



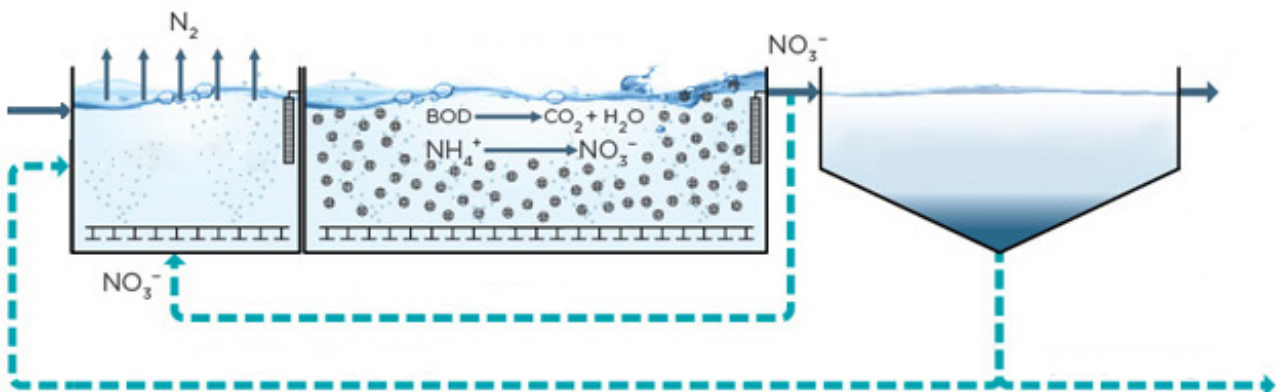
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

*Μαθηματική προσομοίωση συστημάτων ενεργού ιλύος με
βιοαντιδραστήρες κινούμενης κλίνης (MBBR)*



Διπλωματική Εργασία : Ανδριανή Γαλάνη

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

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

*Μαθηματική προσομοίωση συστημάτων ενεργού ιλύος με
βιοαντιδραστήρες κινούμενης κλίνης (MBBR)*

Διπλωματική εργασία : Ανδριανή Γαλάνη

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος, Λέκτορας ΕΜΠ

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 © Γαλάνη Ανδριανή, 2013.

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 ευχαριστίες μου, στον καθηγητή 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.

Επίσης, ευχαριστώ τη συμφοιτήριά μου Σούρλα Φανή, για την άψογη συνεργασία και υποστήριξη της σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή μαθηματικής προσομοίωσης για τη μελέτη υβριδικών συστημάτων ενεργού ιλύος με βιοαντιδραστήρες κινούμενης κλίνης (MBBR) για την απομάκρυνση οργανικού άνθρακα και αζώτου από αστικά λύματα. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό μοντέλο ενεργού ιλύος 1 (ASM1), ενώ η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού WEST 2012 της DHI. Αρχικά, διερευνήθηκε η απόκριση δύο συστημάτων ενεργού ιλύος, ενός συμβατικού και ενός υβριδικού (MBBR/IFAS), για ένα εύρος τιμών του χρόνου παραμονής στερεών (SRT), μεταβάλλοντας ορισμένες στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους. Οι παράμετροι 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 (μ_{maxA}) στους 20 °C. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για το σύστημα MBBR/IFAS, μεταβάλλοντας την πυκνότητα του βιοφίλμ (biofilm density), το ποσοστό των βιοφορέων στο βιοαντιδραστήρα (solid support) και την ειδική επιφάνεια (specific surface area). Διεξάχθηκε, ακόμη έλεγχος επάρκειας των συστημάτων για δύο σενάρια, ένα για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και ένα για μειωμένη θερμοκρασία και χρόνο παραμονής στερεών. Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση δυναμικής φόρτισης με ωριαία μεταβολή της παροχής στις συγκεντρώσεις της εκροής και των δύο συστημάτων.

Λέξεις Κλειδιά

Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, προσομοίωση, συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος, συστήματα MBBR/IFAS, ανάλυση ευαισθησίας, έλεγχος επάρκειας, θερμοκρασία, ρυθμός παραγωγής ετεροτροφικής/αυτοτροφικής βιομάζας, μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης ετεροτροφικής/αυτοτροφικής βιομάζας, χρόνος παραμονής στερεών, ποσοστό βιοφορέων, πυκνότητα βιοφίλμ, ειδική επιφάνεια, δυναμική φόρτιση, WEST 2012

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is the application of mathematical simulation for the studying of hybrid activated sludge systems with moving bed biofilm reactors (MBBR) for the removal of carbon and nitrogen concentrations from urban wastewater. The mathematical model used, is the activated sludge model ASM1, while the simulation was conducted over the WEST 2012 software of DHI. Initially, the response of the plant for a range of solids retention time (SRT), the production rate of heterotrophic (Y_H) and autotrophic biomass (Y_A) and the maximum growth rate of heterotrophic (μ_{maxH}) and autotrophic biomass (μ_{maxA}) was investigated. A sensitivity analysis was carried out for the MBBR/IFAS system by changing the values of the biofilm density, the solid support and the specific surface area. Furthermore, the efficiency of the systems was tested by conducting two scenarios, one for their operational characteristics and the other for lower temperature and sludge retention time. Finally, a dynamic simulation was conducted by changing the hourly inflow to both systems.

Key Words

Wastewater treatment plants, simulation, activated sludge systems, MBBR/IFAS systems, sensitivity analysis, control efficiency, temperature, production rate of heterotrophic/autotrophic biomass, maximum growth rate of heterotrophic/autotrophic biomass, sludge retention time, solid support, biofilm density, specific surface area, dynamic simulation, WEST 2012

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ABSTRACT.....	vi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ.....	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 1 (ASM1)	5
2.2.1 Μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου	6
2.2.2 Διεργασίες μοντέλου	10
2.2.3 Περιορισμοί του μοντέλου	14
2.3 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 2 (ASM2)	15
2.3.1 Μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου	15
2.3.2 Διεργασίες μοντέλου	17
2.3.3 Περιορισμοί του μοντέλου	24
2.4 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 2d (ASM2d)	25
2.5 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 3 (ASM3)	27
3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ WEST	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Το περιβάλλον του WEST	31
3.3 Είδη εικονικών πειραμάτων στο λογισμικό	32
3.4 Μοντέλα ενεργού ιλύος στο λογισμικό.....	33
3.5 Βιολογική επεξεργασία	34
3.6 Διεργασίες διαχωρισμού των λυμάτων	34
3.7 Επεξεργασία ιλύος	37

3.8	Μορφές ελέγχου	37
3.9	Χημικές ουσίες	38
4.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ MBBR/MBBR/IFAS	39
4.1	Εισαγωγή.....	39
	Οι διασκορπιζόμενοι βιοφορείς	43
4.2	Μαθηματικές προσεγγίσεις μοντέλων για συστήματα MBBR/IFAS (υβριδικά συστήματα).....	43
4.3	Μέθοδοι διαστασιολόγησης συστημάτων MBBR/MBBR/IFAS.....	46
4.4	Πλεονεκτήματα συστημάτων MBBR/IFAS.....	47
5.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	49
6.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	55
6.1	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης των συστημάτων συναρτήσει του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας Y_H	55
6.2	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης των συστημάτων συναρτήσει του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας Y_A	63
6.3	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης των συστημάτων συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας μ_{maxH}	70
6.4	Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης των συστημάτων συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας μ_{maxA}	78
6.5	Γενικά συμπεράσματα για κάθε μία από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν	86
7.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ MBBR/IFAS.....	103
7.1	Επίδραση του solid support.....	103
7.2	Επίδραση της ειδικής επιφάνειας (specific surface area).....	107
7.3	Επίδραση της πυκνότητας του βιοφίλμ (biofilm density).....	111
8.	ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	115
8.1	Έλεγχος επάρκειας για τα λειτουργικά δεδομένα	115
8.2	Έλεγχος επάρκειας για χρόνο παραμονής στερεών 5 ημερών.....	119

9. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	125
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	131
11. ΑΝΑΦΟΡΕΣ	137

