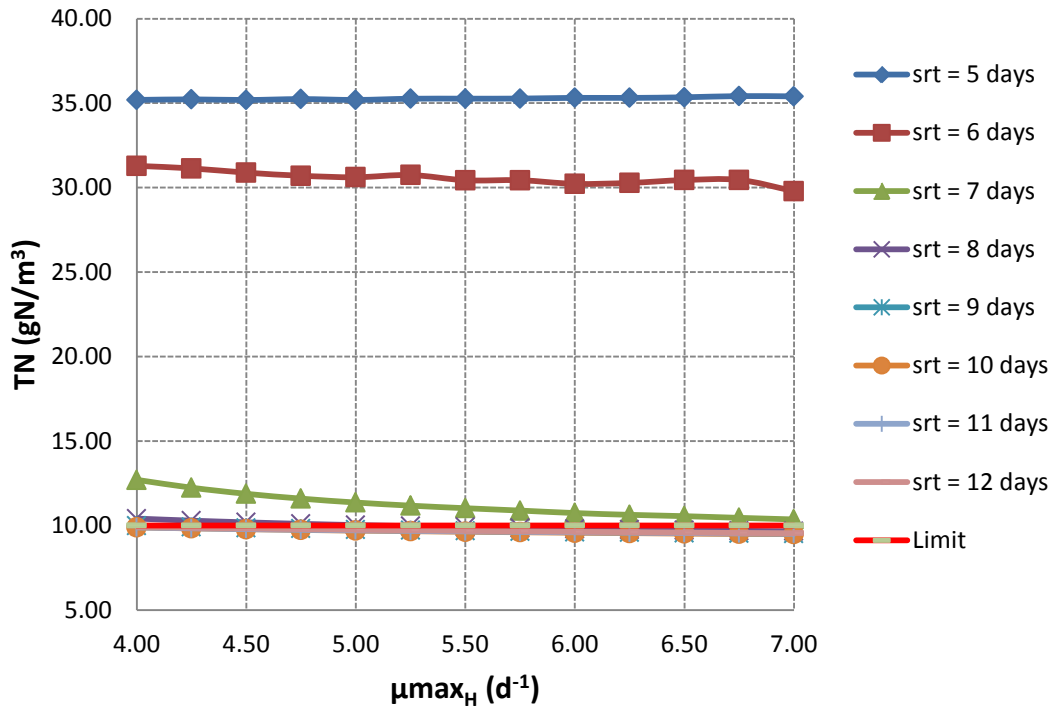
Σχήμα 6-27 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας



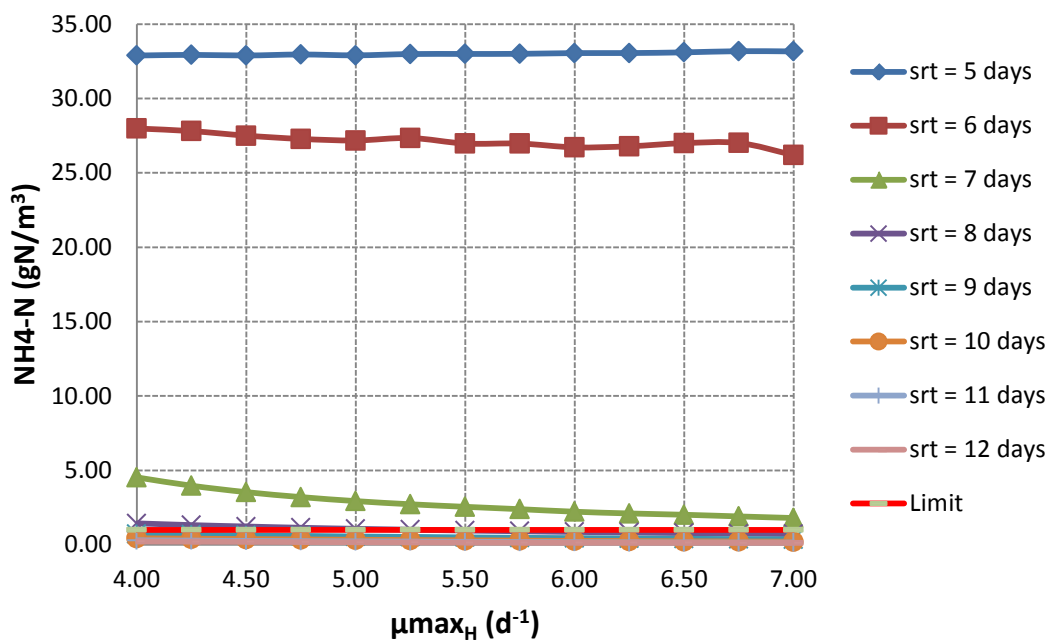
Σχήμα 6-28 Διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας



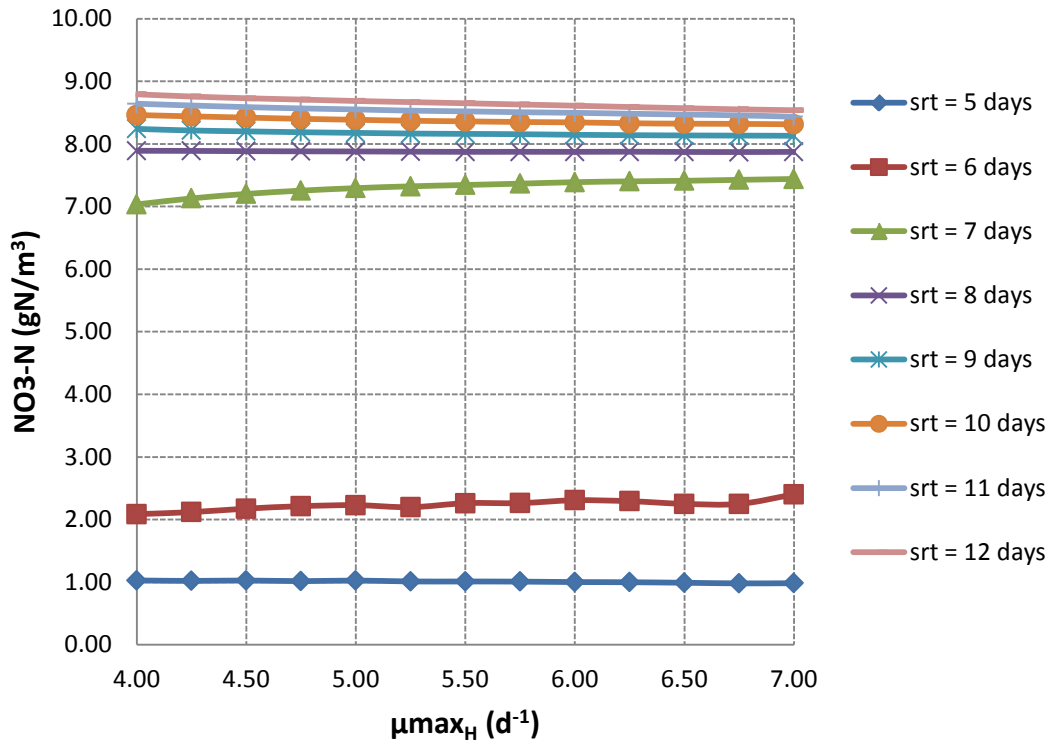
Σχήμα 6-29 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-30 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-31 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-32 Διακόμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας

6.5 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης της εγκατάστασης συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας

Ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας, επηρεάζει δραστικά τη διαδικασία της νιτροποίησης, η οποία είναι ένας από τους κρίσιμους παράγοντες, αν όχι ο κρίσιμότερος, για την συμμόρφωση της εγκατάστασης με τα όρια της οδηγίας. Έχει παρατηρηθεί πως η μεταβλητή αυτή σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, ενώ παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ακόμα και σε διαφορετικά δείγματα της ίδιας πηγής λυμάτων, οδηγώντας πολλούς ερευνητές στην άποψη ότι το μ_{max_A} δεν θα πρέπει να κατηγοριοποιείται ως κινητική παράμετρος, αλλά ως χαρακτηριστικό των λυμάτων (Henze et al, 2008). Κρίνεται λοιπόν σκόπιμη η μελέτη της απόκρισης της Ε.Ε.Λ. για διάφορες τιμές της παραπάνω μεταβλητής.

Σύμφωνα με το σχήμα 6-33, δεν παρατηρείται πρακτική διαφοροποίηση των ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα σε σχέση με το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών. Επιπρόσθετα, η ολική απαίτηση σε αέρα της εγκατάστασης σταθεροποιείται ανεξαρτήτως του χρόνου παραμονής στερεών, εκτός των πέντε και έξι ημερών, για μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών μεγαλύτερο ή ίσο του 0.7 d^{-1} (σχήμα 6-34). Για

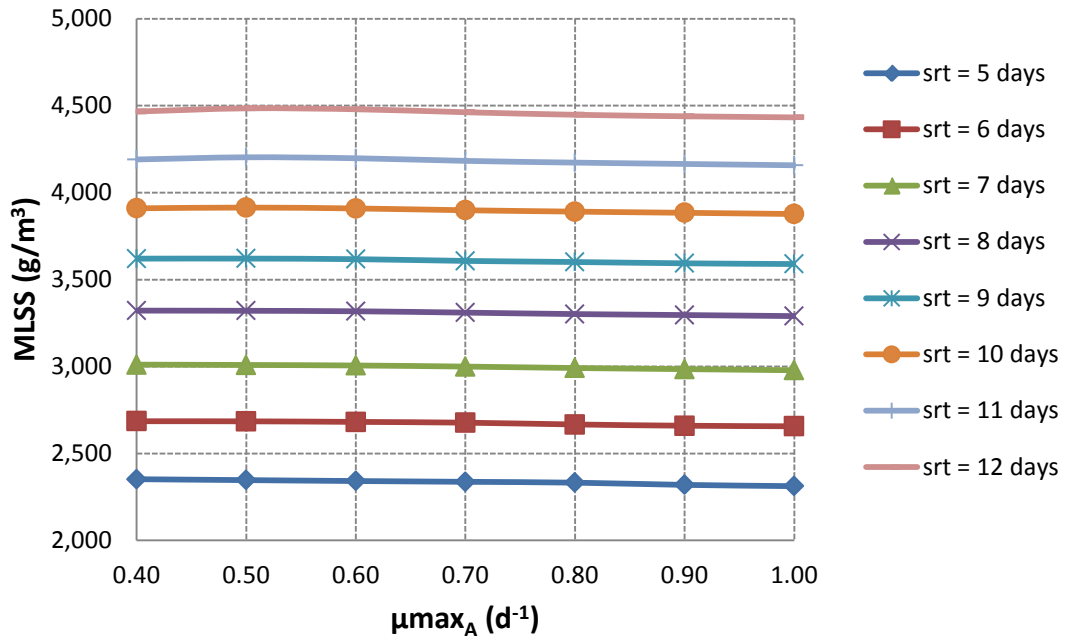
μεγαλύτερη αναχαίτιση του ρυθμού ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, και ανάλογα με το χρόνο παραμονής στερεών, παρατηρείται απότομη πτώση της απαίτησης της εγκατάστασης σε οξυγόνο, γεγονός που οφείλεται στην απουσία νιτροποίησης, όπως προκύπτει και από το σχήμα 6-39.

Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, η Ε.Ε.Λ. βρίσκεται εντός των ορίων της οδηγίας, αναφορικά με τη συγκέντρωση του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή (σχήμα 6-35). Επίσης, παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου της εκροής ανάλογα με το χρόνο παραμονής στερεών και για μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης αυτοτροφικών μικροοργανισμών μεγαλύτερο ή ίσο με 0.65 d^{-1} , δηλαδή για αναχαίτιση μικρότερη ή ίση με 19 %, θεωρώντας ως τυπική τιμή του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης αυτοτροφικών μικροοργανισμών $\mu_{\max A} = 0.8 \text{ d}^{-1}$. Ομοίως, παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου για μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας μεγαλύτερο ή ίσο του 0.65 1/d (σχήμα 6-36).

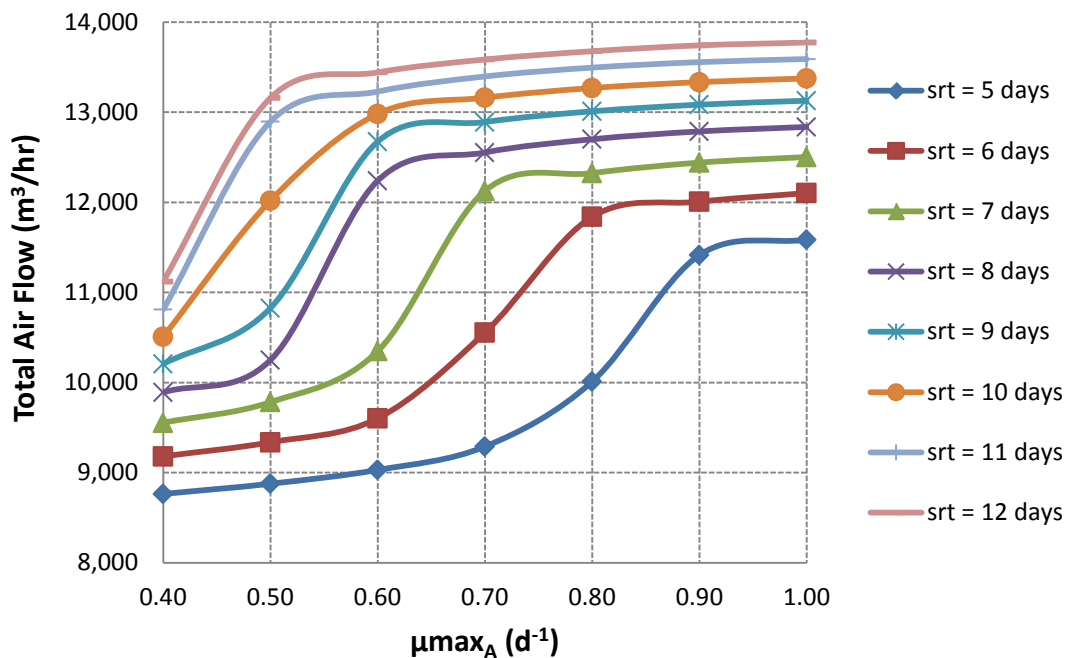
Η εγκατάσταση βρίσκεται σε συμφωνία με τα όρια της οδηγίας για τη συγκέντρωση στερεών στην εκροή για όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, παρατηρείται πρακτική ανεξαρτησία της συγκέντρωσης από τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης αυτοτροφικών μικροοργανισμών (σχήμα 6-37).

Η δεδομένη Ε.Ε.Λ. λειτουργεί εντός των ορίων της οδηγίας ως προς την συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή για χρόνους παραμονής στερεών μεγαλύτερους των οκτώ ημερών και για μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης αυτοτροφικής βιομάζας μεγαλύτερο ή ίσο με 0.6 d^{-1} (σχήμα 6-38). Δηλαδή, ακόμη και σε περιπτώσεις που παρατηρείται έως και 25 % αναχαίτιση του $\mu_{\max A}$ σε σχέση με τη θεωρητικά μέγιστη δυνατή τιμή, η εκροή δεν ξεφεύγει από τα όρια της οδηγίας. Ομοίως, από το σχήμα 6-39, προκύπτει πως για $\mu_{\max A} \geq 0.6 \text{ 1/d}$ η εγκατάσταση συμμορφώνεται με τη συμβατική απαίτηση για συγκέντρωση αμμωνιακών στην εκροή μικρότερη ή ίση του 1 gN/m^3 για όλους τους χρόνους παραμονής στερεών μεγαλύτερους ή ίσους των οκτώ ημερών. Καθώς η απονιτροποίηση πραγματοποιείται αφού έχει προηγηθεί η διαδικασία της νιτροποίησης, οι πολύ μικρές τιμές της συγκέντρωσης νιτρικών στην εκροή στο σχήμα 6-40 είναι πλασματικές. Οι τιμές που έχουν πρακτική σημασία είναι αυτές που βρίσκονται περί τα 8 gN/m^3 , οπότε και εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ολική συγκέντρωση αζώτου στην εκροή είναι κυρίως η συγκέντρωση νιτρικών, σε ποσοστό μάλιστα άνω του 80 % σε πολλές περιπτώσεις.

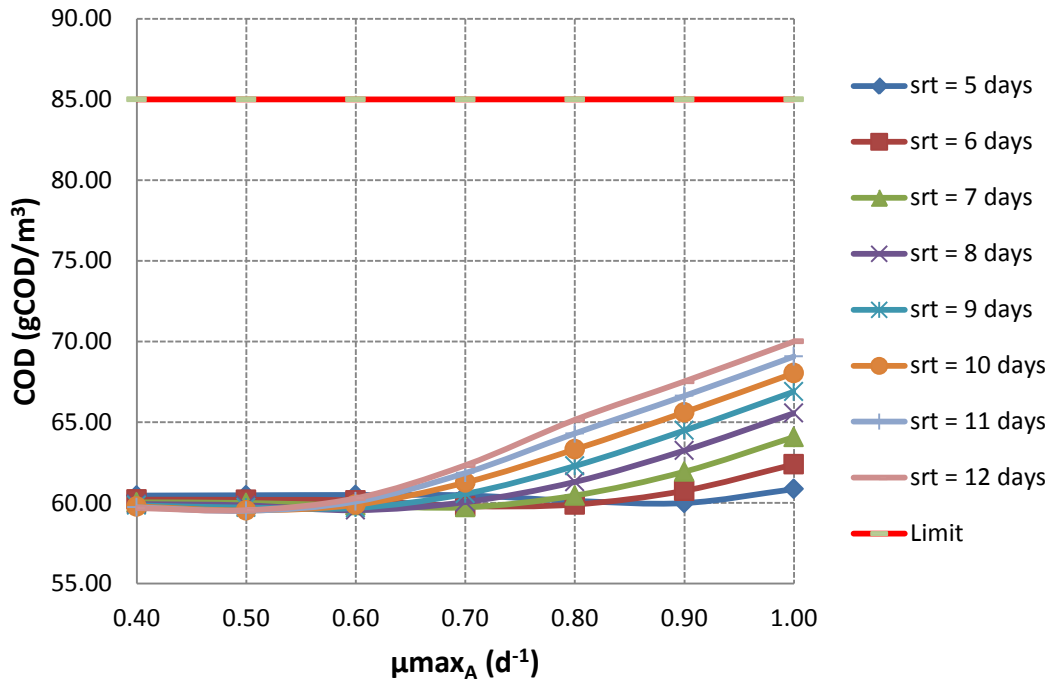
Τέλος να σημειωθεί πως η συμπεριφορά όλων των μεταβλητών, εκτός του MLSS, συναρτήσεως του $\mu_{\max A}$ είναι ανάλογη με αυτή συναρτήσεως της θερμοκρασίας, κάτι αναμενόμενο καθώς όπως προαναφέρθηκε, η θερμοκρασία είναι ένας κρίσιμος παράγοντας και επηρεάζει σημαντικά τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών $\mu_{\max A,T}$.