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές παραμέτρων για ουδέτερο pH (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)	9
Πίνακας 2.2 Τυπικές τιμές χαρακτηριστικών των λυμάτων σε αστικά απόβλητα (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)	10
Πίνακας 2.3 Διεργασίες, κινητικές και στοιχειομετρία του μοντέλου ASM1 (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)	13
Πίνακας 2.4 Στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης (IWA, 2000)	18
Πίνακας 2.5 Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης των ετεροτροφικών μ/ο (IWA, 2000)	19
Πίνακας 2.6 Στοιχειομετρία των διεργασιών των πολυφωσφορικών βακτηρίων (IWA, 2000)	21
Πίνακας 2.7 Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης και αποσύνθεσης των αυτοτροφικών μ/ο (IWA, 2000).....	21
Πίνακας 2.8 Στοιχειομετρία και κινητική που περιγράφουν την ταυτόχρονη κατακρήμιση του φωσφόρου (IWA, 2000).....	22
Πίνακας 2.9 Διεργασίες και ρυθμοί διεργασιών του μοντέλου ASM2 (IWA, 2000).....	22
Πίνακας 2.10 Στοιχειομετρία των διεργασιών των πολυφωσφορικών βακτηρίων, οι οποίες ανήκουν μόνο στο ASM2d (IWA, 2000).....	26
Πίνακας 3.1 Δυνατότητες του WEST 2012.....	30
Πίνακας 4.1 Τύποι βιοφορέων (Πηγή: Brentwood Industries, 2009).....	42
Πίνακας 5.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά στην είσοδο της εγκατάστασης.....	50
Πίνακας 5.2 Κλασματοποίηση του COD.....	50
Πίνακας 5.3 Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις για απορρίψεις από Ε.Ε.Λ. , σύμφωνα με τα όρια της Οδηγίας 91/271.	51
Πίνακας 5.4 Κινητικές και στοιχειομετρικές παράμετροι, παράμετροι για το σύστημα MBBR/IFAS και την καθίζηση.	52
Πίνακας 7.1 Επίδραση του solid support στην εκροή του συστήματος MBBR/IFAS	103
Πίνακας 7.2 Επίδραση της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων στην εκροή του συστήματος MBBR/IFAS	107
Πίνακας 7.3 Επίδραση του biofilm density στην εκροή του συστήματος MBBR/IFAS	111
Πίνακας 9.1 Δεδομένα εισόδου για τη δυναμική φόρτιση.	125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Ροή του COD στο ASM1 και στο ASM3 (IWA, 2000).....	28
Σχήμα 3.1 Οθόνη έναρξης του λογισμικού WEST 2012.....	29
Σχήμα 3.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό WEST 2012.....	31
Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση ενός συμβατικού συστήματος ενεργού ιλύος.	39
Σχήμα 4.2 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος IFAS.	40
Σχήμα 4.3 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος MBBR.	40
Σχήμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση βιοφίλμ, το οποίο επιτρέπει μερικώς τη ροή της τροφής (Mannina et al., 2011).....	46
Σχήμα 5.1 Σχηματική αναπαράσταση του βιολογικού τμήματος του συστήματος MBBR/IFAS στο οποίο έγιναν οι αναλύσεις.....	53
Σχήμα 5.2 Σχηματική αναπαράσταση του βιολογικού τμήματος του συμβατικού συστήματος στο οποίο έγιναν οι αναλύσεις.....	53
Σχήμα 6.1 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στον αερόβιο αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.....	57
Σχήμα 6.2 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στον αερόβιο αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.....	57
Σχήμα 6.3 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	58
Σχήμα 6.4 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.....	58
Σχήμα 6.5 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	59
Σχήμα 6.6 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.....	59
Σχήμα 6.7 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	60

Σχήμα 6.8 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	60
Σχήμα 6.9 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	61
Σχήμα 6.10 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	61
Σχήμα 6.11 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	62
Σχήμα 6.12 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	62
Σχήμα 6.13 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	64
Σχήμα 6.14 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	65
Σχήμα 6.15 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	65
Σχήμα 6.16 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	66
Σχήμα 6.17 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	66
Σχήμα 6.18 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	67

Σχήμα 6.19 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	67
Σχήμα 6.20 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	68
Σχήμα 6.21 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	68
Σχήμα 6.22 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	69
Σχήμα 6.23 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	69
Σχήμα 6.24 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	70
Σχήμα 6.25 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.	72
Σχήμα 6.26 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.	72
Σχήμα 6.27 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.	73
Σχήμα 6.28 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.	73
Σχήμα 6.29 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.	74

Σχήμα 6.30 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	74
Σχήμα 6.31 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	75
Σχήμα 6.32 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	75
Σχήμα 6.33 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	76
Σχήμα 6.34 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	76
Σχήμα 6.35 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	77
Σχήμα 6.36 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	77
Σχήμα 6.37 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	79
Σχήμα 6.38 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	80
Σχήμα 6.39 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	80
Σχήμα 6.40 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	81

Σχήμα 6.41 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	81
Σχήμα 6.42 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	82
Σχήμα 6.43 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.	82
Σχήμα 6.44 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	83
Σχήμα 6.45 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.	83
Σχήμα 6.46 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	84
Σχήμα 6.47 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.	84
Σχήμα 6.48 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας	85
Σχήμα 6.49 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	86
Σχήμα 6.50 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.	87
Σχήμα 6.51 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS	

συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.	87
Σχήμα 6.52 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.	88
Σχήμα 6.53 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	89
Σχήμα 6.54 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.....	89
Σχήμα 6.55 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	90
Σχήμα 6.56 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	90
Σχήμα 6.57 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.	91
Σχήμα 6.58 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.....	92
Σχήμα 6.59 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.....	92
Σχήμα 6.60 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.....	93
Σχήμα 6.61 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.	94

Σχήμα 7.1 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.....	104
Σχήμα 7.2 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.	104
Σχήμα 7.3 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.	105
Σχήμα 7.4 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.	105
Σχήμα 7.5 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.	106
Σχήμα 7.6 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.....	106
Σχήμα 7.7 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.	108
Σχήμα 7.8 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.....	108
Σχήμα 7.9 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.....	109
Σχήμα 7.10 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.....	109
Σχήμα 7.11 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.....	110
Σχήμα 7.12 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.	110
Σχήμα 7.13 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.....	112
Σχήμα 7.14 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.	112
Σχήμα 7.15 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.	112
Σχήμα 7.16 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.	113

Σχήμα 7.17 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.	113
Σχήμα 7.18 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.....	114
Σχήμα 8.1 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου.....	116
Σχήμα 8.2 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου.....	117
Σχήμα 8.3 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου.	117
Σχήμα 8.4 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου.	118
Σχήμα 8.5 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου.	118
Σχήμα 8.6 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος και της φόρτισης στερεών στη δεξαμενή καθίζησης συναρτήσει της παροχής εισόδου.....	119
Σχήμα 8.7 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.	121
Σχήμα 8.8 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.....	121
Σχήμα 8.9 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα συναρτήσει της θερμοκρασίας, της παροχής εισόδου και του συστήματος...	122
Σχήμα 8.10 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.....	122
Σχήμα 8.11 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.....	123
Σχήμα 8.12 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.....	123
Σχήμα 8.13 Διακύμανση της μάζας της ιλύος στην έξοδο της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.....	124
Σχήμα 9.1 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.....	127

Σχήμα 9.2 Ωριαία διακύμανση της ζήτησης σε οξυγόνο στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.	127
Σχήμα 9.3 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.....	128
Σχήμα 9.4 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.....	128
Σχήμα 9.5 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.	129
Σχήμα 9.6 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.	129
Σχήμα 9.7 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.	130
Σχήμα 9.8 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.	130

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα σημαντικό ζήτημα που καλείται να αντιμετωπίσει ο μηχανικός τόσο κατά τον σχεδιασμό όσο και κατά τη λειτουργία μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης, η οποία συνδυάζει τη μέγιστη δυνατή ποιότητα εκροής με οικονομικά οφέλη. Το αντικείμενο αυτό αποτέλεσε το κίνητρο για την παρούσα διπλωματική, στόχος της οποίας είναι η εφαρμογή μαθηματικής προσομοίωσης για τη σύγκριση δύο συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, ενός συμβατικού συστήματος ενεργού ιλύος και ενός συστήματος MBBR/IFAS.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται το μαθηματικό προσομοίωμα ενεργού ιλύος ASM1, το οποίο και αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό για την Ποιότητα του Νερού (IAWQ), ενώ η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού WEST 2012 της DHI. Η διπλωματική διαρθρώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2, 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, αναπτύσσεται το μοντέλο ASM2, το οποίο αποτελεί επέκταση του ASM1 και προσομοιώνει διαδικασίες βιολογικής απομάκρυνσης του φωσφόρου. Τέλος, ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή των μοντέλων ASM2d και ASM3.

Στο κεφάλαιο 3, αναφέρονται οι βασικές αρχές ανάπτυξης και λειτουργίας του λογισμικού WEST. Αναλυτικότερα, γίνεται μία περιγραφή των διαθέσιμων μορφών 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 WEST και δίδονται παραδείγματα αξιοποίησης του λογισμικού.