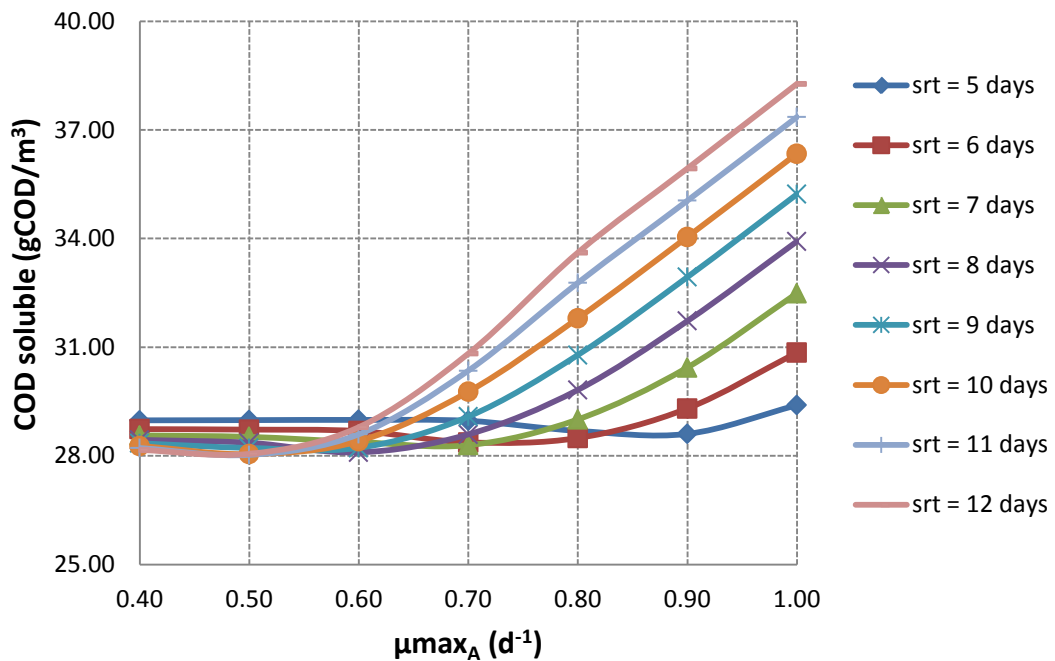
Σχήμα 6-33 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



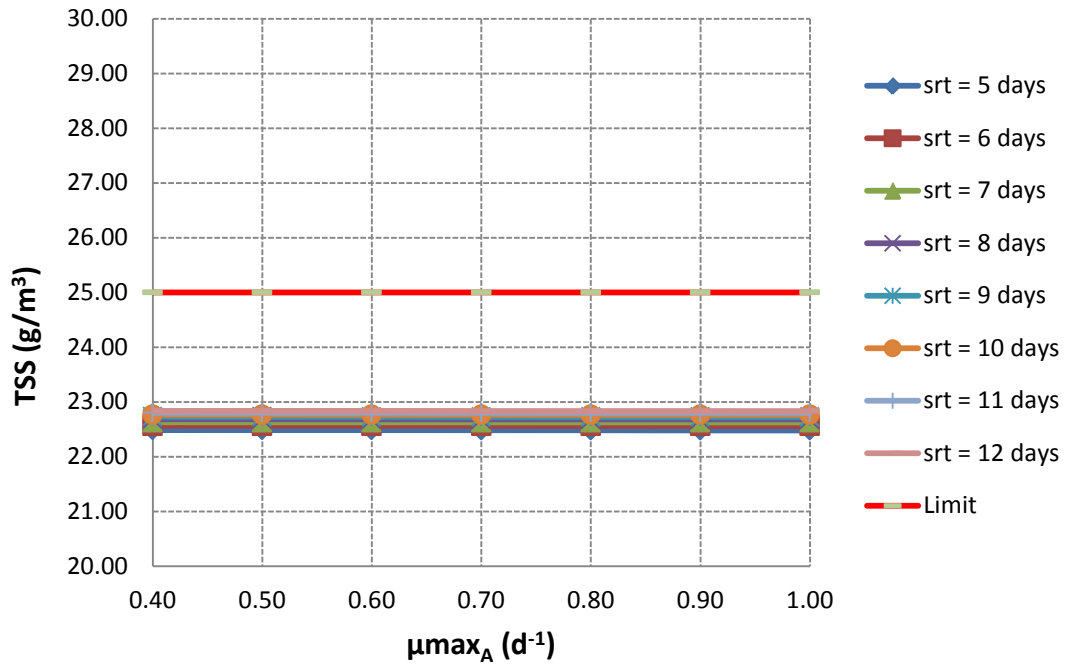
Σχήμα 6-34 Διακύμανση της ολικής απαίτησης σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



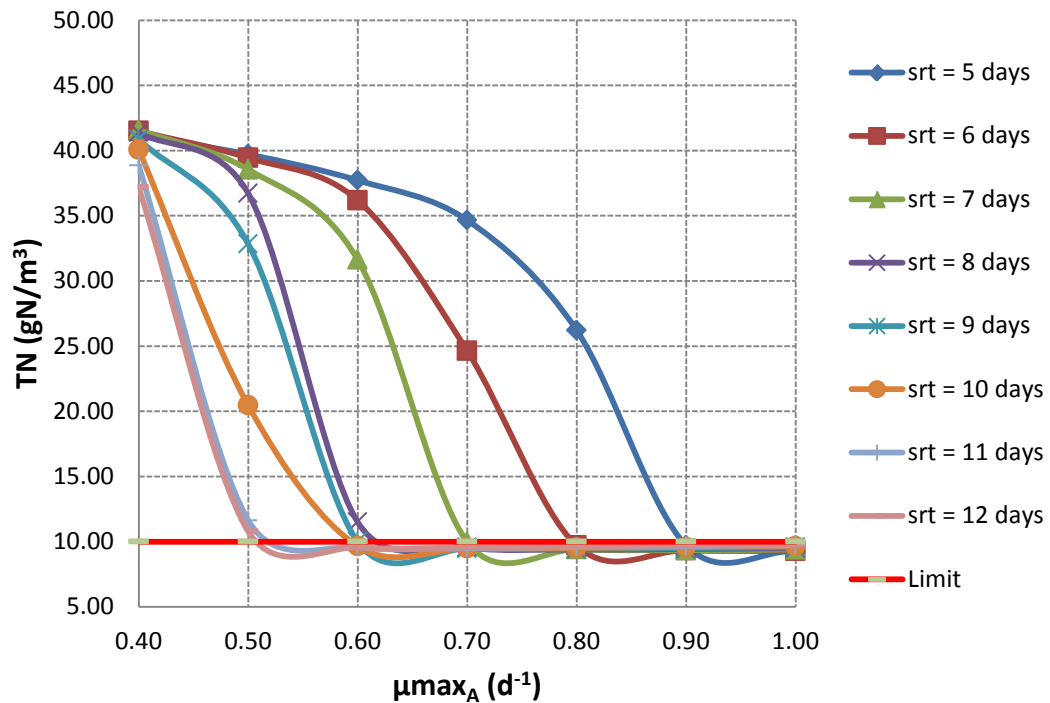
Σχήμα 6-35 Διακόμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



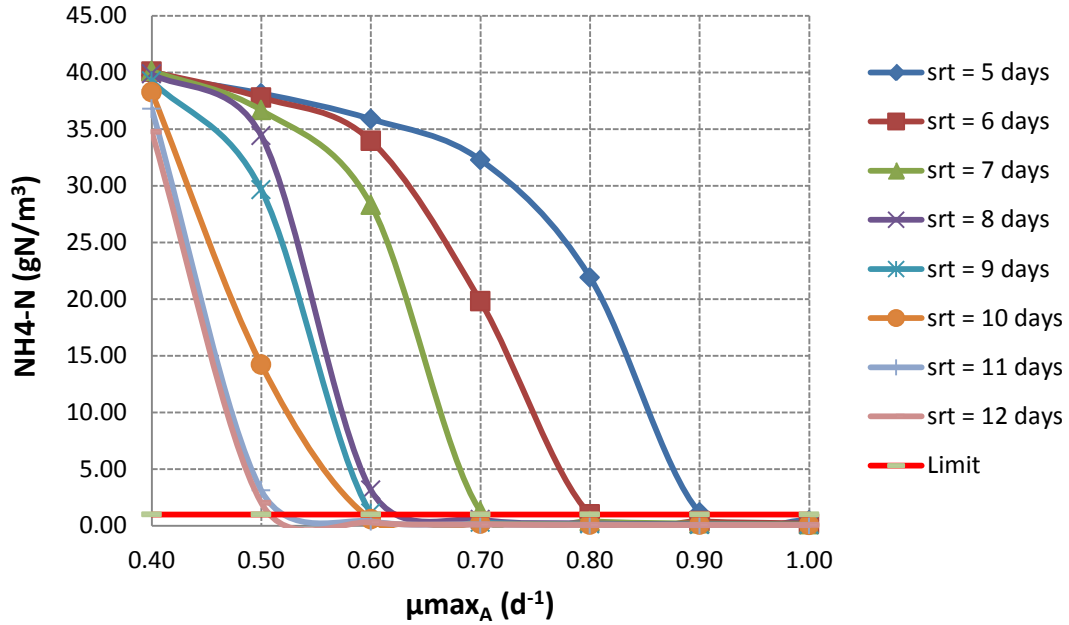
Σχήμα 6-36 Διακόμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



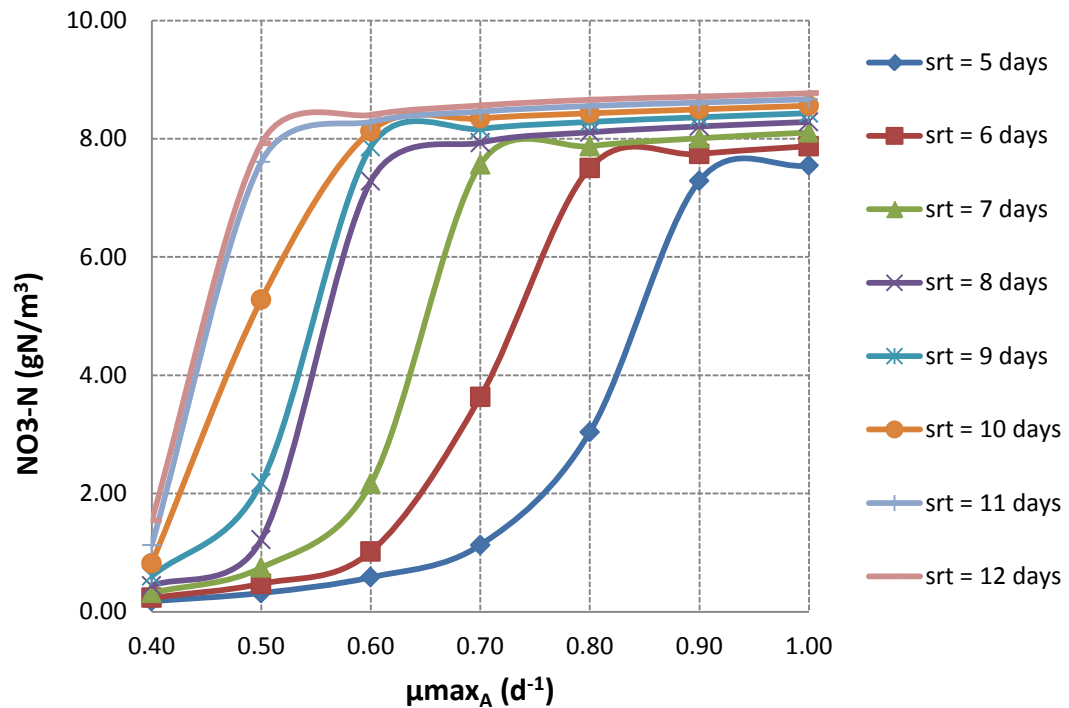
Σχήμα 6-37 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-38 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-39 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6-40 Διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή για διαφορετικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας

6.6 Γενικές παρατηρήσεις για κάθε μία από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν

- **MLSS:** εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής στερεών, το συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας και τη θερμοκρασία των λυμάτων. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα είναι ανάλογη των δύο πρώτων μεταβλητών, αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, ενώ πρακτικώς είναι ανεξάρτητη από τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης τόσο της ετεροτροφικής όσο και της αυτοτροφικής βιομάζας. Σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν, η συγκέντρωση είναι εντός των συμβατικών ορίων για την ομαλή και οικονομική λειτουργία του αερισμού ($2000 < \text{MLSS} < 5000$).
- **Total Air Flow:** Η ολική απαίτηση της εγκατάστασης σε αέρα είναι ανάλογη του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας και αντιστρόφως ανάλογη του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας. Επίσης δεν εξαρτάται πρακτικώς από τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας. Τέλος σημαντικός παράγοντας είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας καθώς από αυτόν εξαρτάται κυρίως η πραγματοποίηση της νιτροποίησης. Συγκεκριμένα, για τα σενάρια που δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση, η ολική απαίτηση σε αέρα ελαττώνεται αισθητά, όπως ήταν φυσικό.
- **COD:** Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια η εγκατάσταση λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής οδηγίας. Η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου στην έξοδο της εγκατάστασης εξαρτάται κυρίως από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας. Πιο συγκεκριμένα, για τιμές της παραπάνω μεταβλητής έως και 0.65 d^{-1} , η συγκέντρωση οργανικού φορτίου παραμένει σταθερή, ενώ για μεγαλύτερες τιμές παρατηρείται σχέση αναλογίας. Ακόμη, σχέση αναλογίας υπάρχει και με τον χρόνο παραμονής στερεών, οι διαφορές όμως στην τιμή εκροής είναι πολύ μικρές και πιθανότατα είναι απόρροια δευτερογενών παραγόντων, όπως η φθορά των μικροοργανισμών.
- **COD soluble:** Ισχύουν τα ίδια με τη συγκέντρωση οργανικού φορτίου.
- **TSS:** Η εγκατάσταση πληροί τις απαιτήσεις της οδηγίας σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Επίσης, η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή δεν επηρεάζεται πρακτικώς από καμία από τις μεταβλητές που εξετάστηκαν.
- **NH₄-N:** Για χρόνο παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση, ενώ ακόμα και για χρόνο ίσο με επτά ημέρες, σε πολλές περιπτώσεις, η εγκατάσταση βρίσκεται εκτός των συμβατικών ορίων. Η

κατάσταση βελτιώνεται αισθητά για μεγαλύτερες τιμές της θερμοκρασίας, οπότε και παρατηρείται συμμόρφωση με την οδηγία ακόμα και για $srt = 6 \text{ d}$ για αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό Κελσίου. Σημαντικότερος παράγοντας είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας. Σε περιπτώσεις που παρατηρείται έως και 25 % αναχαίτιση του μ_{maxA} σε σχέση με την θεωρητικά μέγιστη δυνατή τιμή (0.8 d^{-1}), η εκροή δεν ξεφεύγει από τα συμβατικά όρια, σε αντίθεση με χαμηλότερες τιμές του συντελεστή.

- **NO₃-N:** Το σημαντικότερο στοιχείο που εξάγεται από τα διαγράμματα είναι ότι η ολική συγκέντρωση αζώτου στην εκροή είναι κυρίως η συγκέντρωση νιτρικών, σε ποσοστό μάλιστα άνω του 80 % σε πολλές περιπτώσεις. Για να λειτουργήσει, λοιπόν, η εγκατάσταση πιο αποδοτικά ως προς τη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μεγαλύτερη απονιτροποίηση. Επίσης, η συγκεκριμένη συγκέντρωση είναι πρακτικά ανεξάρτητη όλων των εξεταζόμενων μεταβλητών πλην του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας και της θερμοκρασίας των λυμάτων, καθώς οι δύο παραπάνω μεταβλητές επηρεάζουν την διεργασία της νιτροποίησης. Τέλος, για χρόνους παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών έχουμε μικρές τιμές νιτρικών, λόγω απουσίας νιτροποίησης.

- **TN:** Ισχύουν τα ίδια με την συγκέντρωση νιτρικών. Τα νιτρικά άλλωστε είναι αυτά που επηρεάζουν πολύ την συγκέντρωση ολικού αζώτου, και σε περιπτώσεις που δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση, η εγκατάσταση ξεφεύγει από τα όρια της Ευρωπαϊκής οδηγίας.