Στο κεφάλαιο 4, περιγράφεται και αναλύεται η τεχνολογία των συστημάτων MBBR/IFAS, τα οποία αποτελούν υβριδικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν την τεχνολογία της ενεργού ιλύος με βιοαντιδραστήρες, που περιέχουν

αιωρούμενους βιοφορείς (βιοαντιδραστήρες κινούμενης κλίνης). Αρχικά, αναφέρθηκαν οι διαφορετικοί τύποι βιοφορέων που υπάρχουν, και στη συνέχεια, έγινε μια σύντομη ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη των συστημάτων αυτών, καθώς και για τα μαθηματικά μοντέλα που τα περιγράφουν. Τέλος, περιγράφηκαν τρόποι διαστασιολόγησης και τα πλεονεκτήματά τους.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται δύο συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Το πρώτο είναι ένα συμβατικό σύστημα επεξεργασίας ιλύος και το δεύτερο είναι ένα σύστημα MBBR/IFAS. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν συνήθεις συγκεντρώσεις αστικών λυμάτων στην Ελλάδα.

Στο κεφάλαιο 6, περιγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πρώτων προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν και αφορούν την ανάλυση ευαισθησίας των δύο συστημάτων. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η απόκριση τους για ένα εύρος τιμών του χρόνου παραμονής στερεών (SRT) μεταβάλλοντας ορισμένες στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι 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). Ταυτόχρονα, έγινε και σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο συστημάτων με σκοπό την εύρεση του ιδανικότερου.

Στο κεφάλαιο 7, διερευνήθηκε η απόκριση του συστήματος MBBR/IFAS μεταβάλλοντας ορισμένες παραμέτρους που αφορούν την προσκολλημένη βιομάζα και την ποσότητα των βιοφορέων. Οι παράμετροι αυτοί είναι το ποσοστό πλήρωσης του όγκου του βιοαντιδραστήρα με βιοφορείς (solid support), η ειδική επιφάνεια (specific surface area) και η πυκνότητα του βιοφίλμ (biofilm density).

Στο κεφάλαιο 8, παρουσιάζεται ο έλεγχος επάρκειας των δύο συστημάτων. Στη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας, τόσο η παροχή όσο και τα χαρακτηριστικά εισροής των λυμάτων μπορεί να μεταβληθούν, οδηγώντας σε δυσμενέστερα σενάρια φόρτισης για αυτά. 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, αυξάνοντας σταδιακά την παροχή εισροής και στη συνέχεια, έγινε έλεγχος για μειωμένο χρόνο παραμονής και στερεών και δυσμενέστερη θερμοκρασία. 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 9, γίνεται έλεγχος της απόκρισης των δύο συστημάτων σε ωριαίες μεταβολές της παροχής εισόδου (δυναμική φόρτιση) και μελετήθηκε, κυρίως, η διακύμανση των συγκεντρώσεων της εκροής κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

Τέλος, στο κεφάλαιο 10 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Το σύστημα ενεργού ιλύος αποτελεί το πιο διαδεδομένο και αποτελεσματικό σύστημα βιολογικής επεξεργασίας αστικών λυμάτων και εφαρμόζεται σε έναν αριθμό παραλλαγών που παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, είναι όμως κατά περίπτωση επιλέξιμες για την ικανοποίηση των ιδιαιτεροτήτων κάθε εφαρμογής. Η προσομοίωση ενός συστήματος ενεργού ιλύος προϋποθέτει δύο διακριτά, αλλά σχετιζόμενα υπομοντέλα, το υπομοντέλο των βιοχημικών διεργασιών και το υπομοντέλο της καθίζησης. Η μαθηματική προσομοίωση των μοντέλων ενεργού ιλύος αποτέλεσε αναγκαιότητα για τους μηχανικούς, καθώς βοήθη στην εύρεση πρωτοκόλλων λειτουργίας, στην εξέταση σεναρίων δυναμικής φόρτισης (Hulsbeek et al., 2002), στη ρύθμιση μορφών αυτοματισμού και στη μελέτη φαινομένων νηματοειδούς διόγκωσης, μεταξύ άλλων. Ήδη από το 1980, οι ερευνητικές ομάδες των Dold et al. και των Alexander et al., και αργότερα οι Gujer et al. (1991) εφάρμοσαν κινητικά μοντέλα για την προσομοίωση διεργασιών ενεργού ιλύος, ενώ οι Henze et al. παρουσίασαν το 2000 μια πλήρη μελέτη για τα μοντέλα ενεργού ιλύος N₀ 1, 2, 2d και 3.

2.2 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 1 (ASM1)

Το μοντέλο ASM1 περιγράφει ένα σύστημα ενεργού ιλύος που περιλαμβάνει οξείδωση του άνθρακα, νιτροποίηση και απονιτροποίηση και συνολικά περιγράφει 8 διεργασίες. Παρουσιάστηκε το 1987 και ήταν το αποτέλεσμα της ερευνητικής εργασίας της International Association on Water Quality (Henze et al., 1987), η οποία ξεκίνησε το 1983 και είχε ως στόχο την ανάπτυξη πρακτικών μοντέλων για το σχεδιασμό και τη λειτουργία βιολογικών συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων. Αν και από τότε το ASM1 έχει επεκταθεί για να συμπεριλάβει περισσότερες διεργασίες, το αρχικό μοντέλο παραμένει μέχρι σήμερα το πιο ευρέως διαδεδομένο για την περιγραφή διεργασιών επεξεργασίας λυμάτων σε ολόκληρο τον κόσμο.

Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου, ένας από τους βασικούς στόχους της ομάδας εργασίας ήταν κυρίως η πρόβλεψη της συγκέντρωσης της ενεργού ιλύος και της απαίτησης για αποδέκτη ηλεκτρονίων για την ανάπτυξη των ρυθμών έκφρασης των διεργασιών. Ένας άλλος στόχος ήταν η δημιουργία ενός όσο το δυνατόν απλούστερου και εύχρηστου μαθηματικού μοντέλου. Είναι γνωστό ότι όσο πιο πολύ πλησιάζουν οι κινητικές των διεργασιών την πραγματική κατάσταση τόσο πιο πολύπλοκες γίνονται. Συνεπώς, σε ένα

μοντέλο θα πρέπει να υπάρχουν μόνο αυτές οι διεργασίες που είναι απαραίτητες για την επίτευξη μιας ρεαλιστικής λύσης, και να επιλέγονται εκείνες οι κινητικές οι οποίες θα επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση απλοποιημένων τεχνικών επίλυσης, χωρίς να μειώνουν την εφαρμοστικότητα των αποτελεσμάτων. Για όλους αυτούς τους λόγους, η ομάδα εργασίας εστίασε την προσοχή της στα σημαντικότερα συμβάντα και επέλεξε τις απλούστερες κινητικές που ήταν συμβατά με αυτά.

Η ομάδα εργασίας χρησιμοποίησε επίσης, την έννοια των διακοπτόμενων λειτουργιών (switching functions) για να ρυθμίζει τις κινητικές των διεργασιών ανάλογα με τις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών.

2.2.1 Μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου

Στις παρακάτω σελίδες, γίνεται ανάλυση των μεταβλητών που συμμετέχουν στο μοντέλο ASM1. Σημειώνεται ότι οι συγκεντρώσεις όλων των οργανικών υλικών, συμπεριλαμβανομένης και της βιομάζας, παρουσιάζονται σε μονάδες COD.

Διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη $S_I[M(COD)L^{-3}]$: Δεν συμμετέχει σε καμία διεργασία μετατροπής, αλλά είναι σημαντική διότι συνεισφέρει στο COD της εκροής. Ουσιαστικά, φεύγει από το σύστημα με την ίδια συγκέντρωση που είχε εισέλθει.

Εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή $S_S[M(COD)L^{-3}]$: Απομακρύνεται με την ανάπτυξη των ετεροτροφικών βακτηρίων κάτω από αερόβιες ή ανοξικές συνθήκες και σχηματίζεται με την υδρόλυση της σωματιδιακής οργανικής ύλης, που βρίσκεται παγιδευμένη στη βιοκροκίδα.

Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) στον αντιδραστήρα $S_O[M(-COD)L^{-3}]$: Στον πίνακα 2.1 περιλαμβάνονται μόνο βιολογικές διεργασίες απομάκρυνσης οξυγόνου από το διάλυμα και καμία προσθήκης. Για την προσομοίωση των τροποποιήσεων στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, πρέπει να συμπεριληφθούν κατάλληλες κινητικές για την περιγραφή της μεταφοράς οξυγόνου λόγω αερισμού. Σύμφωνα με τη στήλη 8, η χρήση οξυγόνου σχετίζεται μόνο με την αερόβια ανάπτυξη της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας και δε φαίνεται να έχει καμία άμεση σχέση με τη μικροβιακή αποσύνθεση. Αυτή η άποψη διαφέρει από τις πιο παραδοσιακές προσεγγίσεις που βασίζονται στη γνώση ότι η αποσύνθεση είναι υπεύθυνη για την απελευθέρωση της αργά βιοδιασπάσιμης τροφής, η οποία επανακυκλοφορείται χρησιμοποιείται για την περαιτέρω ανάπτυξη των κυττάρων. Συνεπώς, ενώ τότε η χρήση οξυγόνου σχετιζόταν άμεσα με την αποσύνθεση, τώρα υπολογίζεται έμμεσα από την ανάπτυξη νέας βιομάζας με κατανάλωση των προϊόντων φθοράς.

Νιτρικό άζωτο $S_{NO}[M(N)L^{-3}]$: Παράγεται κατά την αερόβια ανάπτυξη των αυτοτροφικών βακτηριδίων και απομακρύνεται κατά την ανοξική ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας. Επίσης, αποτελεί τον ένα από τους δύο αποδέκτες ηλεκτρονίων που περιλαμβάνονται στο μοντέλο και για λόγους απλότητας της προσομοίωσης, γίνεται η παραδοχή ότι τα νιτρικά είναι η μόνη υφιστάμενη οξειδωμένη μορφή του αζώτου, παρά το γεγονός ότι και το νιτρώδες άζωτο αποτελεί ένα ενδιάμεσο προϊόν κατά την απονιτροποίηση. Αν και δε γίνεται απόλυτα σαφές στο μοντέλο, το νιτρικό άζωτο μπορεί να απομακρυνθεί και με παρουσία εξωτερικού άνθρακα λόγω της αποσύνθεσης της βιομάζας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επανακυκλοφορία της οργανικής ύλης κατά την αποσύνθεση, η οποία το κάνει διαθέσιμο για ανοξική ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας.

Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο $S_{NH}[M(N)L^{-3}]$: Είναι το άθροισμα της ιονισμένης μορφής της αμμωνίας (αμμώνιο NH_4^+) και της μη ιονισμένης (αμμωνία NH_3). Ωστόσο, επειδή το μη ιονισμένο τμήμα είναι αμελητέο για τιμές του pH κοντά στην ουδετερότητα, είναι απλούστερο να γράφεται το μοντέλο οξείδωσης της αμμωνίας σε όρους συνολικού αμμωνιακού αζώτου. Το αμμωνιακό άζωτο δημιουργείται με την αμμωνιοποίηση του διαλυμένου βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου και απομακρύνεται κατά την ανάπτυξη της βιομάζας. Η μεγαλύτερη απομάκρυνση του πραγματοποιείται, ωστόσο, κατά τη νιτροποίηση, όπου χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας για την ανάπτυξη της αυτοτροφικής βιομάζας. Το άζωτο συνδέεται επίσης και με τη βιομάζα κατά την κυτταρική σύνθεση.

Διαλυμένο οργανικό άζωτο $S_{ND}[M(N)L^{-3}]$: Δημιουργείται με την υδρόλυση του σωματιδιακού οργανικού αζώτου και μετατρέπεται σε αμμωνιακό άζωτο με τη διαδικασία της αμμωνιοποίησης.

Αλκαλικότητα $S_{ALK}[mol(HCO_3)L^{-3}]$: Η ενσωμάτωση της αλκαλικότητας στο μοντέλο δεν είναι απαραίτητη, αλλά είναι επιθυμητή διότι προσφέρει πληροφορίες με τις οποίες μπορούν να εντοπιστούν υπερβολικές διακυμάνσεις του pH. Αλλαγές στην αλκαλικότητα μπορούν να προκαλέσουν όλες οι αντιδράσεις που αφορούν την προσθήκη ή απομάκρυνση ειδών με ικανότητα αποδοχής πρωτονίων και/ή την προσθήκη ή απομάκρυνση των πρωτονίων. Σε συστήματα ενεργού ιλύος τέτοιες αλλαγές μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης, καθώς και κατά τη μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε αμινοξέα κατά τη σύνθεση της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας. Από τις διεργασίες που προσθέτουν ή απομακρύνουν πρωτόνια, η νιτροποίηση έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αλκαλικότητα και μπορεί να προκαλέσει υπερβολικές μειώσεις της. Για τη διατήρηση του επιθυμητού pH προστίθενται κατάλληλα χημικά, όπως το οξείδιο του ασβεστίου.

Σωματιδιακή αδρανής οργανική ύλη $X_I[M(COD)L^{-3}]$: Όπως και η διαλυμένη αδρανής οργανική ύλη, δε συμμετέχει σε καμία διεργασία μετατροπής, αλλά αποτελεί μέρος των πτητικών αιωρούμενων στερεών στο σύστημα της ενεργού ιλύος.

Αργά βιοδιασπάσιμη τροφή $X_S[M(COD)L^{-3}]$: Σχηματίζεται από την αποσύνθεση τόσο της ετεροτροφικής όσο και της αυτοτροφικής βιομάζας και απομακρύνεται με την υδρόλυση. Δηλαδή, μπορούμε να πούμε, ότι η αποσύνθεση μπορεί να μετατρέψει το κυτταρικό υλικό σε αργά βιοδιασπάσιμη τροφή.

Ετεροτροφική βιομάζα $X_{BH}[M(COD)L^{-3}]$: Η ετεροτροφική βιομάζα αναπτύσσεται κάτω από αερόβιες ή ανοξικές συνθήκες και καταστρέφεται με την αποσύνθεση.

Αυτοτροφική βιομάζα $X_{BA}[M(COD)L^{-3}]$: Η αυτοτροφική βιομάζα αναπτύσσεται κάτω από αερόβιες συνθήκες και καταστρέφεται μέσω της αποσύνθεσης.

Βιομάζα $X_P[M(COD)L^{-3}]$: Η βιομάζα X_P περιέχει τα σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα της αποσύνθεσης.

Σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο $X_{ND}[M(N)L^{-3}]$: Δημιουργείται από την αποσύνθεση τόσο της ετεροτροφικής όσο και της αυτοτροφικής βιομάζας, i_{XB} , με την αφαίρεση της ποσότητας που σχετίζεται με τα αδρανή σωματιδιακά προϊόντα, $f_P i_{XP}$, και απομακρύνεται με την αμμωνιοποίηση. Αν και το οργανικό αυτό άζωτο είναι σωματιδιακό, δεν συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό της συγκέντρωσης των πτητικών στερεών, διότι ένα μέρος αυτών των υλικών έχει ήδη προστεθεί στη συγκέντρωσή τους.

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές παραμέτρων για ουδέτερο pH (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)

Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή (20°C)	Τιμή (10°C)
<u>Στοιχειομετρικές παράμετροι</u>			
Y_A	gr δημιουργούμενου κυττάρου COD (gr οξειδωμένου N) ⁻¹	0,240	0,240
Y_H	gr δημιουργούμενου κυττάρου COD (gr οξειδωμένου COD) ⁻¹	0,670	0,670
f_p	αδιάστατο	0,080	0,080
i_{XB}	gr N (gr COD) ⁻¹ , στη βιομάζα	0,086	0,086
i_{XP}	gr N (gr COD) ⁻¹ , στην ενδογενή μάζα	0,060	0,060
<u>Κινητικές παράμετροι</u>			
μ_H	ημέρα ⁻¹	6,00	3,00
K_S	gr COD m ⁻³	20,00	20,00
$K_{O,H}$	gr O ₂ m ⁻³	0,20	0,20
K_{NO}	gr NO ₃ -N m ⁻³	0,50	0,50
b_H	ημέρα ⁻¹	0,62	0,20
n_g	αδιάστατο	0,80	0,80
n_h	αδιάστατο	0,40	0,40
K_h	gr εύκολα βιοδιασπάσιμου COD (gr κυττάρου COD ημέρα) ⁻¹	3,00	1,00
K_X	gr εύκολα βιοδιασπάσιμου COD (gr κυττάρου COD) ⁻¹	0,03	0,01
μ_A	ημέρα ⁻¹	0,80	0,30
K_{NH}	grNH ₃ -Nm ⁻³	1,00	1,00
$K_{O,A}$	grO ₂ m ⁻³	0,40	0,40
K_a	m ₃ COD (gr ημέρα) ⁻¹	0,08	0,04

Πίνακας 2.2 Τυπικές τιμές χαρακτηριστικών των λυμάτων σε αστικά απόβλητα (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)

Σύμβολο	Μονάδα	Δανία	Ελβετία	Ουγγαρία	Ελλάδα
S _S	gr COD m ⁻³	125	70	100	145-155
S _I	gr COD m ⁻³	40	25	30	45-60
X _S	gr COD m ⁻³	250	100	150	155-220
X _I	gr COD m ⁻³	100	25	70	35-45
S _{ND}	gr N m ⁻³	8	5	10	5-15
X _{ND}	gr N m ⁻³	10	10	15	4-10
S _{NH}	gr NH ₃ -N m ⁻³	30	10	30	45-55
S _{NI}	gr N m ⁻³	2	2	3	2
S _{NO}	gr NH ₃ -N m ⁻³	0,5	1	1	1

2.2.2 Διεργασίες μοντέλου

Παρακάτω αναλύονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο μοντέλο ASM1, όπως αναπτύχθηκαν από τον Διεθνή Οργανισμό για την Ποιότητα του Νερού (IQWA).

- Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών οργανισμών:** Ένα κλάσμα του ευκόλως βιοδιασπάσιμου υποστρώματος χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας, ενώ το υπόλοιπο οξειδώνεται, προκαλώντας αύξηση στη ζήτηση για οξυγόνο. Η ανάπτυξη αυτή μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας κινητικές Monod. Η αμμωνία χρησιμοποιείται στη σύνθεση ως πηγή αζώτου και ενσωματώνεται στην κυτταρική βιομάζα, ενώ οι συγκεντρώσεις των S_S και S_O αποτελούν περιοριστικό παράγοντα της ταχύτητας ανάπτυξης. Με τη συγκεκριμένη διαδικασία παράγεται το μεγαλύτερο μέρος της νέας βιομάζας και συντελείται η βασική απομάκρυνση του COD.
- Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών οργανισμών:** Όταν υπάρχει απουσία οξυγόνου, οι ετεροτροφικοί οργανισμοί έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν νιτρικά ως τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων με τα S_S να λειτουργούν ως υπόστρωμα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται απονιτροποίηση και οδηγεί στην παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας και αέριου αζώτου. Το τελευταίο είναι αποτέλεσμα της μείωσης των νιτρικών και συνοδεύεται από αλλαγή στην αλκαλικότητα. Στην ανοξική ανάπτυξη χρησιμοποιούνται οι ίδιες κινητικές Monod που αναλύθηκαν και στην αερόβια, με τη διαφορά ότι ο ρυθμός ανάπτυξης πολλαπλασιάζεται με έναν μειωτικό συντελεστή η_g (<1). Η διαφορά αυτή

στους ρυθμούς ανάπτυξης μπορεί να είναι αποτέλεσμα είτε ενός μικρότερου μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης κάτω από ανοξικές συνθήκες ή επειδή μόνο ένα μικρό ποσοστό της ετεροτροφικής βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιήσει τα νιτρικά ιόντα ως αποδέκτη ηλεκτρονίων. Η αμμωνία λειτουργεί ως πηγή αζώτου για την κυτταρική σύνθεση, αλλάζοντας την αλκαλικότητα.

- **Αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικών οργανισμών:** Η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρικά μέσω της διαδικασίας της νιτροποίησης, προκαλώντας αύξηση της αυτοτροφικής βιομάζας και της ζήτησης σε οξυγόνο και χρησιμοποιείται ως πηγή αζώτου για τη σύνθεση κυτταρικής μάζας, με την ενσωμάτωσή της μέσα σε αυτή. Η παραπάνω διαδικασία έχει σημαντική επίδραση στην αλκαλικότητα, καθώς και στη συνολική ζήτηση σε οξυγόνο, όχι όμως και στην ποσότητα της παραγόμενης βιομάζας, διότι η απόδοση των νιτροποιητών είναι μικρή. Η ταχύτητα ανάπτυξης προσομοιώνεται με κινητικές Monod.
- **Αποσύνθεση των ετεροτροφικών οργανισμών:** Σε αυτή τη διεργασία χρησιμοποιείται η υπόθεση 'θανάτου-επαναδημιουργίας' (death-regeneration). Πιο συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι οι μικροοργανισμοί πεθαίνουν με ένα συγκεκριμένο ρυθμό και το ποσοστό που θεωρείται ότι είναι μη-βιοδιασπάσιμο, προστίθεται στο κλάσμα των X_p . Το υπόλοιπο προστίθεται στο υπόστρωμα των αργά βιοδιασπάσιμων στερεών. Το οργανικό άζωτο που συνδέεται με το X_s γίνεται διαθέσιμο ως σωματιδιακό οργανικό άζωτο, ενώ δεν υπάρχει καμία απώλεια COD. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται με τον ίδιο ρυθμό κάτω από αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες.
- **Αποσύνθεση των αυτοτροφικών οργανισμών:** Η διαδικασία προσομοιώνεται με τον αντίστοιχο τρόπο περιγραφής της αποσύνθεσης των ετεροτροφικών οργανισμών.
- **Αμμωνιοποίηση του διαλυμένου οργανικού αζώτου:** Το βιοδιασπάσιμο διαλυτό οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε ελεύθερη και αλατούχο αμμωνία με μια διαδικασία που πραγματοποιείται από τους ενεργούς ετεροτροφικούς οργανισμούς. Για τη διαδικασία μετατροπής καταναλώνεται ιόντα υδρογόνου, τα οποία προκαλούν αλλαγή στην αλκαλικότητα.
- **Υδρόλυση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης:** Το αργά βιοαποικοδομήσιμο υπόστρωμα που βρίσκεται στην ιλύ διασπάται εξωκυτταρικά, παράγοντας άμεσα βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα για χρήση από τους μικροοργανισμούς. Η διαδικασία μοντελοποιείται με τη θεωρία της επιφανειακής αντίδρασης και μπορεί να

πραγματοποιηθεί μόνο κάτω από αερόβιες και ανοξικές συνθήκες. Ο ρυθμός της υδρόλυσης μειώνεται όταν επικρατούν ανοξικές συνθήκες με έναν συντελεστή η (<1). Ο ρυθμός είναι πρώτης τάξης σε αναλογία με την παρούσα ετεροτροφική βιομάζα, αλλά μειώνεται όσο η ποσότητα του παγιδευμένου υποστρώματος γίνεται μεγαλύτερη σε αναλογία με τη βιομάζα.

- **Υδρόλυση του βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου:** Το βιοδιασπάσιμο σωματιδιακό οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε διαλυτό οργανικό άζωτο με το ρυθμό που περιγράφεται παραπάνω, στη διαδικασία υδρόλυσης της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης.

Πίνακας 2.3 Διεργασίες, κινητικές και στοιχειομετρία του μοντέλου ASM1 (Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Ρυθμός διεργασιών ρ_i (ML ⁻³ T ⁻¹)
	S ₁	S _S	X ₁	X _S	X _{BH}	X _{BA}	X _P	S _O	S _{NO}	S _{NH}	S _{ND}	X _{ND}	X _{ALK}	
1.Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_{BH}$
2.Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}$		$-i_{XB}$			$\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_B X_{BH}$
3.Αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικών						1		$-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$	$\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_{BA}$
4.Αποσύνθεση ετεροτροφικών				$1 - f_P$	-1		f_P					$i_{XB} - f_P i_{XP}$		$b_H X_{BH}$
5.Αποσύνθεση αυτοτροφικών				$1 - f_P$		-1	f_P					$i_{XB} - f_P i_{XP}$		$b_A X_{BA}$
6.Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών										1	-1		$\frac{1}{14}$	$k_a S_{ND} X_{BH}$
7.Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών		1		-1										$k_h \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + (X_S/X_{BH})} \left[\left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{BH}$
8.Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών											1	-1		$\rho_Y (X_{ND}/X_S)$
Παρατηρούμενος ρυθμός αντίδρασης	$r_i = \sum V_{ij} \rho_j$													

2.2.3 Περιορισμοί του μοντέλου

Για να μπορέσει το ASM1 να εφαρμοστεί σε Ε.Ε.Λ. και να είναι λειτουργικό έπρεπε να ληφθούν ορισμένες απλοποιήσεις και παραδοχές, οι οποίες αφορούν είτε το ίδιο το σύστημα είτε το μαθηματικό μοντέλο. Μερικές από αυτές αναφέρονται παρακάτω.