Από τις τέσσερις στοιχειομετρικές και κινητικές μεταβλητές για τις οποίες πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, η μεταβλητή που επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, μ_{maxA} . Ειδικότερα, επηρεάζεται η διεργασία της νιτροποίησης, όπως άλλωστε είναι φυσικό. Η διεργασία αυτή σχετίζεται με τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών, των νιτρικών και του ολικού αζώτου στην εκροή, όπως επίσης και με την ολική απαίτηση της εγκατάστασης σε αέρα. Για τον λόγο αυτό, στον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, επιλέχτηκε να μεταβάλλεται ο χρόνος παραμονής στερεών και ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στο παρόν μέρος της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας της εγκατάστασης. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, όπως είναι γνωστό, σχεδιάζονται για μία συγκεκριμένη παροχή εισροής με δεδομένα χαρακτηριστικά λυμάτων. Στην διάρκεια των ετών λειτουργίας όμως, τόσο η παροχή όσο και τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να μεταβληθούν, οδηγώντας σε δυσμενέστερα σενάρια φόρτισης της εγκατάστασης. Έτσι, λοιπόν, ο υπεύθυνος λειτουργίας θα πρέπει να εξετάσει κατά πόσο η Ε.Ε.Λ. με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τα οποία έχει μπορεί να ανταποκριθεί στις νέες αυτές απαιτήσεις. Το παραπάνω πραγματοποιείται μέσω του ελέγχου επάρκειας της εγκατάστασης.

7.1 Έλεγχος επάρκειας για τα λειτουργικά δεδομένα

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας για τα λειτουργικά δεδομένα της εγκατάστασης, δηλαδή για τις τιμές λειτουργίας, τόσο των στοιχειομετρικών και κινητικών μεταβλητών όσο και των μηχανολογικών δεδομένων. Σκοπός των προσομοιώσεων αυτών ήταν να προσδιοριστεί ο κρίσιμος παράγοντας αστοχίας της εγκατάστασης και να βρεθούν τρόποι βελτίωσης της λειτουργίας, χωρίς να χρειαστεί μεταβολή των διαστάσεων των επιμέρους μονάδων.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 7-1, η εγκατάσταση λειτουργεί εντός συμβατικών ορίων συγκέντρωσης στερεών στον Β.Α. για οικονομική και ομαλή λειτουργία αερισμού μέχρι και για 30 % αύξηση της παροχής εισροής, ενώ η συγκέντρωση στερεών αυξάνει κατά 10 % για βαθμιαία αύξηση της παροχής εισροής σε μικρές παροχές.

Ακόμη, παρατηρείται αναλογική σχέση εξάρτησης της ολικής απαίτησης της εγκατάστασης σε αέρα από την παροχή εισροής (σχήμα 7-2). Ομοίως με τη συγκέντρωση στερεών, η αύξηση της ολικής απαίτησης σε αέρα για βαθμιαία αύξηση της παροχής, ξεκινάει με 10 % και μειώνεται γραμμικά σε 1 % αύξηση για μεγάλες τιμές της παροχής εισροής.

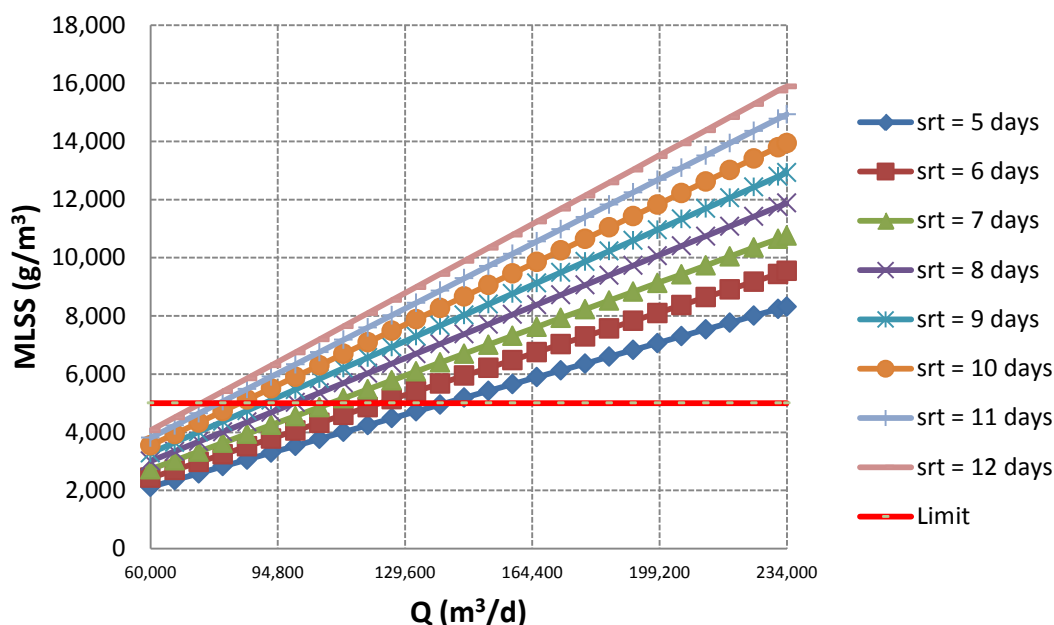
Η συγκέντρωση οργανικού φορτίου, όπως προκύπτει από όλα τα γραφήματα, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανοχή στην αύξηση της παροχής εισόδου. Ειδικότερα, ακόμα και για αύξηση της παροχής εισροής κατά 140 %, η εγκατάσταση λειτουργεί εντός των ορίων της οδηγίας, σύμφωνα με το σχήμα 7-3. Επίσης, η συγκέντρωση διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή (σχήμα 7-4) δεν επηρεάζεται πρακτικά από την αύξηση της παροχής ακόμη και στο 350 % της πραγματικής εισροής. Παρατηρείται μόνο μία μικρή αύξηση για χρόνους παραμονής πέντε και έξι ημερών.

Η συγκέντρωση ολικών στερεών στην εκροή παρουσιάζει μικρή ανοχή ως προς την αύξηση της παροχής εισροής. Συγκεκριμένα, μέχρι και για 30 % αύξηση της παροχής εισόδου, η εγκατάσταση λειτουργεί εντός των ορίων της οδηγίας, ενώ παρατηρείται πρακτική ανεξαρτησία από τον χρόνο παραμονής στερεών (σχήμα 7-5).

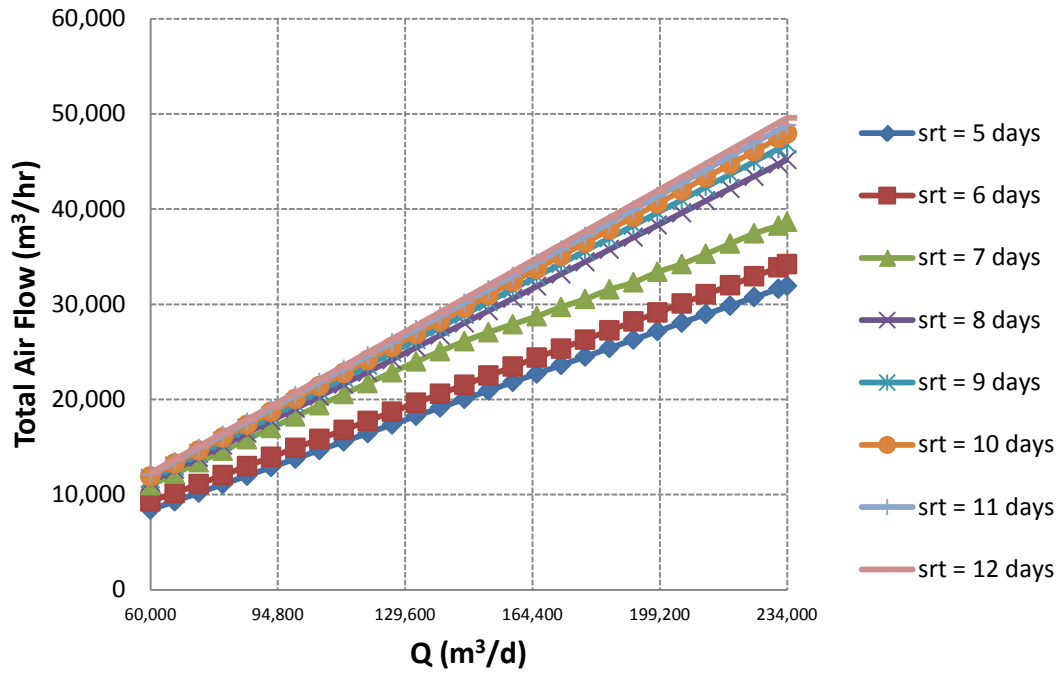
Η συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή είναι η κρίσιμη μεταβλητή για τον έλεγχο επάρκειας της Ε.Ε.Λ.. Μία μικρή αύξηση της παροχής ωθεί την εγκατάσταση στην αστοχία ως προς τις απαιτήσεις της οδηγίας, όπως προκύπτει από το σχήμα 7-6. Το παραπάνω παρατηρείται και στα γραφήματα για τις συγκεντρώσεις αμμωνιακών και νιτρικών στην εκροή (σχήμα 7-7 & σχήμα 7-8 αντίστοιχα).

Τέλος, η φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας για τον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης (σχήμα 7-9). Από τα γραφήματα 7-10 και 7-11 παρατηρείται ότι η φόρτιση στερεών είναι κρισιμότερη ακόμα και από το ολικό φορτίο αζώτου στην εκροή για χρόνους παραμονής στερεών μεγαλύτερων των οκτώ ημερών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις μεγάλες συγκεντρώσεις ολικών αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα που παρατηρούνται σε μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών, οδηγώντας έτσι σε μεγάλες φορτίσεις στερεών στις δεξαμενές τελικής καθίζησης.

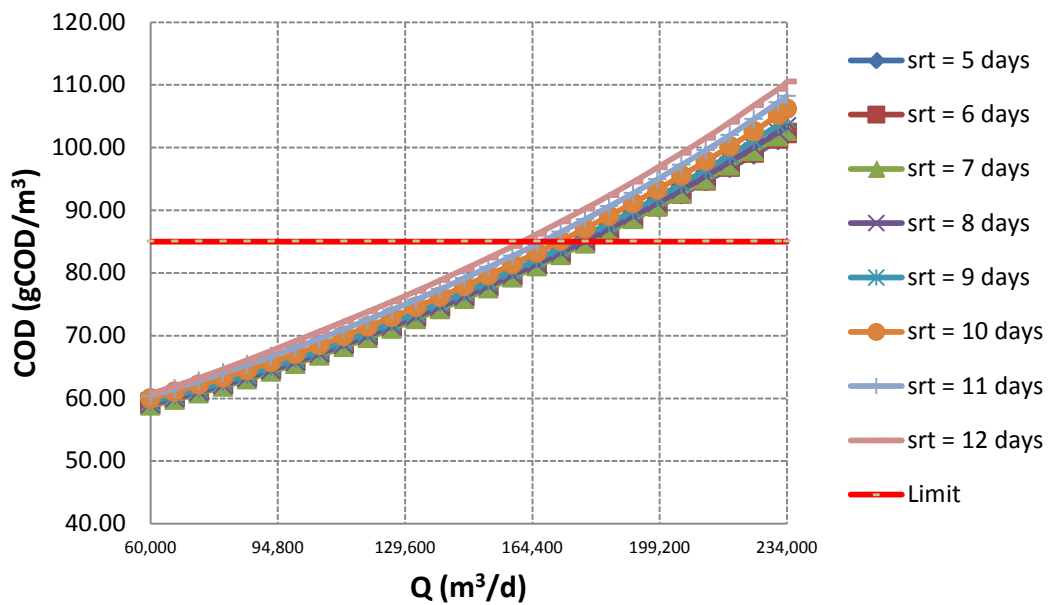
Συνεπώς, για να μπορέσει η εγκατάσταση να λειτουργήσει αποτελεσματικά και για μεγαλύτερες παροχές εισόδου πρέπει να σχεδιαστεί για μεγαλύτερη απομάκρυνση νιτρικών. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση των ανοξικών όγκων ή και με μεγαλύτερη παροχή ανακυκλοφορίας, όπως και θα εξεταστεί παρακάτω.



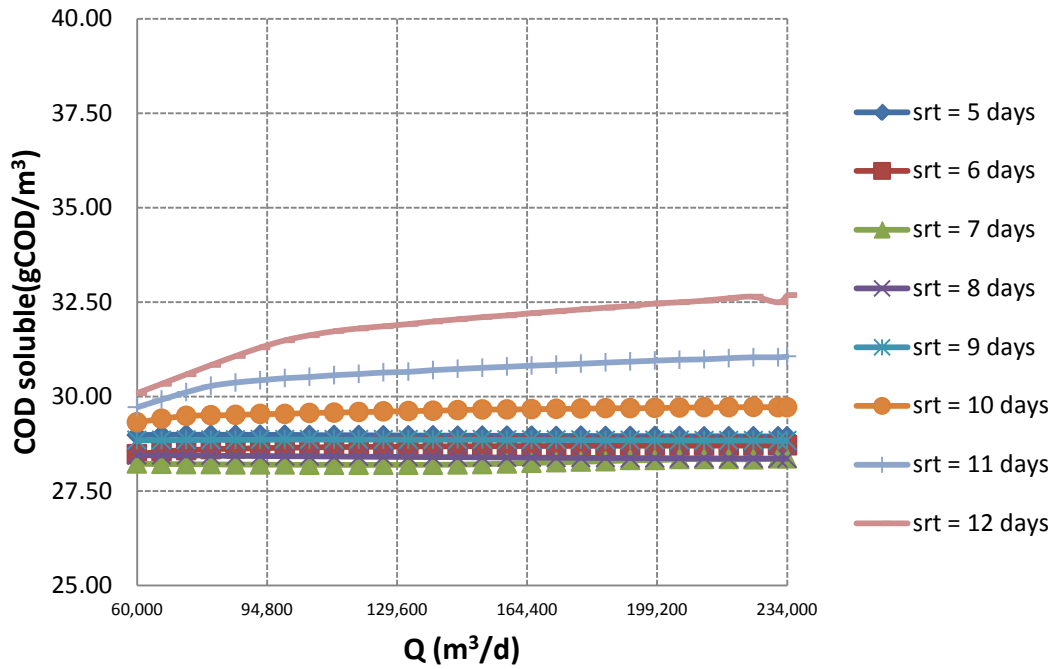
Σχήμα 7-1 Διακόμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



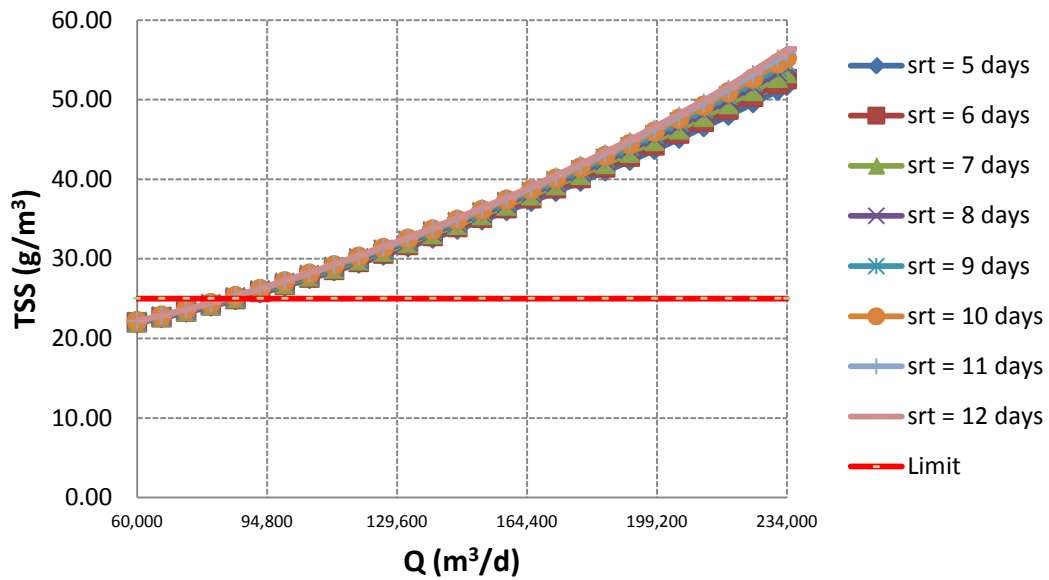
Σχήμα 7-2 Διακύμανση της ολικής απαίτησης σε αέρα του βιολογικού αντιδραστήρα συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



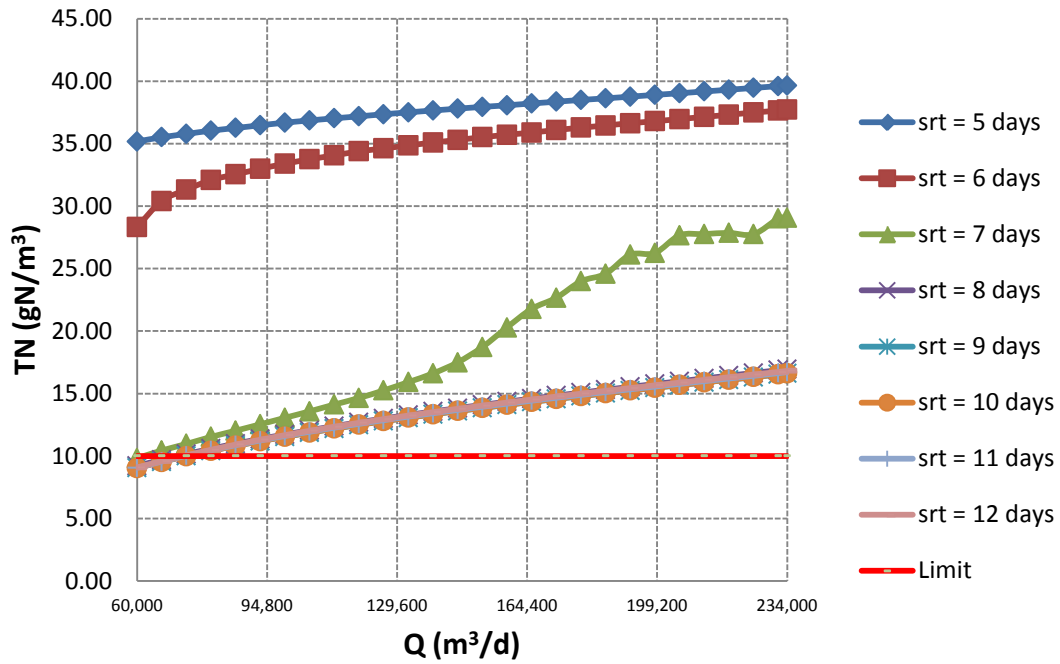
Σχήμα 7-3 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού φορτίου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