- Το σύστημα λειτουργεί σε σταθερή θερμοκρασία. Προκειμένου να καταστούν δυνατές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εξίσωση Arrhenius για τη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου σε μια συγκεκριμένη περιοχή.
- Το pH παραμένει σταθερό και σχεδόν ουδέτερο. Η προσθήκη της αλκαλικότητας στο μοντέλο επιτρέπει στο χρήστη να ανιχνεύει πιθανά προβλήματα στο pH.
- Αλλαγές στην ποιότητα των λυμάτων δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν σωστά από το μοντέλο, διότι οι αλλαγές στη φύση οποιουδήποτε οργανικού κλάσματος δεν έχουν μοντελοποιηθεί.
- Η υδρόλυση της οργανικής μάζας και του οργανικού αζώτου πραγματοποιούνται ταυτόχρονα με τον ίδιο ρυθμό.
- Οι διορθωτικοί συντελεστές για την απονιτροποίηση είναι σταθεροί για συγκεκριμένα λύματα.
- Το σωματιδιακό οργανικό υλικό θεωρείται ότι παγιδεύεται στιγμιαία στη βιομάζα.
- Ο τύπος του αποδέκτη ηλεκτρονίων που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε διεργασία δεν επηρεάζει την απώλεια της ενεργού βιομάζας από φθορά.
- Η περιορισμένη προσφορά αζώτου, φωσφόρου και άλλων ανόργανων θρεπτικών ουσιών μπορεί να έχει σημαντικά αποτελέσματα στην απομάκρυνση του οργανικού υποστρώματος, καθώς και στην κυτταρική ανάπτυξη, αν και δεν έχει συμπεριληφθεί στο μοντέλο. Έτσι κρίνεται αναγκαίο να υπάρχουν συνεχώς ικανοποιητικές ποσότητες από ανόργανα θρεπτικά συστατικά για να εξασφαλίζεται μια ισορροπημένη ανάπτυξη.

2.3 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 2 (ASM2)

Το μοντέλο ενεργού ιλύος ASM2 είναι μια επέκταση του μοντέλου ASM1 και χρησιμοποιείται για δυναμικές προσομοιώσεις απομάκρυνσης COD, αζώτου και φωσφόρου. Περιλαμβάνει επιπλέον βιολογικές και δύο χημικές διεργασίες, οι οποίες αναφέρονται κυρίως στην απομάκρυνση του φωσφόρου (Henze et al., 1995).

2.3.1 Μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου

Προϊόντα αναερόβιας ζύμωσης $S_A[M(COD)L^{-3}]$: Η ζύμωση αποτελεί μια ξεχωριστή διεργασία και συνεπώς τα τελικά προϊόντα της πρέπει να διαμορφωθούν ξεχωριστά από τα υπόλοιπα διαλυτά οργανικά υλικά.

Ζυμώσιμο, εύκολα βιοδιασπάσιμο διαλυτό υλικό $S_F[M(COD)L^{-3}]$: Αυτό το κλάσμα του διαλυτού COD είναι άμεσα διαθέσιμο για διάσπαση από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τροφή για τις διεργασίες της ζύμωσης.

Αλκαλικότητα των λυμάτων $S_{ALK}[mol(HCO_3)L^{-3}]$: Η αλκαλικότητα χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει τη διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου στις βιολογικές διεργασίες και εισάγεται για να προσφέρει πληροφορίες σχετικά με υπερβολικές διακυμάνσεις του pH που μπορεί να εμποδίσουν την πραγματοποίηση ορισμένων διεργασιών. Για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς, το S_{ALK} θεωρείται ότι είναι μόνο διανθρακικό ιόν.

Αδρανές διαλυτό οργανικό υλικό $S_I[M(COD)L^{-3}]$: Το οργανικό αυτό υλικό θεωρείται ότι δεν μπορεί να αποδομηθεί περισσότερο. Είναι μέρος της εισόδου, ενώ μπορεί να παραχθεί και από την υδρόλυση του σωματιδιακού οργανικού φορτίου X_S .

Αέριο άζωτο $S_{N_2}[M(N)L^{-3}]$: Θεωρείται ότι είναι το μοναδικό προϊόν της απονιτροποίησης και μπορεί να συμμετέχει σε διεργασίες ανταλλαγής αερίων, όπως το οξυγόνο.

Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο $S_{NH}[M(N)L^{-3}]$: Είναι το άθροισμα της ιονισμένης μορφής και της μη ιονισμένης. Για τη διατήρηση της ηλεκτρικής ισορροπίας θεωρείται ότι είναι μόνο στη μορφή των αμμωνιακών ιόντων NH_4^+ .

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

Διαλυμένο οξυγόνο $S_{O_2}[M(O_2)L^{-3}]$: Το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να συμμετέχει σε διεργασίες ανταλλαγής αερίων.

Ανόργανος διαλυτός φώσφορος $S_{PO4}[M(P)L^{-3}]$: Εμφανίζεται κυρίως στη μορφή ορθοφωσφορικών. Για τη διατήρηση της ηλεκτρικής ισορροπίας, υποθέτουμε ότι το 50% είναι της μορφής $H_2PO_4^-$ και το υπόλοιπο HPO_4^{2-} .

$S_S[M(COD)L^{-3}]$: Αυτή η μεταβλητή αντικαθίσταται στο ASM2 από το άθροισμα S_F και S_A .

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

Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί $X_H[M(COD)L^{-3}]$: Οι μικροοργανισμοί αυτοί αποτελούν το σύνολο της ετεροτροφικής βιομάζας που μπορεί να αναπτυχθεί κάτω από αερόβιες και ανοξικές συνθήκες και να είναι ενεργή κάτω από αναερόβιες (ζύμωση). Είναι υπεύθυνοι για την υδρόλυση του σωματιδιακού υποστρώματος και μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλα τα βιοδιασπάσιμα οργανικά υλικά κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

Αδρανές σωματιδιακό οργανικό υλικό $X_I[M(COD)L^{-3}]$: Τα υλικά αυτά δεν συμμετέχουν στις βιολογικές διεργασίες και προϋπάρχουν στα λύματα ή δημιουργούνται από την αποσύνθεση της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας.

Υδροξείδια μετάλλων $X_{MeOH}[M(TSS)L^{-3}]$: Το συστατικό αυτό είτε προστίθεται στα λύματα προκαλώντας τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου ή μπορεί να υπάρχει ήδη σε αυτά. Για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς, θεωρείται ότι η σύστασή του είναι της μορφής του υδροξειδίου του σιδήρου $Fe(OH)_3$, αν και μπορεί να αντικατασταθεί με άλλο μέταλλο αλλάζοντας τα στοιχειομετρικά και κινητικά δεδομένα.

Φωσφορικά μέταλλα $X_{MeP}[M(TSS)L^{-3}]$: Αυτό το συστατικό δημιουργείται από την χημική αντίδραση σχηματισμού στερεών κατά τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου με προσθήκη μετάλλου $Fe(III)$. Για όλους τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς, θεωρείται ότι η σύστασή του είναι της μορφής του $FePO_4$, αν και μπορεί να αντικατασταθεί με άλλο μέταλλο, με αλλαγή των στοιχειομετρικών και κινητικών δεδομένων.

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

$X_{PHA}[M(COD)L^{-3}]$: Εσωκυτταρικά αποθηκευμένα προϊόντα των πολυφωσφορικών βακτηριδίων, ΡΑΟ. 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 $(C_4H_6O_2)_n$.

Πολυφωσφορικά $X_{PP}[M(P)L^{-3}]$: Τα πολυφωσφορικά είναι εσωκυτταρικά αποθηκευμένα ανόργανα υλικά των πολυφωσφορικών βακτηριδίων. Είναι επίσης, μέρος του σωματιδιακού φωσφόρου και μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά. Για τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς, τα πολυφωσφορικά θεωρείται ότι έχουν τη χημική σύσταση $(K_{0.33}Mg_{0.33}PO_3)_n$.

Αργά βιοδιασπάσιμο οργανικό υλικό $X_S[M(COD)L^{-3}]$: Η αργά βιοδιασπάσιμη ύλη έχει μεγάλο μοριακό βάρος και είναι κολλοειδής και πρέπει να υποστεί υδρόλυση εξωκυτταρικά προκειμένου να χρησιμοποιηθεί. Θεωρείται ότι τα προϊόντα της υδρόλυσης (S_F) μπορούν να υποστούν και ζύμωση.

Ολικά αιωρούμενα στερεά $X_{TSS}[M(TSS)L^{-3}]$: Η παράμετρος αυτή εισάγεται στο μοντέλο με σκοπό να υπολογιστεί η συγκέντρωση τους μέσω της στοιχειομετρίας. Η πρόβλεψη των TSS είναι σημαντική διότι η απομάκρυνση και κατακρήμνιση του φωσφόρου δημιουργεί ανόργανα στερεά.