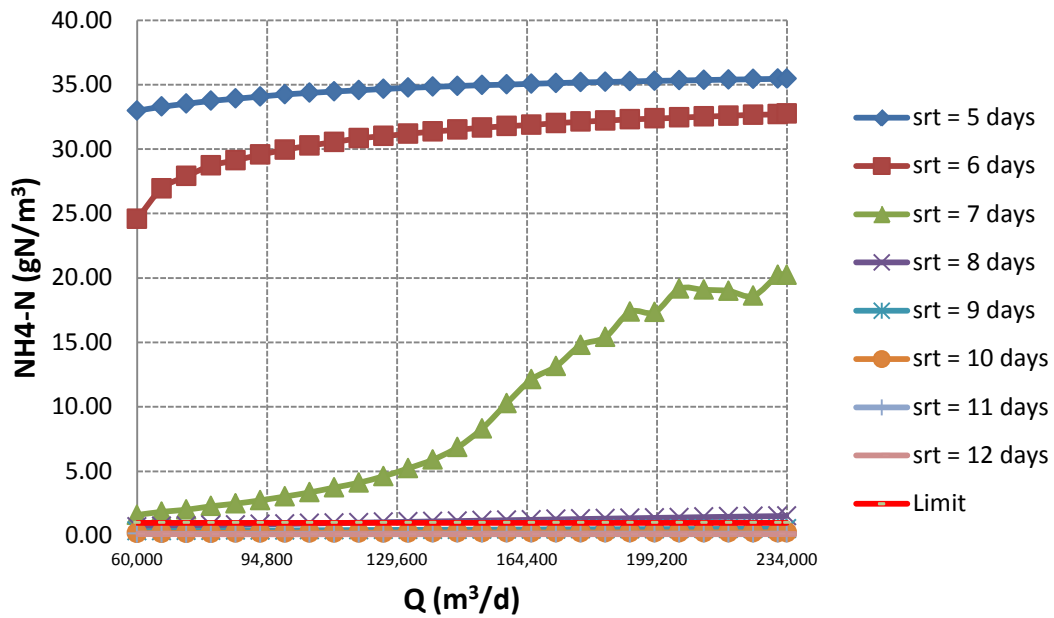
Σχήμα 7-4 Διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



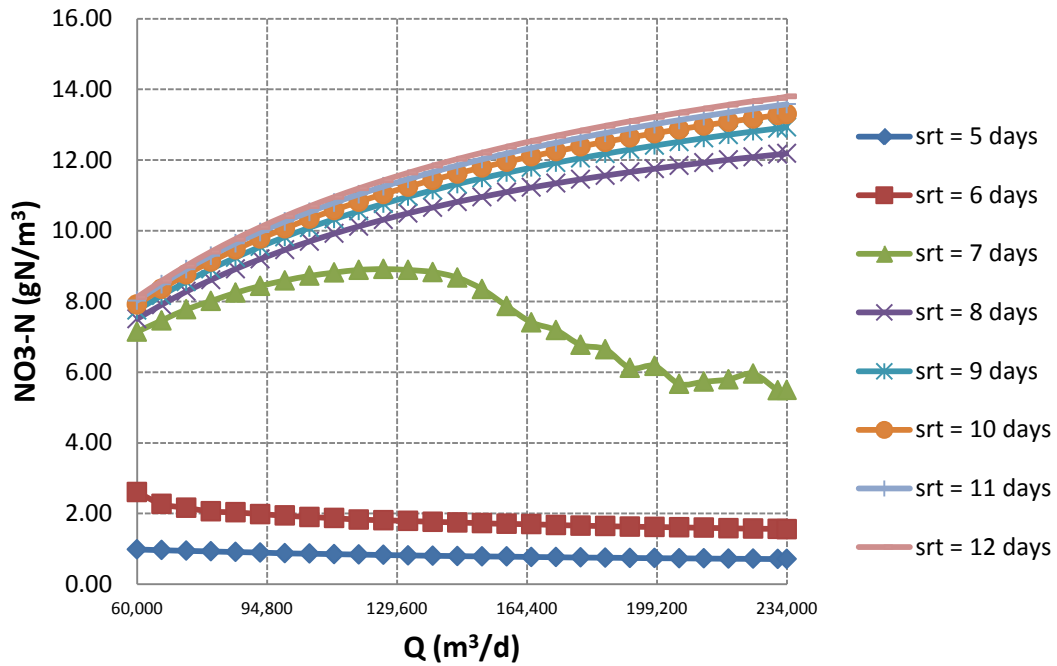
Σχήμα 7-5 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



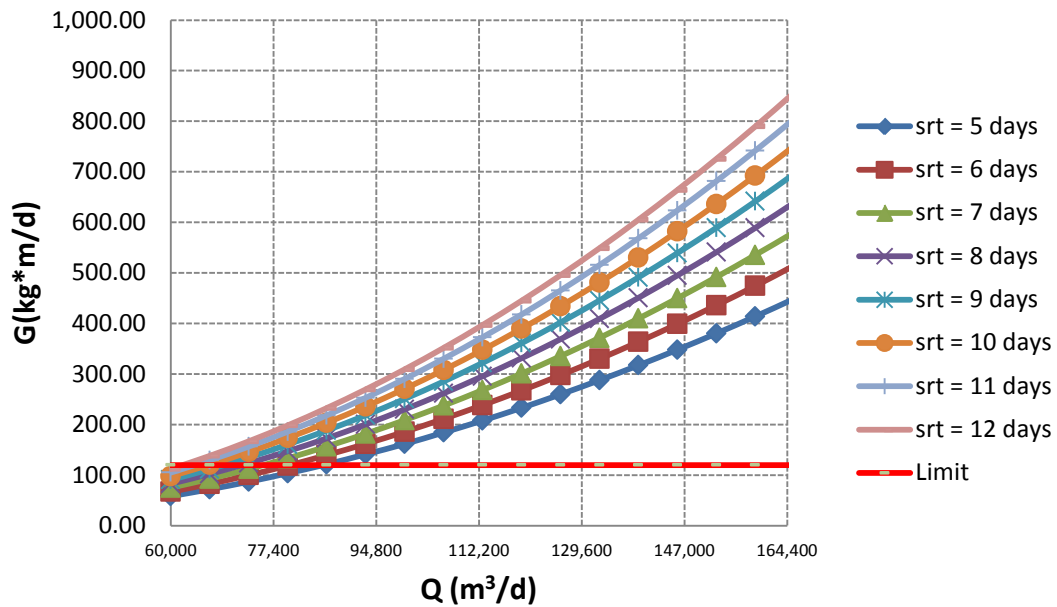
Σχήμα 7-6 Διακόμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



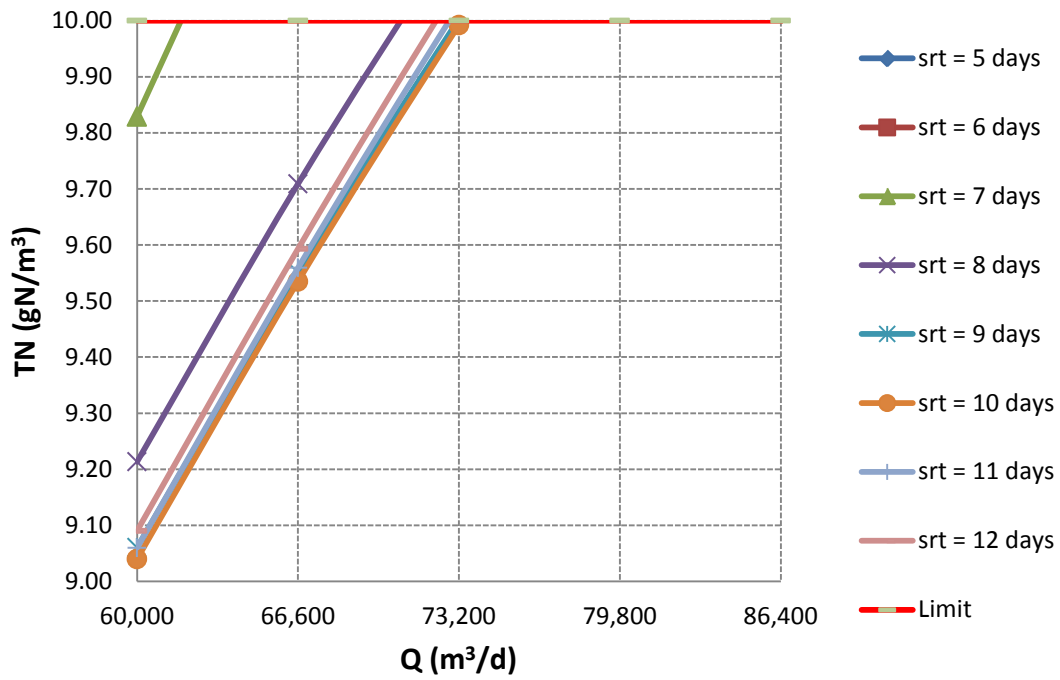
Σχήμα 7-7 Διακόμανση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



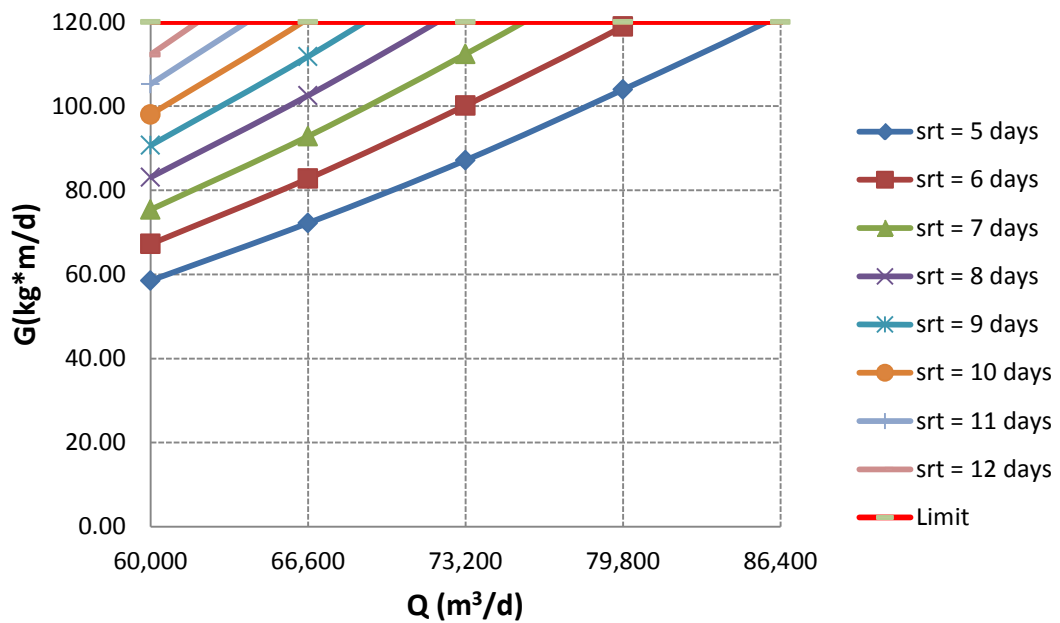
Σχήμα 7-8 Διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



Σχήμα 7-9 Διακύμανση της φόρτισης στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και της παροχής εισροής



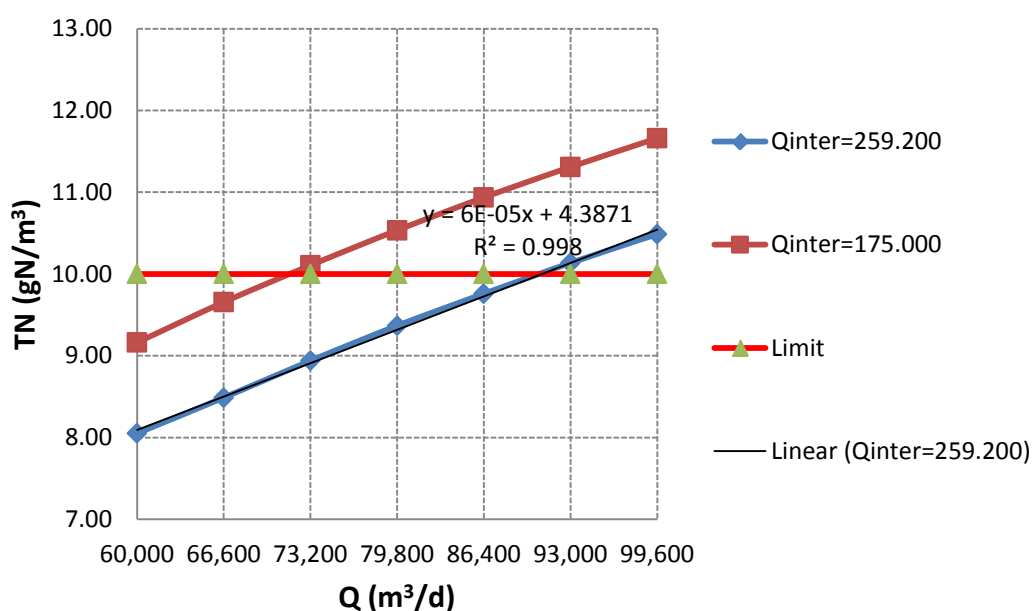
Σχήμα 7-10 Μεγέθυνση της διακύμανσης της συγκέντρωσης ολικού αζώτου στην περιοχή ενδιαφέροντος



Σχήμα 7-11 Μεγέθυνση της διακύμανσης της φόρτισης στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης στην περιοχή ενδιαφέροντος

7.2 Έλεγχος επάρκειας για τη μέγιστη δυνατή παροχή εσωτερικής ανακυκλοφορίας

Όπως προαναφέρθηκε ο κρίσιμος παράγοντας στον έλεγχο επάρκειας που πραγματοποιήθηκε είναι η συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή. Η συγκέντρωση αυτή επηρεάζεται από τη διεργασία της απονιτροποίησης, η οποία μπορεί να βελτιωθεί με αύξηση της εσωτερικής παροχής επανακυκλοφορίας. Η παρούσα Ε.Ε.Λ. λειτουργεί με παροχή εσωτερικής ανακυκλοφορίας ίση με 175,000 m³/d. Ο μηχανολογικός εξοπλισμός, όμως, που διαθέτει, μπορεί να ανταπεξέλθει και για παροχές ίσες έως 259,200 m³/d, δηλαδή 50% αυξημένες σε σχέση με την παροχή λειτουργίας.



Σχήμα 7-12 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για την πραγματική και τη μέγιστη δυνατή τιμή της παροχής εσωτερικής ανακυκλοφορίας

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζεται συγκριτικά η συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή για την πραγματική και τη μέγιστη δυνατή εσωτερική παροχή ανακυκλοφορίας, διατηρώντας σταθερά τα υπόλοιπα στοιχειομετρικά και λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης. Όπως έχει προαναφερθεί, η παράμετρος αυτή είναι ο κρίσιμος παράγοντας για τον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης για μεγαλύτερες παροχές εισροής.

Για τη δεδομένη εσωτερική παροχή ανακυκλοφορίας, η εγκατάσταση συμμορφώνεται με τα όρια της Ευρωπαϊκής οδηγίας για παροχές έως και το 110 % της παροχής εισόδου. Με αύξηση, όμως, της δεδομένης παροχής στη μέγιστη δυνατή τιμή βάσει του μηχανολογικού εξοπλισμού, δηλαδή για αύξηση της παροχής κατά 50 %, η εγκατάσταση συμμορφώνεται με τα όρια της Ευρωπαϊκής οδηγίας για παροχές έως και το 110 % της παροχής εισόδου.

παρατηρείται ότι τα όρια του ολικού αζώτου στην εκροή είναι συμβατά με αυτά της οδηγίας ακόμα και για παροχές εισόδου ίσες με το 137 % της πραγματικής παροχής. Πρακτικώς, οι τιμές του ολικού αζώτου για τη μέγιστη εσωτερική παροχή είναι κατά μία μονάδα μειωμένες από αυτές για την παροχή λειτουργίας, ενώ παρατηρείται γραμμική συσχέτιση της συγκέντρωσης ολικού αζώτου με την τιμή της παροχής εισροής.

Η αύξηση αυτή της παροχής απαιτεί αυξημένα λειτουργικά έξοδα, αλλά σε κάθε περίπτωση, επιτρέπει τη συμμόρφωση της εγκατάστασης με την Ευρωπαϊκή οδηγία για μεγαλύτερες παροχές χωρίς την ανάγκη επέκτασης των επιμέρους μονάδων. Βέβαια, απαιτείται να γίνει έλεγχος για το αν πληρούνται και τα υπόλοιπα κριτήρια της οδηγίας. Ο έλεγχος αυτός παρουσιάζεται παρακάτω.

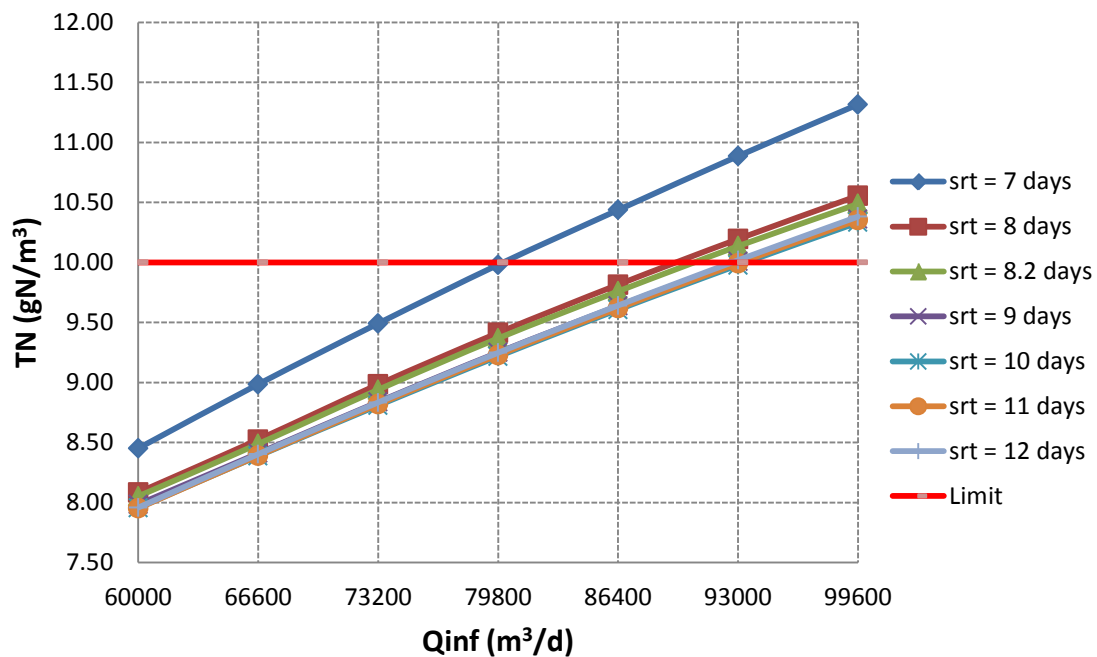
Στο σημείο αυτό θεωρείται σκόπιμο να γίνει η ακόλουθη διευκρίνιση: Σε όλες τις αναλύσεις που θα παρουσιαστούν, η εσωτερική παροχή ανακυκλοφορίας είναι η μέγιστη δυνατή. Το ορθότερο θα ήταν να εξεταστούν όλες οι πιθανές τιμές της παροχής, από την πραγματική μέχρι και τη μέγιστη. Όμως, μετά από δοκιμές προέκυψε ότι η παροχή ανακυκλοφορίας (Q_R) δεν επηρεάζει πρακτικώς τις υπόλοιπες συγκεντρώσεις στην εκροή, πέρα των διαφόρων κλασμάτων του αζώτου, οι συγκεντρώσεις των οποίων μειώνονται για αύξηση της Q_R .

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν την απόκριση της εγκατάστασης στις συγκεντρώσεις εκροής του οργανικού φορτίου (ολικού και διαλυτού), των ολικών στερεών, του αζώτου, των νιτρικών και των αμμωνιακών. Επίσης, εξετάστηκε το ολικό απαιτούμενο οξυγόνο, η συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα καθώς και η φόρτιση στερεών των δεξαμεμών τελικής καθίζησης. Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν ήταν ο χρόνος παραμονής στερεών, με τιμές από επτά ως 14 ημέρες και ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, με τιμές από 0.4 έως 1.0 d^{-1} .

Ο χρόνος παραμονής στερεών είναι ένα λειτουργικό στοιχείο της εγκατάστασης, το οποίο ο υπεύθυνος λειτουργίας μπορεί να τροποποιήσει μεταβάλλοντας την παροχή ιλύος, οδηγώντας έτσι σε οικονομικότερη λειτουργία της εγκατάστασης.

Ενδεικτικά, ακολουθεί γράφημα το οποίο παρουσιάζει την επίδραση του χρόνου παραμονής στερεών στη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή για το δεδομένο μ_{maxA} της εγκατάστασης (σχήμα 7-13).

Όπως παρατηρείται, η εγκατάσταση είναι συμβατή με τα όρια της οδηγίας για παροχές έως και 135 % της πραγματικής, ακόμη και για χρόνο παραμονής στερεών ίσο με οκτώ ημέρες, οδηγώντας κατά συνέπεια σε οικονομικότερη λειτουργία της εγκατάστασης.

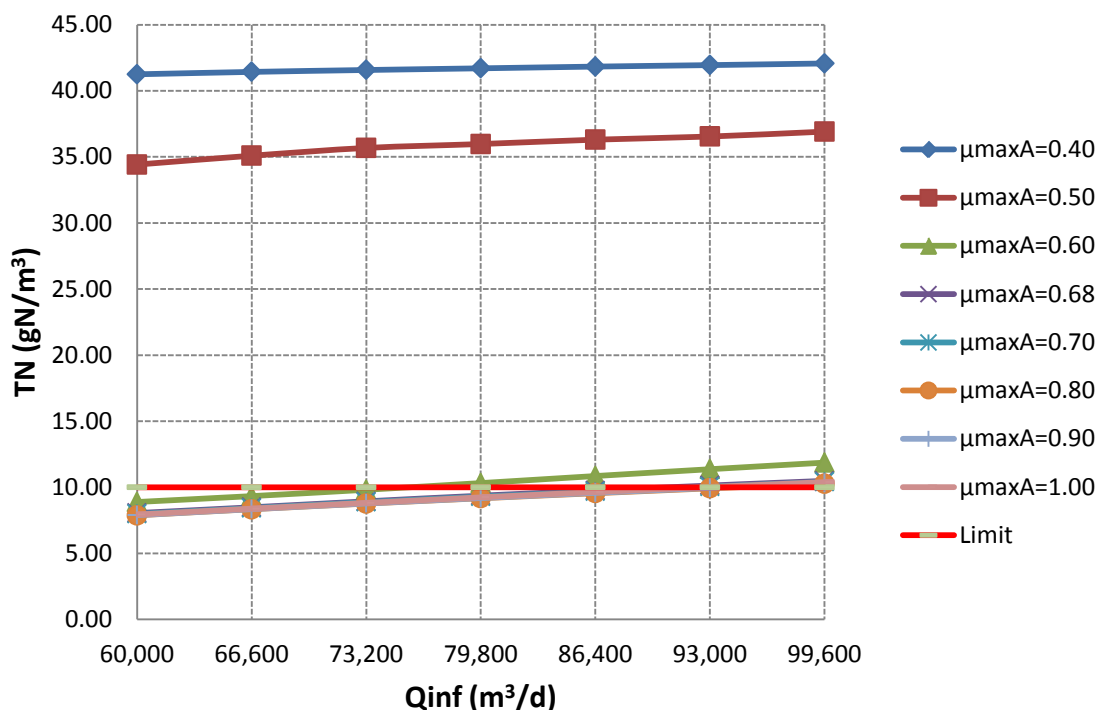


Σχήμα 7-13 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές της παροχής εισροής και του χρόνου παραμονής στερεών

Εξάλλου, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών είναι, όπως φάνηκε και στις προηγούμενες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, η σημαντικότερη από τις στοιχειομετρικές και κινητικές μεταβλητές που εξετάστηκαν. Η μεταβλητή αυτή μάλιστα, όντας πολύ ευαίσθητη σε διάφορους παράγοντες, όπως το pH και η παρουσία τοξικών, πρέπει να αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερη προσοχή και να υπάρχει πάντα ικανοποιητικό όριο ασφαλείας.

Ενδεικτικά, ακολουθεί γράφημα το οποίο παρουσιάζει την επίδραση του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών στη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή για το δεδομένο χρόνο παραμονής στερεών της εγκατάστασης.

Από το διάγραμμα (σχήμα 7-14) προκύπτει ότι για αναχαίτιση ως και 25 % στο μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης, η εγκατάσταση είναι ικανή να ανταπεξέλθει σε παροχές έως και 35 % αυξημένες σε σχέση με την πραγματική παροχή εισροής. Το ποσοστό αυτό αναχαίτισης κρίνεται ως ικανοποιητικός συντελεστής ασφαλείας.



Σχήμα 7-14 Διακόμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή για διαφορετικές τιμές της παροχής εισροής και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας

Έχοντας από τις αναλύσεις όλες τις τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων, μπορεί να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένος έλεγχος επάρκειας της εγκατάστασης. Για κάθε δυνατό συνδυασμό χρόνου παραμονής στερεών και μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας και ορίζοντας τα όρια για κάθε μία από τις παραμέτρους, μετά από γραμμική παρεμβολή, προκύπτει η μέγιστη τιμή παροχής εισόδου για την οποία η εγκατάσταση λειτουργεί εντός των ορίων της Ευρωπαϊκής οδηγίας.

Έτσι, για παράδειγμα, φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα η μέγιστη τιμή της παροχής εισόδου και οι αντίστοιχες τιμές των άλλων εξεταζόμενων παραμέτρων για $\mu_{max} = 0.68 \text{ d}^{-1}$ και με τους εξής περιορισμούς:

- $MLSS \leq 5000 \text{ mg/l}$
- $COD \leq 85 \text{ mg/l}$
- $TS \leq 25 \text{ mg/l}$
- $TN \leq 10 \text{ mgN/l}$
- $NH_4N \leq 2.5 \text{ mgN/l}$

Πίνακας 7-1 Μέγιστες τιμές παροχής εισροής για $\mu_{\max A} = 0.6 \text{ d}^{-1}$ και διάφορες τιμές του χρόνου παραμονής στερεών

max μ =0.60									
Qconinf	xmlls	qairsummls	srtmls	scodeff	codeff	tneff	xeff	snoeff	snheff
m ³ /d	g/m ³	m ³ /hr	d	gCOD/m ³	gCOD/m ³	gN/m ³	g/m ³	gN/m ³	gN/m ³
77,727	3,900	14,417	8.0	28.14	61.47	10.00	24.03	6.62	2.23
82,017	4,195	15,321	8.2	28.16	62.24	10.00	24.58	6.89	1.94
84,823	4,651	16,226	9.0	28.26	62.88	9.67	25.00	7.30	1.03
84,305	5,000	16,496	10.0	28.42	62.98	9.38	25.00	7.49	0.60
78,538	5,000	15,629	11.0	28.55	62.12	9.07	24.30	7.34	0.44
73,643	5,000	14,869	12.0	28.68	61.42	8.74	23.74	7.18	0.35

Βέβαια, σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία της εγκατάστασης και σχετίζεται με τα ολικά στερεά είναι και η φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης, για την οποία ισχύει:

$$G = (1 + r) * Q * MLSS / A_{\delta\epsilon\zeta}, \text{ όπου}$$

r: ο συντελεστής εσωτερικής ανακυκλοφορίας

Q: η παροχή εισροής

MLSS: η συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα

A_{δεξ}: η συνολική επιφάνεια των δεξαμενών τελικής καθίζησης

Έτσι, η μέγιστη παροχή εισροής της εγκατάστασης ανάλογα τον χρόνο παραμονής στερεών και το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας μεταβάλλεται σύμφωνα με τον επόμενο πίνακα, για τα ακόλουθα όρια:

- $MLSS \leq 5000 \text{ mg/l}$
- $COD \leq 85 \text{ mg/l}$
- $G \leq 120 \text{ g/m}^2$
- $TN \leq 10 \text{ mgN/l}$
- $NH_4N \leq 2.5 \text{ mgN/l}$
- $TS \leq 25 \text{ mg/l}$

Πίνακας 7-2 Μέγιστες τιμές παροχής εισροής για $\mu_{\max A} = 0.6 \text{ d}^{-1}$ και διάφορες τιμές του χρόνου παραμονής στερεών με προσθήκη του ορίου για την φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης

max $\mu_A=0.60$									
Qconinf	Xmlss	qairsummlss	srtmlss	scodeff	Codeff	tneff	G	snoeff	snheff
m ³ /d	g/m ³	m ³ /hr	d	gCOD/m ³	gCOD/m ³	gN/m ³	kg*m/d	gN/m ³	gN/m ³
72,067	3,612	13,374	8.0	28.14	60.53	10.00	120.00	6.40	2.01
71,396	3,644	13,337	8.2	28.16	60.45	9.68	120.00	6.46	1.65
68,951	3,772	13,153	9.0	28.23	60.17	9.03	120.00	6.54	0.97
66,357	3,926	12,926	10.0	28.34	59.89	8.66	120.00	6.56	0.66
63,970	4,064	12,686	11.0	28.46	59.66	8.41	120.00	6.53	0.49
61,921	4,199	12,469	12.0	28.58	59.49	8.22	120.00	6.50	0.40
60,172	4,330	12,280	13.0	28.70	59.35	8.08	120.00	6.47	0.33
58,468	4,448	12,073	14.0	28.80	59.23	7.94	120.00	6.43	0.29

Πίνακες, όπως ο παραπάνω, μπορούν να δημιουργηθούν για όλα τα δυνατά $\mu_{\max A}$. Ο συνδυασμός τους οδηγεί στον τελικό πίνακα (πίνακας 7-3), στον οποίο και προσδιορίζεται η μέγιστη παροχή εισροής της εγκατάστασης για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

Ένα αρκετά ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα είναι πως η λειτουργία της εγκατάστασης επηρεάζεται κυρίως από το χρόνο παραμονής στερεών και όχι από το βαθμό αναχίτισης του $\mu_{\max A}$. Συγκεκριμένα, από την τιμή εκείνη του $\mu_{\max A}$ για την οποία πραγματοποιείται επαρκώς η διεργασία της νιτροποίησης για κάθε τιμή του srt, παρατηρείται πως η τιμή της μέγιστης παροχής εισροής είναι πρακτικώς ανεπηρέαστη, όπως επαληθεύεται και από τις πάρα πολύ μικρές τιμές της τυπικής απόκλισης.

Ακόμη, για ποσοστό αναχίτισης του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης αυτοτροφικών μικροοργανισμών έως και 25 % ($\mu_{\max} = 0.6 \text{ d}^{-1}$), η εγκατάσταση λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής οδηγίας ακόμα και για αύξηση της τάξεως του 9.50 % στην παροχή εισόδου, και για χρόνους παραμονής στερεών 8.2 και οκτώ ημερών.

Με αλλαγή των επιτρεπόμενων ορίων, όπως είναι αναμενόμενο, μεταβάλλονται και οι μέγιστες τιμές της παροχής εισροής. Για παράδειγμα, μεταβολή του ορίου της φόρτισης στερεών των Δ.Τ.Κ. σε ελαστικότερες τιμές ($G = 140 \text{ g/m}^2$) οδηγεί σε αύξηση της τάξεως του 10 % στη μέγιστη παροχή εισροής (πίνακας 7-4), σε σχέση με την αύξηση κατά 2.5 % που παρατηρείται για $G = 120 \text{ g/m}^2$, όπως προκύπτει και από τον πίνακα 7-4.

Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη αύξηση στην παροχή εισροής που υπολογίστηκε δεν είναι κατ' ανάγκη η μέγιστη δυνατή της εγκατάστασης για κάθε έναν από τους συνδυασμούς. Σε όλα τα παραπάνω σενάρια, η παροχή

επανακυκλοφορίας παρέμεινε σταθερή και ίση με το 106 % της παροχής εισόδου. Η παροχή αυτή όμως, για μεγάλους χρόνους παραμονής, αυξάνει αρκετά τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στην εγκατάσταση και κατά συνέπεια και τη φόρτιση στερεών στις δεξαμενές καθίζησης. Το γεγονός αυτό φαίνεται και στον πίνακα 7-3, στον οποίο για μεγάλους χρόνους παραμονής παρατηρείται αστοχία ως προς τη φόρτιση στερεών. Έτσι, με μικρότερες τιμές της παροχής επανακυκλοφορίας η εγκατάσταση μπορεί να λειτουργήσει εντός των ορίων της οδηγίας ακόμα και για μεγαλύτερες τιμές της παροχής εισόδου, κάτι το οποίο είναι αρκετά ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση και εξετάστηκε μόνο επιφανειακά στην παρούσα διπλωματική.

Πίνακας 7-3 Μέγιστη παροχή εισροής (1)

Όρια: G= 120 g/m ² , TN = 10 gN/m ³ , TSS = 25 g/m ³ , COD = 85 g/m ³ ,NH ₄ -N = 2.5 gN/m ³ , MLSS = 5000 g/m ³												
srt μmax _A	7.0	8.0	8.2	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	average	deviation	% increase
0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.50	-	-	-	-	-	53,303	61,960	60,158	58,443	57,632	6,122	-12.59%
0.60	47,525	72,067	71,396	68,951	66,357	63,970	61,921	60,172	58,468	64,598	8,397	-2.02%
0.68	75,726	72,076	71,404	68,975	66,395	64,005	61,960	60,211	58,514	68,649	4,846	4.12%
0.70	75,715	72,075	71,416	68,990	66,404	64,017	61,975	60,227	58,698	68,656	4,839	4.13%
0.80	75,782	72,114	71,441	69,027	66,468	64,096	62,054	60,372	58,722	68,712	4,826	4.22%
0.90	75,820	72,169	71,497	69,055	66,507	64,145	62,128	60,365	58,734	68,760	4,820	4.29%
1.00	75,896	72,221	71,537	69,093	66,522	64,176	62,158	60,384	58,712	68,800	4,836	4.35%
				TN	G							
average	71,077	72,120	71,448	69,015	66,442	62,530	62,022	60,270	58,613	average	67,557	
deviation	11538	62	56	53	67	4070	92	100	131	deviation	5,841	Q _{real}
												65,931
% increase	7.81%	9.39%	8.37%	4.68%	0.78%	-5.16%	-5.93%	-8.59%	-11.10%	% increase	2.47%	

Το κίτρινο και το πορτοκαλί χρώμα, υποδεικνύουν πως ο κρίσιμος παράγοντας είναι η φόρτιση στερεών στις δεξαμενές τελικής καθίζησης και η συγκέντρωση ολικού αζώτου αντίστοιχα. Στα σενάρια για τα οποία δεν υπάρχει τιμή στην παροχή εισροής, η εγκατάσταση δεν είναι σε θέση να ανταποκριθεί στα όρια της οδηγίας ως προς TN ακόμα και για παροχές της τάξεως των 40000 m³/d. Για μικρότερες παροχές το λογισμικό δεν μπορούσε να πραγματοποιήσει σύγκλιση.