2.3.2 Διεργασίες μοντέλου

Παρακάτω περιγράφονται οι διεργασίες που περιλαμβάνει το μοντέλο ASM2, όπως αναλύθηκαν από τον Διεθνή Οργανισμό για την Ποιότητα του Νερού (IQWA).

1. Αερόβια υδρόλυση του αργά βιοδιασπάσιμου κλάσματος που αναφέρεται σε υδρόλυση κάτω από αερόβιες συνθήκες ($S_{O_2} > 0$).
2. Ανοξική υδρόλυση του αργά βιοδιασπάσιμου κλάσματος, η οποία επιτελείται με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με την αερόβια υδρόλυση ($S_{O_2} \approx 0, S_{NO_3} > 0$).
3. Αναερόβια υδρόλυση του αργά βιοδιασπάσιμου κλάσματος, ο ρυθμός της οποίας αποτελεί αντικείμενο μελέτης ($S_{O_2} \approx 0, S_{NO_3} \approx 0$).

Πίνακας 2.4 Στοιχειομετρία των διεργασιών υδρόλυσης (IWA, 2000)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	S_F	S_{NH_4}	S_{PO_4}	S_I	S_{ALK}	X_S	X_{TSS}
1. ΑΕΡΟΒΙΑ ΥΔΡΟΛΥΣΗ	$1 - f_{S_I}$	ν_{1,NH_4}	ν_{1,PO_4}	f_{S_I}	$\nu_{1,ALK}$	-1	$\nu_{1,TSS}$
2. ΑΝΟΞΙΚΗ ΥΔΡΟΛΥΣΗ	$1 - f_{S_I}$	ν_{2,NH_4}	ν_{2,PO_4}	f_{S_I}	$\nu_{2,ALK}$	-1	$\nu_{2,TSS}$
3. ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΥΔΡΟΛΥΣΗ	$1 - f_{S_I}$	ν_{3,NH_4}	ν_{3,PO_4}	f_{S_I}	$\nu_{3,ALK}$	-1	$\nu_{3,TSS}$

4. και 5. Αερόβια ανάπτυξη των ετεροτροφικών οργανισμών στα ζυμώσιμα υποστρώματα S_F και στα ζυμώσιμα προϊόντα S_A . Η διεργασία αυτή προσομοιώνεται με δύο παράλληλες διαδικασίες, που καταναλώνουν τα διασπασίμα οργανικά υποστρώματα S_F και S_A . Και για τις δυο διεργασίες χρησιμοποιείται ο ίδιος συντελεστής μετατροπής υποστρώματος σε βιομάζα Y_H και ο ίδιος ρυθμός 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 αν η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι αρκετά υψηλή. Αυτές οι διεργασίες απαιτούν οξυγόνο, S_{O_2} , θρεπτικά συστατικά, S_{NH_4} και S_{PO_4} , και πιθανότατα αλκαλικότητα, S_{ALK} , ενώ παράγουν αιωρούμενα στερεά X_{TSS} .

6. και 7. Ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών οργανισμών στα ζυμώσιμα υποστρώματα S_F και στα ζυμώσιμα προϊόντα S_A (απονιτροποίηση). Η διαδικασία αυτή προσομοιώνεται επίσης με δύο παράλληλες διεργασίες, οι οποίες είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες αερόβιες, αλλά διαφέρουν στο γεγονός ότι απαιτούν νιτρικό άζωτο S_{NO_3} , ως δέκτη ηλεκτρονίων και όχι οξυγόνο. Η στοιχειομετρία για το νιτρικό άζωτο υπολογίζεται υποθέτοντας ότι όλο το νιτρικό άζωτο, S_{NO_3} , μετατρέπεται σε αέριο άζωτο S_{N_2} . Η απονιτροποίηση απελευθερώνει αλκαλικότητα, η στοιχειομετρία της οποίας παρουσιάζεται για την εξίσωση συνέχειας. Επίσης, θεωρείται ότι αναχαιτίζεται από την παρουσία οξυγόνου, ενώ ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης μ_m μειώνεται κάτω από αερόβιες συνθήκες από τον συντελεστή η_{NO_3} , διότι θεωρείται ότι δεν έχουν όλοι οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί X_H τη δυνατότητα απονιτροποίησης ή ότι ο ρυθμός απονιτροποίησης είναι χαμηλότερος.

8. Ζύμωση. Υπό αναερόβιες συνθήκες ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} \approx 0$), θεωρείται ότι οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα να κάνουν ζύμωση, με την οποία τα ευκόλως βιοδιασπασίμα 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 είναι δύσκολα υπολογίσιμες, και

πιθανότητα διαφορετικούς συντελεστές απόδοσης για τα S_F και S_A για τις διεργασίες 4-7. Η ζύμωση απελευθερώνει αρνητικά φορτισμένα προϊόντα, S_A , και επομένως έχει ορισμένες απαιτήσεις όσον αφορά την αλκαλικότητα. Αυτό προβλέπεται από την εξίσωση συνέχειας.

Η παραπάνω διεργασία, μέχρι σήμερα, δεν είναι απολύτως γνωστή και συνεπώς, 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.

9. Λύση. Αυτή η διεργασία αντιπροσωπεύει 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 2.5 Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης των ετεροτροφικών μ/ο (IWA, 2000)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	S_{O_2}	S_F	S_A	S_{NO_3}	S_{N_2}	X_I	X_S	X_H
4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΖΥΜΩΣΗΣ, S_F	$1 - \frac{1}{Y_H}$	$\frac{-1}{Y_H}$						1
5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΖΥΜΩΣΗΣ, S_A	$1 - \frac{1}{Y_H}$		$\frac{-1}{Y_H}$					1
6. ΑΠΟΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΖΥΜΩΣΗΣ, S_F		$\frac{-1}{Y_H}$		$-\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$	$\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$			1
7. ΑΠΟΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΖΥΜΩΣΗΣ, S_A			$\frac{-1}{Y_H}$	$-\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$	$\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$			1
8. ΖΥΜΩΣΗ		-1	1					
9. ΦΘΟΡΑ						f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$	-1

10. Αποθήκευση των X_{PHA} . Τα πολυφωσφορικά βακτηρίδια μπορούν να απελευθερώσουν ορθοφωσφορικά S_{PO_4} από την υδρόλυση των πολυφωσφορικών X_{PP} , χρησιμοποιώντας την εκλύομενη ενέργεια από την υδρόλυση των αποθηκευμένων πολυφωσφορικών για να αποθηκεύσουν τα εξωκυτταρικά προϊόντα της ζύμωσης S_A στη μορφή X_{PHA} . Η διεργασία αυτή παρατηρήθηκε αρχικά κάτω από αναερόβιες συνθήκες αλλά δεδομένου ότι υπάρχουν αναφορές ότι μπορεί να συμβεί και σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες, στην κινητική της έκφραση 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 ωστόσο ότι ο ρυθμός αποθήκευσης των οργανικών υλικών 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 τόσο την ανεξάρτητη μέτρηση της απομάκρυνσης του S_A και όσο της απελευθέρωσης του S_P .

11. Αποθήκευση των πολυφωσφορικών. Η αποθήκευση των ορθοφωσφορικών S_{PO_4} στη μορφή πολυφωσφορικών των X_{PP} απαιτεί ενέργεια, η οποία κερδίζεται από την αναπνοή των αποθηκευμένων οργανικών X_{PHA} . Η επαναδημιουργία των πολυφωσφορικών είναι μια απαίτηση για την ανάπτυξη των P_{AO} , τα οποία αναπτύσσονται μόνο με κατανάλωση αποθηκευμένων οργανικών X_{PHA} . Έχει παρατηρηθεί ότι η αποθήκευση των X_{PP} σταματάει εάν η περιεκτικότητα σε φώσφορο των P_{AO} γίνει πάρα πολύ υψηλή. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στην προσθήκη ενός περιοριστικού όρου στο ρυθμό της διεργασίας, ο οποίος γίνεται ενεργός όταν ο λόγος X_{PP} / X_{PAO} πλησιάζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του K_{MAX} .

12. Ανάπτυξη των πολυφωσφορικών βακτηριδίων. 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 PAO προσομοιώνεται ως μια υποχρεωτικά αερόβια διεργασία. Είναι γνωστό ότι οι PAO 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.