Πίνακας 7-4 Μέγιστη παροχή εισροής (2)

Όρια: G= 140 g/m ² , TN = 10 gN/m ³ , TSS = 25 g/m ³ , COD = 85 g/m ³ , NH ₄ -N = 2.5 gN/m ³ , MLSS = 5000 g/m ³												
srt μmax _λ	7.0	8.0	8.2	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	average	deviation	% increase
0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.50	-	-	-	-	-	53,303	67,145	64,898	63,103	60,224	9,788	-
0.60	45,525	72,067	75,611	74,483	71,603	69,091	66,941	64,940	63,129	67,903	10,303	2.99%
0.68	80,078	77,805	77,079	74,508	71,641	69,135	66,970	64,994	63,169	73,888	4,826	12.07%
0.70	81,736	77,803	77,098	74,529	71,652	69,147	66,995	65,011	63,349	74,137	5,199	12.45%
0.80	81,826	77,874	77,147	74,563	71,738	69,238	67,096	65,170	63,386	74,212	5,190	12.56%
0.90	81,889	77,928	77,226	74,616	71,780	69,284	67,159	65,140	63,396	74,269	5,195	12.65%
1.00	81,979	77,991	77,267	74,659	71,799	69,313	67,160	65,132	63,398	74,310	5,222	12.71%
				TN	G							
average	75,506	76,911	76,905	74,560	71,702	66,930	67,067	65,041	63,276	average	72,534	
deviation	14705	2374	638	67	81	6010	95	107	135	deviation	6,936	Q _{real}
												65,931
% increase	14.52%	16.65%	16.64%	13.09%	8.75%	1.52%	1.72%	-1.35%	-4.03%	% increase	10.01%	

Το κίτρινο και το πορτοκαλί χρώμα, υποδεικνύουν πως ο κρίσιμος παράγοντας είναι η φόρτιση στερεών στις δεξαμενές τελικής καθίζησης και η συγκέντρωση ολικού αζώτου αντίστοιχα. Στα σενάρια για τα οποία δεν υπάρχει τιμή στην παροχή εισροής, η εγκατάσταση δεν είναι σε θέση να ανταποκριθεί στα όρια της οδηγίας ως προς TN ακόμα και για παροχές της τάξεως των 40000 m³/d. Για μικρότερες παροχές το λογισμικό δεν μπορούσε να πραγματοποιήσει σύγκλιση.

7.3 Επίδραση του συντελεστή επανακυκλοφορίας στον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης

Όπως προαναφέρθηκε, για τον πληρέστερο και ορθότερο έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης, θα πρέπει να εξετασθεί και η επίδραση του συντελεστή επανακυκλοφορίας (r) στην απόδοση της Ε.Ε.Λ.. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προηγούμενων προσομοιώσεων, ο κρίσιμος παράγοντας λειτουργίας της εγκατάστασης για μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών είναι η φόρτιση στερεών στις δεξαμενές τελικής καθίζησης. Η φόρτιση αυτή όμως ελαττώνεται για μειωμένες τιμές του r , με αποτέλεσμα η Ε.Ε.Λ. να λειτουργεί ομαλά και για μεγαλύτερες παροχές.

Ενδεικτικά, στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν δύο συνδυασμοί χρόνου παραμονής στερεών και μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας. Ο ένας αφορά τις συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης, δηλαδή για $srt = 8.2$ d και $\mu_{maxA} = 0.68$ d⁻¹. Το άλλο σενάριο είναι για $srt = 11$ d και $\mu_{maxA} = 0.8$ d⁻¹, το οποίο και επιλέχτηκε για το λόγο ότι η μέγιστη παροχή εισροής για μεγάλες τιμές του srt είναι αρκετά χαμηλότερη από αυτήν για μικρές τιμές του srt .

Σε κάθε ένα από τα δύο αυτά σενάρια υπολογίστηκε η μέγιστη δυνατή παροχή εισροής για τιμές του συντελεστή επανακυκλοφορίας από 40 % έως και 130 % και με βαθμιαία μεταβολή κατά 10 %.

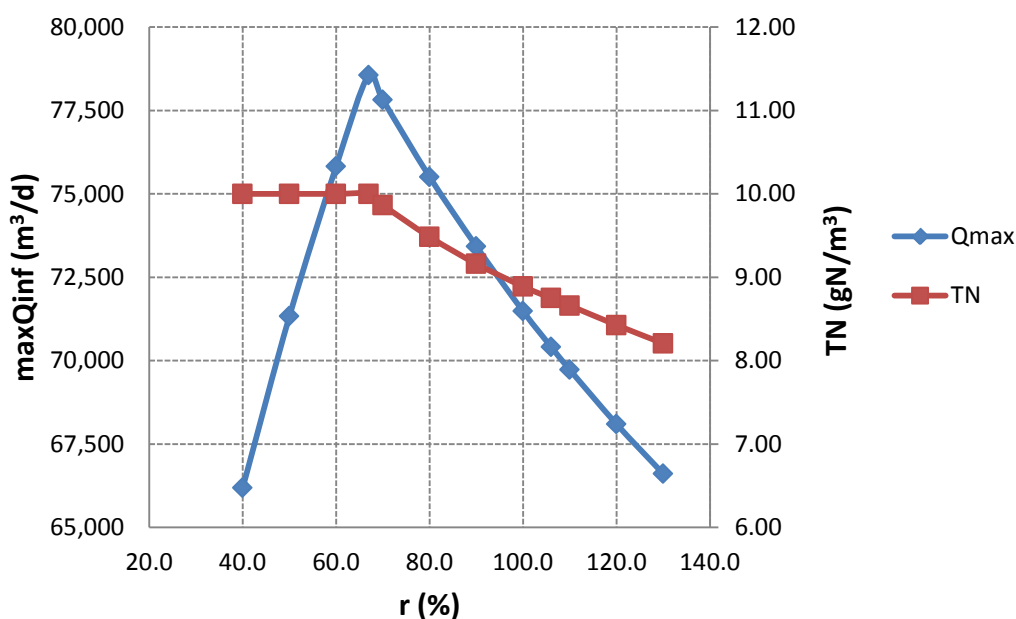
Πίνακας 7-5 Μέγιστη παροχή εισροής, και αντίστοιχες τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων, συναρτήσει του συντελεστή επανακυκλοφορίας, για $srt= 8.2$ d και $\mu_{maxA} = 0.68$ d⁻¹

Qrec	Q _{inf}	MLSS	Q _{air,total}	COD _S	COD	TN	TSS	NO ₃ N	NH ₄ N	G
%	m ³ /d	g/m ³	m ³ /hr	gCOD/m ³	gCOD/m ³	gN/m ³	g/m ³	gN/m ³	gN/m ³	g/m ²
40.0	66,187	3,299	12,954	28.48	59.71	10.00	22.55	7.94	0.57	70.37
50.0	71,332	3,579	13,874	28.57	60.60	10.00	23.12	7.97	0.49	88.20
60.0	75,823	3,823	14,671	28.64	61.42	10.00	23.66	7.96	0.45	106.84
70.0	77,816	3,940	14,978	28.67	61.82	9.87	23.92	7.81	0.45	120.00
80.0	75,506	3,833	14,449	28.65	61.47	9.48	23.68	7.43	0.46	120.00
90.0	73,428	3,735	13,984	28.63	61.17	9.16	23.47	7.10	0.47	120.00
100.0	71,481	3,644	13,560	28.60	60.88	8.89	23.29	6.81	0.50	120.00
106.0	70,416	3,593	13,330	28.58	60.72	8.75	23.18	6.65	0.52	120.00
110.0	69,726	3,559	13,185	28.57	60.63	8.66	23.12	6.56	0.53	120.00
120.0	68,100	3,476	12,857	28.57	60.42	8.43	22.97	6.35	0.51	120.00
130.0	66,609	3,401	12,549	28.58	60.24	8.21	22.84	6.18	0.47	120.00

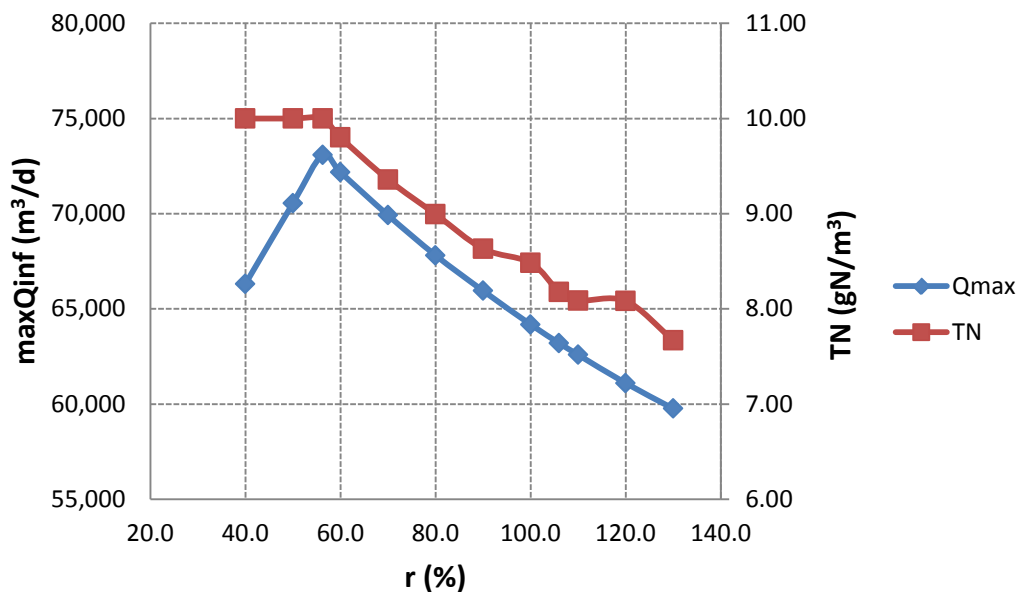
Στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως σε όλες τις προσομοιώσεις της συγκεκριμένης ενότητας, όπως επίσης και όλων των άλλων που ακολουθούν, η παροχή εσωτερικής ανακυκλοφορίας είναι η μέγιστη δυνατή, δηλαδή 259,200 m³/d.

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα, για μικρές τιμές του συντελεστή r , ο κρίσιμος παράγοντας λειτουργίας είναι η συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή, ενώ η φόρτιση στερεών στις Δ.Τ.Κ. παρουσιάζει μικρές τιμές. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς για μικρές τιμές του r παρατηρούνται μικρές τιμές της συγκέντρωσης στερεών στον Β.Α. (MLSS), οπότε και η φόρτιση στερεών στη δεξαμενή τελικής καθίζησης έχει μικρές τιμές. Επίσης, καθώς επανακυκλοφορείται μικρό ποσοστό της παροχής εισροής, η ποσότητα αυτή δεν επαρκεί για τη διεργασία της απονιτροποίησης. Αντίστοιχα, για μεγάλες τιμές του συντελεστή r ο κρίσιμος παράγοντας λειτουργίας είναι η φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης.

Γίνεται εμφανές, λοιπόν, ότι υπάρχει συγκεκριμένη τιμή του συντελεστή επανακυκλοφορίας, για την οποία η εγκατάσταση λειτουργεί οριακά τόσο ως προς τη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή όσο και ως προς τη φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης. Για τη τιμή αυτή του συντελεστή, προκύπτει και η μέγιστη τιμή της παροχής εισροής για το εξεταζόμενο σενάριο. Έτσι, καταλήγουμε στα ακόλουθα δύο γραφήματα για τα σενάρια που εξετάστηκαν.

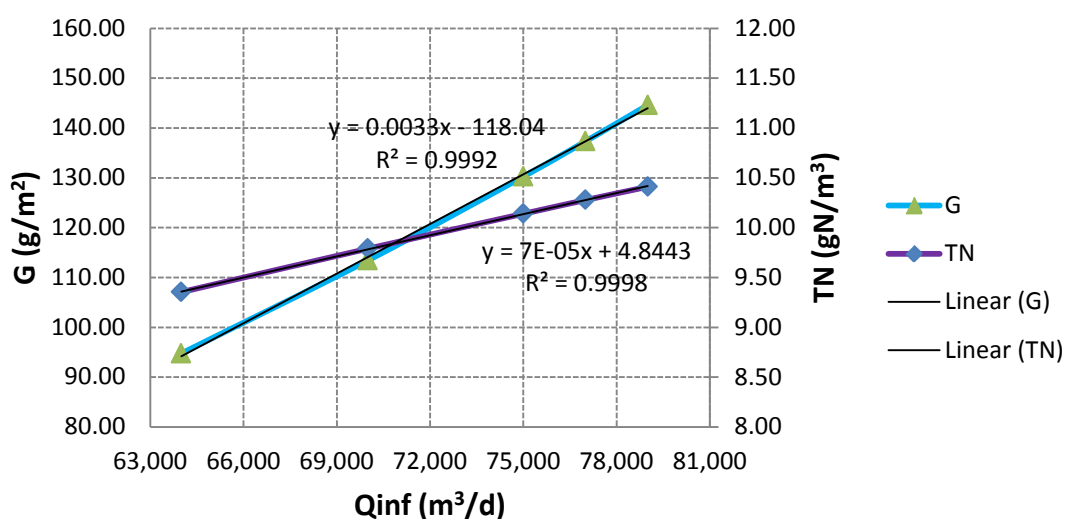


Σχήμα 7-15 Μέγιστη παροχή εισροής συναρτήσει του συντελεστή επανακυκλοφορίας και αντίστοιχη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή, για $srt = 8.2$ d και $\mu_{maxA} = 0.68$ d⁻¹

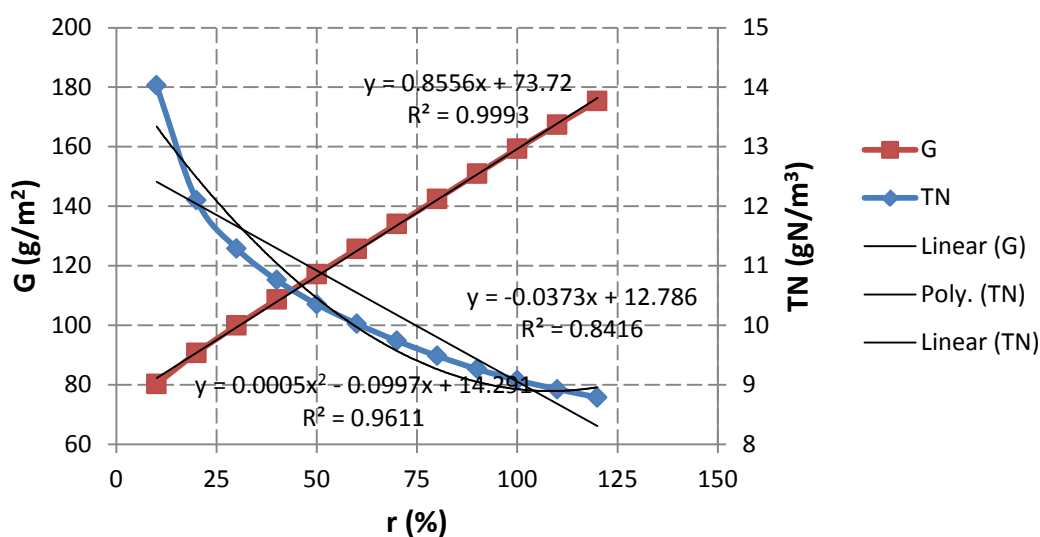


Σχήμα 7-16 Μέγιστη παροχή εισροής και αντίστοιχη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή συναρτήσει του συντελεστή επανακυκλοφορίας, για $srt = 11$ d και $\mu_{maxA} = 0.8$ d⁻¹

Όλες οι παραπάνω τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή. Η μέθοδος αυτή δεν είναι απόλυτα σωστή, όμως σε τυχαίο δείγμα που εξετάστηκε, τα αποτελέσματα του οποίου παρατίθενται παρακάτω, προέκυψε ότι η γραμμή τάσης γραμμικής εξίσωσης έχει συντελεστή αυτοσυσχέτισης (R^2) μεγαλύτερο του 0.99. Ο μόνος συντελεστής που έχει μικρή τιμή ($R^2 = 0.84$) είναι η συγκέντρωση ολικού αζώτου ανάλογα με το συντελεστή r για δεδομένη τιμή παροχής εισροής. Η συγκέντρωση όμως αυτή, για γραμμική παρεμβολή, προκύπτει μεγαλύτερη της πραγματικής, οδηγώντας συνεπώς σε συντηρητικές τιμές, οπότε και τα αποτελέσματα κρίνονται αξιόπιστα.



Σχήμα 7-17 Συντελεστής συσχέτισης TN, G συναρτήσει παροχής εισροής για $srt = 11$ d και $\mu_{maxA} = 0.9$ d⁻¹ και $r = 60$ %



Σχήμα 7-18 Συντελεστής συσχέτισης TN, G συναρτήσεις παροχής εισροής για $srt = 11$ d και $\mu_{maxA} = 0.9$ d⁻¹ και $Q = 74,000$ m³/d

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη παροχή εισροής για κάθε συνδυασμό srt και μ_{maxA} που εξετάστηκε στο υποκεφάλαιο 6.2. Ενδεικτικά το παραπάνω έγινε για χρόνο παραμονής στερεών ίσο με 11 ημέρες και ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών από 0.6 d⁻¹ έως 1.0 d⁻¹, για να μπορέσουν να συγκριθούν τα αποτελέσματα, με αυτά που προέκυψαν χωρίς την βελτιστοποίηση του συντελεστή r .

Πίνακας 7-6 Μέγιστη παροχή εισροής για βελτιστοποίηση και μη του συντελεστή επανακυκλοφορίας r , για χρόνο παραμονής στερεών 11 ημερών και ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών από 0.6 d⁻¹ έως 1.0 d⁻¹

$srt = 11$	r, opt	$r=106 \%$	Απολ. διαφ.	% διαφορά
μ_{maxA}	Q	Q	Q	Q
d ⁻¹	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d	%
0.60	72,317	63,970	8,347	13.05
0.68	73,309	64,005	9,304	14.54
0.70	73,330	64,017	9,312	14.55
0.80	73,119	64,096	9,023	14.08
0.90	72,836	64,145	8,691	13.55
1.00	72,543	64,176	8,367	13.04

Όπως προκύπτει από τον σχετικό πίνακα (πίνακας 7-6), η παροχή εισροής αυξάνεται κατά 14 % περίπου. Γίνεται εμφανές λοιπόν, πόσο σημαντική είναι η τιμή της παροχής επανακυκλοφορίας στον έλεγχο επάρκειας και γενικότερα στη λειτουργία της εγκατάστασης. Η αύξηση της παροχής μάλιστα είναι ανεξάρτητη του $\mu_{\max A}$, κάτι το αναμενόμενο, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα των προηγούμενων προσομοιώσεων.

7.4 Επίδραση του δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI) στον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης.

Στο βαθμονομημένο μοντέλο της Ε.Ε.Λ. που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική, δεν επιδρά ο δείκτης καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI) στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Το γεγονός αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι η συγκεκριμένη βαθμονόμηση δεν είναι σωστή, αλλά ότι θεωρήθηκε πως η καθιζησιμότητα της ιλύος δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά και παραμένει πρακτικώς σταθερή, ώστε σε κάθε περίπτωση το βαθμονομημένο αυτό μοντέλο να δίνει σωστά αποτελέσματα.

Η καθιζησιμότητα της ιλύος, όμως, εξαρτάται από παράγοντες που σχετίζονται με τη φάση ανάπτυξης των μικροοργανισμών (όπως ο χρόνος παραμονής στερεών), τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κροκίδων και διάφορους άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι μηχανισμοί επίδρασης αυτών των παραγόντων είναι περίπλοκοι και η εκτίμηση των αποτελεσμάτων της δράσης τους είναι δύσκολη τόσο ποιοτικά όσο, κυρίως, ποσοτικά. Ο δείκτης καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI), όπως και η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης είναι οι δύο συνηθέστεροι παράγοντες που χαρακτηρίζουν την καθιζησιμότητα αυτή των ιλύων. (Ανδρεαδάκης Ανδρέας, 1986)

Γίνεται εμφανές λοιπόν, πως η καθιζησιμότητα, καθώς εξαρτάται από μία πληθώρα παραγόντων, είναι αρκετά δύσκολο να παραμένει αμετάβλητη και έτσι κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί το πώς η τιμή του SVI επηρεάζει την απόδοση της εγκατάστασης και ειδικότερα τη μέγιστη παροχή εισροής για την οποία η λειτουργία της Ε.Ε.Λ. είναι σε συμφωνία με τα όρια της Ευρωπαϊκής οδηγίας. Όπως είναι φυσικό, για μικρές τιμές του δείκτη, δηλαδή για ευνοϊκά χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος, η εγκατάσταση μπορεί να λειτουργεί ομαλά και σε μεγάλες παροχές εισροής, ενώ όσο η τιμή του δείκτη αυξάνεται και η διαδικασία καθίζησης δυσχεραίνεται, η μέγιστη δυνατή παροχή εισροής μειώνεται.

Να σημειωθεί για μία ακόμη φορά πως η εσωτερική παροχή ανακυκλοφορίας είναι η μέγιστη δυνατή από πλευράς μηχανολογικού εξοπλισμού, δηλαδή $259,200 \text{ m}^3/\text{d}$. Επίσης, για τον υπολογισμό της μέγιστης παροχής εισροής ακολουθήθηκε η μεθοδολογία του προηγούμενου υποκεφαλαίου, βελτιστοποιώντας δηλαδή τον συντελεστή επανακυκλοφορίας r , για τον οποίο επελέγησαν ως μέγιστη και ελάχιστη τιμή το 40 % και 200 % αντίστοιχα.

Εξετάστηκαν τρία σενάρια χρόνου παραμονής στερεών, ενώ ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας και στις τρεις περιπτώσεις παρέμεινε σταθερός

και ίσος με 0.8 d^{-1} , καθώς θεωρείται αντιπροσωπευτική τιμή. Οι τρεις διαφορετικοί χρόνοι παραμονής στερεών είναι αυτοί των 7, 8.2 και 10 ημερών, και επελέγησαν ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση της εγκατάστασης τόσο στον πραγματικό χρόνο παραμονής στερεών που λειτουργεί, δηλαδή 8.2 ημέρες, όσο και σε δύο ακραίες τιμές, αυτές των επτά και δέκα ημερών. Οι τιμές του SVI που εξετάστηκαν είναι τα 80, 100, 150, 180, 200 και 250 mg/l.

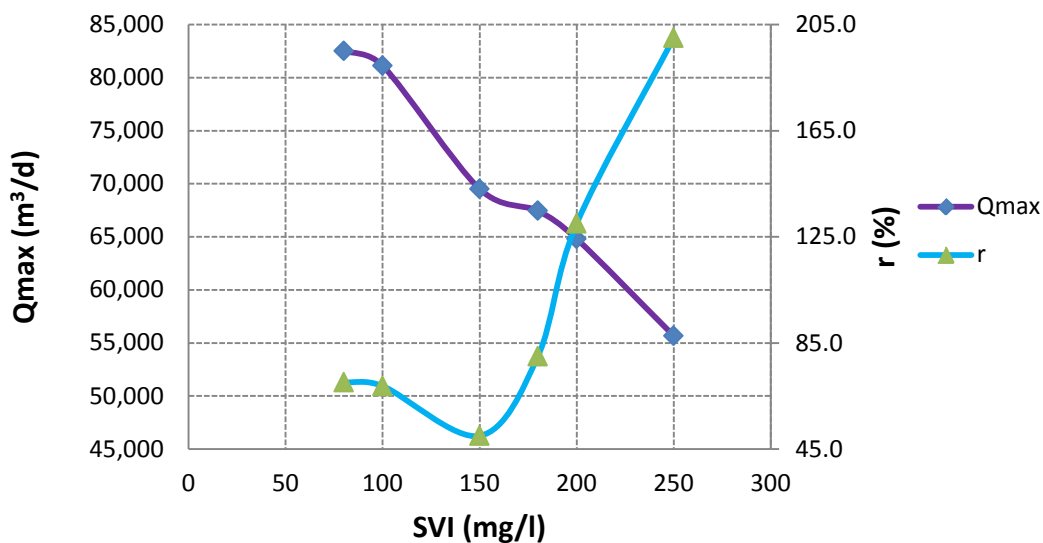
Η ποιοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων είναι σε συμφωνία με τα θεωρητικά προσδοκώμενα αποτελέσματα, καθώς για αύξηση της τιμής του δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος παρατηρείται μείωση στην μέγιστη παροχή εισροής.

Συγκεκριμένα, για μικρές τιμές του SVI, δηλαδή για 80 και 100 mg/l, η τιμή της μέγιστης παροχής εισροής είναι μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίστηκε στα προηγούμενα σενάρια, στα οποία ο δείκτης SVI δεν λαμβανόταν υπόψη στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Επίσης, στις περιπτώσεις αυτές, ο κρίσιμος παράγοντας λειτουργίας είναι η συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή και η φόρτιση στερεών στις δεξαμενές τελικής καθίζησης, ενώ η συγκέντρωση στερεών στην εκροή, όπως ήταν αναμενόμενο, έχει μικρές τιμές.

Ακόμη, για τιμή του δείκτη ίση με 150 mg/l, η υπολογιζόμενη παροχή δεν απέχει πολύ από αυτή που υπολογίστηκε στα σενάρια τα οποία ήταν ανεξάρτητα του SVI. Το γεγονός αυτό επαληθεύει τη σωστή βαθμονόμηση του προσομοιώματος, καθώς η παραπάνω τιμή του δείκτη είναι η βιβλιογραφικά προτεινόμενη σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα για την καθιζησιμότητα της ιλύος (Janeczukowicz et al, 2001). Τέλος όταν η τιμή του δείκτη υπερβεί τα 180 mg/l, η μέγιστη παροχή ελαττώνεται σημαντικά σε τιμές μάλιστα μικρότερες της πραγματικής παροχής λειτουργίας. Σε όλες αυτές τις παραμετρικές διερευνήσεις, υπάρχει αστοχία ως προς την συγκέντρωση στερεών στην εκροή.

Σχετικά με την τιμή του συντελεστή επανακυκλοφορίας, για την οποία προκύπτει η μέγιστη κάθε φορά παροχή εισροής, όπως ήταν αναμενόμενο η τιμή αυτή αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο δείκτης καθιζησιμότητας. Ένα τοπικό ελάχιστο που παρατηρείται, προκύπτει καθώς από το σημείο εκείνο και μετά υπάρχει αστοχία ως προς τη συγκέντρωση στερεών στην εκροή, ενώ για μικρότερες τιμές του SVI, όπως προαναφέρθηκε, η αστοχία εντοπίζεται στη συγκέντρωση ολικού αζώτου.

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται και σχηματικά στο γράφημα που ακολουθεί, το οποίο απεικονίζει τη μέγιστη παροχή εισροής και την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή r για την οποία αυτή προκύπτει. Η συγκεκριμένη προσομοίωση αφορά χρόνο παραμονής στερεών επτά ημερών.



Σχήμα 7-19 Μέγιστη παροχή και αντίστοιχη τιμή συντελεστή επανακυκλοφορίας για $srt = 7 \text{ d}$ και $\mu_{max_A} = 0.8 \text{ d}^{-1}$, συναρτήσει του SVI

Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα και για τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν.

Όπως προκύπτει από τους ακόλουθους τρεις πίνακες, και γίνεται πιο εμφανές στον συγκεντρωτικό πίνακα (πίνακας 7-10), όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στερεών, η μέγιστη παροχή εισροής ελαττώνεται για σταθερή τιμή του δείκτη SVI, κάτι το αναμενόμενο.

Πίνακας 7-7 Αποτελέσματα προσομοίωσης για για $srt = 7 \text{ d}$ και $\mu_{max_A} = 0.8 \text{ d}^{-1}$

SVI	Qmax	r	MLSS	Qair,total	COD _s	COD	TN	TSS	NO ₃ N	NH ₄ N	G
mg/l	m ³ /d	%	g/m ³	m ³ /hr	gCOD/m ³	gCOD/m ³	gN/m ³	g/m ³	gN/m ³	gN/m ³	g/m ²
80	82,525	70.2	3,713	15,551	29.30	63.15	10.00	24.37	7.93	0.33	120.00
100	81,125	68.8	3,649	15,298	29.31	64.04	10.00	25.00	7.90	0.33	115.01
150	69,511	50.0	3,162	13,532	29.38	64.09	9.88	25.00	7.85	0.28	77.60
180	67,457	80.0	3,037	12,614	29.26	63.99	8.94	25.00	6.86	0.30	85.00
200	64,807	130.0	2,938	11,964	29.09	63.84	8.15	25.00	6.01	0.35	101.01
250	55,674	200.0	2,522	10,209	29.04	63.79	7.05	25.00	4.99	0.27	97.01

Πίνακας 7-8 Αποτελέσματα προσομοίωσης για για $srt = 8.2 \text{ d}$ και $\mu_{\max A} = 0.8 \text{ d}^{-1}$

SVI	Qmax	r	MLSS	Qair,total	COD _s	COD	TN	TSS	NO ₃ N	NH ₄ N	G
mg/l	m ³ /d	%	g/m ³	m ³ /hr	gCOD/m ³	gCOD/m ³	gN/m ³	g/m ³	gN/m ³	gN/m ³	g/m ²
80	79,314	64.2	4,000	15,519	30.62	63.99	10.00	24.06	8.21	0.15	119.91
100	79,013	65.5	3,986	15,448	30.60	65.14	10.00	24.91	8.15	0.15	120.00
150	69,236	60.0	3,495	13,595	30.48	65.14	9.54	25.00	7.71	0.14	89.52
180	65,179	110.0	3,322	12,476	29.82	64.51	8.36	25.00	6.44	0.20	104.69
200	61,373	130.0	3,127	11,712	29.85	64.53	7.91	25.00	6.01	0.18	101.79
250	51,237	200.0	2,613	9,700	29.47	64.15	6.78	25.00	4.89	0.18	92.62

Πίνακας 7-9 Αποτελέσματα προσομοίωσης για για $srt = 10 \text{ d}$ και $\mu_{\max A} = 0.8 \text{ d}^{-1}$

SVI	Qmax	R	MLSS	Qair,total	COD _s	COD	TN	TSS	NO ₃ N	NH ₄ N	G
mg/l	m ³ /d	%	g/m ³	m ³ /hr	gCOD/m ³	gCOD/m ³	gN/m ³	g/m ³	gN/m ³	gN/m ³	g/m ²
80	75,085	58.8	4,370	15,276	32.25	65.01	10.00	23.68	8.40	0.09	119.95
100	74,853	59.8	4,357	15,215	32.23	66.13	10.00	24.51	8.34	0.09	119.98
150	66,910	70.0	3,910	13,493	31.65	66.23	9.21	25.00	7.52	0.09	102.51
180	62,000	110.0	3,657	12,310	31.04	65.65	8.19	25.00	6.47	0.11	109.62
200	57,579	180.0	3,404	11,355	30.58	65.18	7.26	25.00	5.53	0.11	126.58
250	46,710	200.0	2,759	9,168	29.47	64.06	6.59	25.00	4.72	0.27	89.23

Πίνακας 7-10 Μέγιστη παροχή εισροής συναρτήσει SVI και srt

SVI (mg/l)	Q (m ³ /d)		
	srt = 7 d	srt = 8.2 d	srt = 10 d
80	82,525	79,314	75,085
100	81,125	79,013	74,853
150	69,511	69,236	66,910
180	67,457	65,179	62,000
200	64,807	61,373	57,579
250	55,674	51,237	46,710

Βάσει όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων προσομοίωσης, καθώς επίσης και των θεωρητικών δεδομένων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η τιμή του δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI) είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία της εγκατάστασης. Η τιμή του δείκτη, επηρεάζει δραστικά τις συγκεντρώσεις ολικών αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα και στερεών στην εκροή, όπως επίσης και τη φόρτιση στερεών στις δεξαμενές τελικής καθίζησης. Συνεπώς, συνιστάται, αν όχι επιβάλλεται, ο παραπάνω δείκτης να λαμβάνεται υπόψη στη βαθμονόμηση του μοντέλου.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

8.1 Συμπεράσματα

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μπορούν να χωριστούν σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, περιγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που αφορούν την απόκριση της εγκατάστασης που μελετήθηκε. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η απόκριση της εγκατάστασης για ένα εύρος τιμών του χρόνου παραμονής στερεών (srt), μεταβάλλοντας τόσο την θερμοκρασία (T) των λυμάτων, όσο και κάποιες στοιχειομετρικές και κινητικές μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές είναι ο ρυθμός παραγωγής της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας (Y_H και Y_A αντίστοιχα) και ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας στους 20 °C (μ_{max_H} και μ_{max_A} αντίστοιχα). Οι παράμετροι που εξετάστηκαν σε κάθε ένα από τα σενάρια ήταν η συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα (MLSS), η συνολική απαίτηση σε οξυγόνο της εγκατάστασης (Total Air Flow), η συγκέντρωση ολικού και διαλυτού οργανικού φορτίου στην εκροή (COD και CODs αντίστοιχα), η συγκέντρωση ολικών στερεών στην εκροή (TSS) και οι συγκεντρώσεις αζώτου στην εκροή τόσο του ολικού (TN) όσο και των νιτρικών (NO_3N) και αμμωνιακών (NH_4N).

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων, το σημαντικότερο στοιχείο που προκύπτει, είναι πως από τις τέσσερις στοιχειομετρικές και κινητικές μεταβλητές για τις οποίες πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, η μεταβλητή που επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, μ_{max_A} . Ειδικότερα, επηρεάζεται η διεργασία της νιτροποίησης, όπως άλλωστε είναι φυσικό. Η διεργασία αυτή σχετίζεται με τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών, των νιτρικών και του ολικού αζώτου στην εκροή, όπως επίσης και με την ολική απαίτηση της εγκατάστασης σε αέρα. Σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας των λυμάτων στην απόδοση της εγκατάστασης, η επίδραση αυτή είναι εξίσου σημαντική και ανάλογη με την επίδραση του μ_{max_A} καθώς η θερμοκρασία επηρεάζει δραστικά τον ρυθμό ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας $\mu_{max_{A,T}}$.

Όσον αφορά την απόκριση των παραμέτρων που εξετάστηκαν, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- **MLSS:** εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής στερεών, το συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας και τη θερμοκρασία των λυμάτων. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα είναι ανάλογη των δύο πρώτων μεταβλητών, αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, ενώ πρακτικός είναι ανεξάρτητη από τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης τόσο της

ετεροτροφικής όσο και της αυτοτροφικής βιομάζας. Σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν, η συγκέντρωση είναι εντός των συμβατικών ορίων για την ομαλή και οικονομική λειτουργία του αερισμού ($2000 < \text{MLSS} < 5000$).

- **Total Air Flow:** Η ολική απαίτηση της εγκατάστασης σε αέρα είναι ανάλογη του χρόνου παραμονής στερεών και της θερμοκρασίας και αντιστρόφως ανάλογη του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας. Επίσης δεν εξαρτάται πρακτικώς από τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας. Τέλος σημαντικός παράγοντας είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας καθώς από αυτόν εξαρτάται κυρίως η πραγματοποίηση της νιτροποίησης. Συγκεκριμένα, για τα σενάρια που δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση, η ολική απαίτηση σε αέρα ελαττώνεται αισθητά, όπως ήταν φυσικό.

- **COD, COD soluble:** Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια η εγκατάσταση λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής οδηγίας. Η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου (ολικού και διαλυτού) στην έξοδο της εγκατάστασης εξαρτάται κυρίως από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας. Πιο συγκεκριμένα, για τιμές της παραπάνω μεταβλητής έως και 0.65 d^{-1} , η συγκέντρωση οργανικού φορτίου παραμένει σταθερή, ενώ για μεγαλύτερες τιμές παρατηρείται σχέση αναλογίας. Ακόμη, σχέση αναλογίας υπάρχει και με τον χρόνο παραμονής στερεών, οι διαφορές όμως στην τιμή εκροής είναι πολύ μικρές και πιθανότατα είναι απόρροια δευτερογενών παραγόντων, όπως η φθορά των μικροοργανισμών.

- **TSS:** Η εγκατάσταση πληροί τις απαιτήσεις της οδηγίας σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Επίσης, η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή δεν επηρεάζεται πρακτικώς από καμία από τις μεταβλητές που εξετάστηκαν.

- **NH₄-N:** Για χρόνο παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση, ενώ ακόμα και για χρόνο ίσο με επτά ημέρες, σε πολλές περιπτώσεις, η εγκατάσταση βρίσκεται εκτός των συμβατικών ορίων. Η κατάσταση βελτιώνεται αισθητά για μεγαλύτερες τιμές της θερμοκρασίας, οπότε και παρατηρείται συμμόρφωση με την οδηγία ακόμα και για $srt = 6 \text{ d}$ για αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό Κελσίου. Σημαντικότερος παράγοντας είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας. Σε περιπτώσεις που παρατηρείται έως και 25 % αναχαίτιση του μ_{maxA} σε σχέση με την θεωρητικά μέγιστη δυνατή τιμή (0.8 d^{-1}), η εκροή δεν ξεφεύγει από τα συμβατικά όρια, σε αντίθεση με χαμηλότερες τιμές του συντελεστή.

- **NO₃-N:** Το σημαντικότερο στοιχείο που εξάγεται από τα διαγράμματα είναι ότι η ολική συγκέντρωση αζώτου στην εκροή είναι κυρίως η συγκέντρωση νιτρικών, σε ποσοστό μάλιστα άνω του 80 % σε πολλές περιπτώσεις. Για να λειτουργήσει,

λοιπόν, η εγκατάσταση πιο αποδοτικά ως προς τη συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μεγαλύτερη απονιτροποίηση. Επίσης, η συγκεκριμένη συγκέντρωση είναι πρακτικά ανεξάρτητη όλων των εξεταζόμενων μεταβλητών πλην του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας και της θερμοκρασίας των λυμάτων, καθώς οι δύο παραπάνω μεταβλητές επηρεάζουν την διεργασία της νιτροποίησης. Τέλος, για χρόνους παραμονής στερεών πέντε και έξι ημερών έχουμε μικρές τιμές νιτρικών, λόγω απουσίας νιτροποίησης.

- **TN:** Ισχύουν τα ίδια με την συγκέντρωση νιτρικών. Τα νιτρικά άλλωστε είναι αυτά που επηρεάζουν πολύ την συγκέντρωση ολικού αζώτου, και σε περιπτώσεις που δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση, η εγκατάσταση ξεφεύγει από τα όρια της Ευρωπαϊκής οδηγίας.

Το δεύτερο μέρος των προσομοιώσεων ασχολείται με τον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης. Στόχος του τμήματος αυτού της διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση και υπόδειξη μεθόδων για τη βελτιστοποίηση και αναβάθμιση της λειτουργίας δεδομένης Ε.Ε.Λ., ώστε να επιτρέπεται η μέγιστη δυνατή αξιοποίησή της.

Ο κρίσιμος παράγοντας λειτουργίας της συγκεκριμένης εγκατάστασης, ώστε να είναι συμβατή με τα όρια της Οδηγίας 91/271 της Ε.Ε. για ευαίσθητους αποδέκτες, όσον αφορά τις συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου, στερεών και ολικού αζώτου στην εκροή και για μεγαλύτερες παροχές εισροής είναι η διεργασία της απονιτροποίησης. Ενώ η συγκέντρωση οργανικού φορτίου βρίσκεται εντός ορίων της οδηγίας ακόμα και για αύξηση της παροχής κατά 140 %, η συγκέντρωση ολικού αζώτου υπερβαίνει τα όρια ακόμα για αύξηση μόλις 10 % στην παροχή εισροής. Εξίσου σημαντική παράμετρος είναι και η φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης, η οποία για μεγάλους χρόνους παραμονής είναι κρισιμότερη και από τη συγκέντρωση ολικού αζώτου.

Για το λόγο αυτό, ερευνήθηκε η απόδοση της εγκατάστασης με αύξηση της παροχής εσωτερικής ανακυκλοφορίας, στην μέγιστη δυνατή τιμή βάσει του εγκατεστημένου μηχανολογικού εξοπλισμού. Για την παροχή αυτή, η συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή μειώνεται κατά 1 gN/m^3 σε σχέση με την πραγματική, ανεξαρτήτως της παροχής εισροής, διατηρώντας σταθερά τα υπόλοιπα λειτουργικά και στοιχειομετρικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.

Εξετάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί χρόνου παραμονής στερεών και μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης αυτοτροφικών μικροοργανισμών. Ένα αρκετά ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει, είναι πως η λειτουργία της εγκατάστασης επηρεάζεται κυρίως από τον χρόνο παραμονής στερεών και όχι από τον βαθμό αναχαίτισης του $\mu_{\max A}$. Ειδικότερα, από την τιμή εκείνη του $\mu_{\max A}$ για την οποία πραγματοποιείται επαρκώς η διεργασία της νιτροποίησης για κάθε τιμή του s_{rt} , παρατηρείται πως η τιμή της μέγιστης παροχής εισροής είναι πρακτικώς ανεπηρέαστη.

Επίσης, για ποσοστό αναχαίτισης του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης αυτοτροφικών μικροοργανισμών έως και 25 % ($\mu_{\max} = 0.6 \text{ d}^{-1}$), η εγκατάσταση λειτουργεί

σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής οδηγίας ακόμα και για αύξηση της τάξεως του 9.50 % στην παροχή εισόδου για χρόνους παραμονής στερεών 8.2 και οκτώ ημερών. Τέλος, όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στερεών, παρατηρείται μείωση της μέγιστης δυνατής παροχής εισροής, σε τιμές μάλιστα αισθητά μικρότερες από την πραγματική παροχή εισροής (- 11 %) για χρόνο παραμονής 14 ημερών.

Έπειτα, εξετάστηκε η επίδραση του συντελεστή επανακυκλοφορίας της ιλύος (r) στη μέγιστη δυνατή παροχή εισροής. Βελτιστοποιώντας την τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή για χρόνο παραμονής στερεών 11 ημερών, η παροχή εισροής αυξάνεται κατά 14 % περίπου. Ο λόγος είναι ότι για μικρότερες τιμές του r από την τιμή λειτουργίας (106 %) μειώνεται η συγκέντρωση ολικών στερεών στον Β.Α. οπότε και βελτιώνεται η συγκέντρωση ολικών στερεών στην εκροή, όπως επίσης και η φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης, η οποία ήταν και ο παράγοντας αστοχίας για μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών. Γίνεται εμφανές λοιπόν, πόσο σημαντική είναι η τιμή της παροχής επανακυκλοφορίας στον έλεγχο επάρκειας και γενικότερα στην λειτουργία της εγκατάστασης. Η αύξηση της παροχής, μάλιστα, είναι ανεξάρτητη του $\mu_{\max A}$, κάτι το αναμενόμενο, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα των προηγούμενων προσομοιώσεων.

Το τελευταίο στοιχείο που μελετήθηκε είναι η επίδραση του δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος στον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης. Βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης εξάγεται το συμπέρασμα ότι η τιμή του δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI) είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία της εγκατάστασης. Η τιμή του δείκτη, επηρεάζει δραστικά τις συγκεντρώσεις ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα και στερεών στην εκροή, όπως επίσης και τη φόρτιση στερεών στις δεξαμενές τελικής καθίζησης. Συνεπώς είναι προτιμότερο, αν όχι σκόπιμο, ο παραπάνω δείκτης να λαμβάνεται υπόψη στην βαθμονόμηση του μοντέλου. Ενδεικτικά, μπορεί να αναφερθεί πως η μέγιστη δυνατή παροχή εισροής για χρόνο παραμονής στερεών επτά ημερών και $\mu_{\max A} = 0.8 \text{ d}^{-1}$, για τιμή του δείκτη SVI ίση με 80 mg/l είναι 82,500 m³/d, ενώ όταν ο δείκτης έχει τιμή 180 mg/l, η παροχή δεν ξεπερνάει τα 56,000 m³/d. Στο σημείο αυτό να επισημανθεί, ότι η δυνατή μέγιστη παροχή προκύπτει για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή r , όσο αυξάνεται η τιμή του SVI.

Συμπερασματικά, για τα δεδομένα φορτία και την παρούσα εγκατάσταση, φαίνεται ότι αύξηση της επάρκειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με αύξηση της εσωτερικής ανακυκλοφορίας, όπως και βελτιστοποίηση της παροχής επανακυκλοφορίας. Η βελτιστοποίηση αυτή οδηγεί σε τιμές του συντελεστή σημαντικά μειωμένες από την αρχική τιμή λειτουργίας της εγκατάστασης, για μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών.

Πίνακας 8-1 Ενδεικτικός πίνακας μέγιστης παροχής εισροής, με χρήση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε

	srt = 7 d & $\mu_{\max A} = 0.68 \text{ d}^{-1}$	srt = 11 d & $\mu_{\max A} = 0.68 \text{ d}^{-1}$
Συνθήκες λειτουργίας	61,823 m ³ /d	63,994 m ³ /d
$Q_R = \max$	75,726 m ³ /d	64,005 m ³ /d
Βελτιστοποίηση r	77,374 m ³ /d ($r = 92\%$)	73,309 m ³ /d ($r = 54.9 \%$)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω ενδεικτικού πίνακα, φαίνεται η καθοριστική σημασία της παροχής εσωτερικής ανακυκλοφορίας στην μέγιστη δυνατή παροχή εισροής για χρόνο παραμονής στερεών επτά ημερών, μικρή δηλαδή τιμή του srt . Η βελτιστοποίηση του συντελεστή επανακυκλοφορίας της ιλύος, βελτιώνει την απόδοση, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό. Για χρόνο παραμονής στερεών 11 ημερών, μεγάλη δηλαδή τιμή, η αύξηση της εσωτερικής ανακυκλοφορίας δεν βελτιώνει τα αποτελέσματα, καθώς κρίσιμη παράμετρος είναι φόρτιση στερεών των δεξαμενών τελικής καθίζησης. Αντίθετα, για βελτιστοποίηση της παροχής επανακυκλοφορίας, η παροχή αυξάνεται σημαντικά.

8.2 Θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Η εργασία αυτή αποτελεί μία μελέτη με συγκεκριμένο αντικείμενο και προκαθορισμένους στόχους. Στα πλαίσια της επιστημονικής έρευνας, η οποία ως γνωστόν έχει αρχή αλλά δεν έχει τέλος, θα μπορούσαν να ερευνηθούν και άλλες παράμετροι του ευρύτερου θέματος.

Ενδεικτικά στην εργασία αυτή, δεν εξετάστηκε η απόκριση και λειτουργία της εγκατάστασης ως προς τη συγκέντρωση φωσφόρου στην εκροή. Ένα ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης, θα ήταν να ερευνηθεί αν και κατά πόσο μεταβάλλονται τα αποτελέσματα κατά τον έλεγχο επάρκειας της εγκατάστασης με προσθήκη των ορίων της Ευρωπαϊκής οδηγίας για τη συγκέντρωση φωσφόρου στην εκροή, όπως και να εξετασθεί εάν η συγκέντρωση αυτή επηρεάζεται αισθητά από κάποια από τις μεταβλητές, για τις οποίες έγινε ανάλυση ευαισθησίας. Στις μεταβλητές αυτές, επίσης, θα μπορούσε να προστεθεί και ο ρυθμός βακτηριδιακής φθοράς των μικροοργανισμών (b).

Ένα επίσης ενδιαφέρον στοιχείο, είναι η επέκταση της ανάλυσης που έγινε για την επίδραση του συντελεστή επανακυκλοφορίας και στους υπόλοιπους συνδυασμούς χρόνων παραμονής στερεών και μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας, ώστε να ερευνηθεί αν παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στην μέγιστη δυνατή παροχή εισροής.

Τέλος, ένα εξίσου σημαντικό αντικείμενο έρευνας, είναι να πραγματοποιηθεί μία οικονομοτεχνική μελέτη της επίδρασης της παροχής εσωτερικής ανακυκλοφορίας και της παροχής επανακυκλοφορίας στην λειτουργία της εγκατάστασης. Η συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή, όπως είναι αναμενόμενο, ελαττώνεται για αύξηση τόσο της εσωτερικής ανακυκλοφορίας, όσο και της επανακυκλοφορίας ιλύος από τις δεξαμενές τελικής καθίζησης. Θα μπορούσε, λοιπόν, να εξεταστεί ο οικονομικότερος κάθε φορά συνδυασμός των δύο αυτών παροχών, ώστε η εγκατάσταση να λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της οδηγίας, για την αναμενόμενη κάθε φορά παροχή εισροής.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Barker and Dold. (1997). General model for biological nutrient removal activated-sludge systems. *Water Environmental Research*, σσ. 969-984.
- 2) Cabrero et al. (1998). Effects of copper and zinc on the activated sludge bacteria growth kinetics. *Water Res*, 1355-1362.
- 3) Ducklow H.W. and Shiah F.-K. (1993). *Bacterial production in estuaries. In Aquatic Microbiology, An Ecological Approach.*
- 4) Ellis T.G. and Anselm C.V. (1999). Effects of batch discharges on extant biodegradation kinetics in activated sludge systems. *Water Environ. Res.*, 290-298.
- 5) Gernaey et al. (2003). Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation and simulation: state of art. *Environmental Modelling & Software.*
- 6) Grady et al. (1996). Variability in kinetic parameters; a review of the possible causes and proposed terminology. *Water Res*, 742-748.
- 7) Grady et al. (1999). *Biological Wastewater Treatment.*
- 8) Henze et al. (1987). Activated sludge model no 1. *IAWPRC Scientific and Technical Report No 1.*
- 9) Henze et al. (1994). Activated sludge model no 2. *IAWQ Scientific and Technical Reports.*
- 10) Henze et al. (1995). Activated sludge model 2. *IAWPRC Scientific and Technical Report No 3.*
- 11) Henze et al. (2008). *Biological Wastewater Treatment Principles Modelling and Design.*
- 12) Hydromantis Inc. (1999). *GPS-X Technical Reference v. 2.4.*
- 13) Hydromantis Inc. (1999). *GPS-X Tutorial v. 2.4.*
- 14) Hydromantis Inc. (1999). *GPS-X User's Guide v. 2.4.*
- 15) IWA. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3.* IWA.
- 16) Janczukowicz et al. (2001). Settling Properties of Activated Sludge from a Sequencing Batch Reactor (SBR). *Polish Journal of Environmental Studies*, 15-20.
- 17) Jeppsson Ulf. (1996). *Modelling Aspects of Wastewater Treatment Processes.*
- 18) Jeppsson Ulf. (n.d.). *A General Description of the IAWQ Activated Sludge Model No. 1.*
- 19) Linsley et al. (1991). *McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering.*
- 20) Schoderbek et al. (1990). *Management Systems: Conceptual Considerations.*

- 21) Wentel et al. (1989). Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems. Part II: Experimental behavior. *Water SA*, σσ. 71-88.
- 22) Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ. . (n.d.). *Περιγραφή Μοντέλου IAWQ*.
- 23) Ανδρεαδάκης Ανδρέας. (1986). *Εγκαταστάσεις επεξεργασίας και διάθεσης αστικών αποβλήτων*. Αθήνα.
- 24) Ανδρεαδάκης Ανδρέας. (2009). *Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και ιλύων*. Αθήνα.
- 25) Ανδρεαδάκης Ανδρέας et al. (2008). *Περιβαλλοντική Τεχνολογία*.
- 26) Γρηγορόπουλος. (2002). *Ρύθμιση και εφαρμογή υπολογιστικού προγράμματος GPS-X στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων*.
- 27) Κρομμυδάς Δημήτριος. (2005). *Βιολογική απομάκρυνση του αζώτου από υγρά απόβλητα με παράκαμψη της παραγωγής νιτρικών*.
- 28) Μπούσουλας Άγγελος. (2010). *Εφαρμογή Μαθηματικής Προσομοίωσης για τον σχεδιασμό και τον έλεγχο λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων με απομάκρυνση θρεπτικών*.
- 29) Ρουμελιώτης Μάνος. (2001). *Μοντελοποίηση και προσομοίωση*.