13, 14 και 15. Λύση των πολυφωσφορικών βακτηριδίων και των αποθηκευμένων προϊόντων τους. Ο θάνατος, η ενδογενής αναπνοή και η συντήρηση των κυττάρων έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια ή αποσύνθεση όλων των κλασμάτων των PAO . Λαμβάνοντας υπόψιν ότι τα αποθηκευμένα προϊόντα X_{PP} και X_{PHA} υπολογίζονται ξεχωριστά από τη βιομάζα των X_{PAO} , και τα τρία συστατικά υπόκεινται σε ξεχωριστές διεργασίες αποσύνθεσης. Στο ASM2, οι διεργασίες αυτές είναι πρώτης τάξης και πραγματοποιούνται με διαφορετικούς ρυθμούς. Εάν οι τελευταίοι ήταν ίδιοι, η σύνθεση των μικροοργανισμών δεν θα άλλαζε λόγω της αποσύνθεσης. Υπάρχουν πειραματικά δεδομένα 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_{PO_4} και προϊόντα ζύμωσης S_A .

Πίνακας 2.6 Στοιχειομετρία των διεργασιών των πολυφωσφορικών βακτηρίων (IWA, 2000)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	S_{O_2}	S_A	S_{PO_4}	X_I	X_S	X_{PAO}	X_{PP}	X_{PHA}
10. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΩΝ X_{PHA}		-1	Y_{PO_4}				$-Y_{PO_4}$	1
11. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΩΝ X_{PP}	$-Y_{PHA}$		-1				1	$-Y_{PHA}$
12. ΑΕΡΟΒΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ X_{PHA}	$1 - \frac{1}{Y_H}$		$-i_{PBM}$			1		$\frac{-1}{Y_H}$
13. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ X_{PAO}			v_{13,PO_4}	f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$	-1		
14. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ X_{PP}			1				-1	
15. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ X_{PHA}		1						-1

16. Ανάπτυξη των αυτοτροφικών μικροοργανισμών. Οι νιτροποιητικοί οργανισμοί είναι υποχρεωτικά αερόβιοι, καταναλώνουν το αμμόνιο ως υπόστρωμα και ως θρεπτική ουσία, και παράγουν νιτρικό άζωτο. Η διαδικασία της νιτροποίησης μειώνει την αλκαλικότητα. Η διεργασία προσομοιώνεται όπως προτείνεται στο ASM1, με την εξαίρεση της πρόσληψης φωσφόρου στη βιομάζα.

17. Λύση των νιτροποιητών. Η διεργασία της λύσης των νιτροποιητών προσομοιώνεται 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) αποτελούν διαθέσιμη τροφή μόνο για τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς, η ενδογενής αναπνοή των νιτροποιητών γίνεται φανερή ως μια αυξανόμενη ανάπτυξη και κατανάλωση οξυγόνου από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς.

Πίνακας 2.7 Στοιχειομετρία των διεργασιών ανάπτυξης και αποσύνθεσης των αυτοτροφικών μ/ο (IWA, 2000)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	S_{O_2}	S_{NH_4}	S_{NO_3}	S_{PO_4}	X_I	X_S	X_{AUT}
16. ΑΕΡΟΒΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ X_{AUT}	$-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$-i_{NBM} - \frac{1}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{PBM}$			1
17. ΛΥΣΗ		v_{17,NH_4}		v_{17,PO_4}	f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$	-1

18 και 19. Κατακρήμιση και επαναδιάλυση του φωσφόρου S_{PO_4} . Το μοντέλο καθίζησης είναι βασισμένο στην υπόθεση ότι η κατακρήμιση και η επαναδιάλυση είναι αντίστροφες διεργασίες. 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 2.8. Οι υποδεδειγμένοι 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} στη στοιχειομετρία εισόδου με την προϋπόθεση ότι $1 \text{ g Fe}^{3+} \text{ m}^{-3}$ οδηγεί σε $1,91 \text{ g Fe(OH)}_3 \text{ m}^{-3} = 1,91 \text{ g MeOH m}^{-3}$ (που αυξάνει επίσης τα X_{TSS} εισόδου και μειώνει την αλκαλικότητα).

Πίνακας 2.8 Στοιχειομετρία και κινητική που περιγράφουν την ταυτόχρονη κατακρήμνιση του φωσφόρου (IWA, 2000)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	S_{PO_4}	S_{ALK}	X_{MeOH}	X_{MeP}	X_{TSS}
Στοιχειομετρία:					
18. Κατακρήμνιση	-1	$\nu_{19,ALK}$	-3.45	4.87	1.42
19. Επαναδιάλυση	1	$\nu_{20,ALK}$	3.45	-4.87	-1.42
Κινητικές:					
18. Κατακρήμνιση	$k_{PRE} \cdot S_{PO_4} \cdot X_{MeOH}$		$k_{PRE} = 1 \text{ m}^3 (\text{g Fe (OH)}_3)^{-1} \text{ d}^{-1}$		
19. Επαναδιάλυση	$k_{RED} \cdot X_{MeP}$		$k_{RED} = 0.6 \text{ d}^{-1}$		

Πίνακας 2.9 Διεργασίες και ρυθμοί διεργασιών του μοντέλου ASM2 (IWA, 2000)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΡΥΘΜΟΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΔΡΟΛΥΣΗΣ :	
1. ΑΕΡΟΒΙΑ ΥΔΡΟΛΥΣΗ	$K_h \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
2. ΑΝΟΞΙΚΗ ΥΔΡΟΛΥΣΗ	$K_h \cdot \eta_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
3. ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΥΔΡΟΛΥΣΗ	$K_h \cdot \eta_{fe} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
ΕΤΕΡΟΤΡΟΦΙΚΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ : X_H	
4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΖΥΜΩΣΗΣ, S_F	$\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_F}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$

5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΖΥΜΩΣΗΣ, S_A	$\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_F}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_A}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
6. ΑΠΟΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΖΥΜΩΣΗΣ, S_F	$\mu_H \cdot \eta_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_F}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
7. ΑΠΟΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΖΥΜΩΣΗΣ, S_A	$\mu_H \cdot \eta_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_A}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
8. ΖΥΜΩΣΗ	$q_{fe} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_F}{K_{fe} + S_F} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
9. ΦΘΟΡΑ	$b_H \cdot X_H$
ΠΟΛΥΦΩΣΦΟΡΙΚΑ ΒΑΚΤΗΡΙΑ : X_{PAO}	
10. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΩΝ X_{PHA}	$q_{PHA} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP} + X_{PP}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
11. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΩΝ X_{PP}	$q_{PP} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_{PS} + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} \cdot \frac{K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}}{K_{IPP} + K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
12. ΑΕΡΟΒΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ X_{PHA}	$\mu_{PAO} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
13. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ X_{PAO}	$b_{PAO} \cdot X_{PAO} \cdot S_{ALK}/(K_{ALK} + S_{ALK})$
14. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ X_{PP}	$b_{PP} \cdot X_{PP} \cdot S_{ALK}/(K_{ALK} + S_{ALK})$
15. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ X_{PHA}	$b_{PHA} \cdot X_{PHA} \cdot S_{ALK}/(K_{ALK} + S_{ALK})$
ΝΙΤΡΟΠΟΙΗΤΙΚΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ (ΑΥΤΟΤΡΟΦΙΚΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ) : X_{AUT}	
16. ΑΝΑΠΤΥΞΗ	$\mu_{AUT} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AUT}$
17. ΦΘΟΡΑ	$b_{AUT} \cdot X_{AUT}$
18. ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ	$k_{PRE} \cdot S_{PO_4} \cdot X_{MeOH}$
19. ΕΠΑΝΑΔΙΑΛΥΣΗ	$k_{RED} \cdot X_{MeP} \cdot S_{ALK}/(K_{ALK} + S_{ALK})$

2.3.3 Περιορισμοί του μοντέλου

Όπως και το ASM1, έτσι και το ASM2 παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς που αφορούν κυρίως την προσθήκη της φωσφορικής βιομάζας, καθώς και την ίδια τη δομή του μαθηματικού μοντέλου. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένοι από αυτούς, όπως αναλύθηκαν από τον Διεθνή Οργανισμό για την Ποιότητα του Νερού (IQWA).

- Το παρόν μοντέλο έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει την επεξεργασία αστικών αποβλήτων και δεν πρέπει να εφαρμόζεται όταν υπάρχουν σε αυτά σημαντικές βιομηχανικές απορρίψεις.
- Το ASM2 δεν προσομοιώνει διαδικασίες διαχωρισμού στις δεξαμενές καθίζησης.
- Το pH πρέπει να είναι σχεδόν ουδέτερο, κατά προτίμηση μεταξύ 6.3 και 7.8. Ένας δείκτης για την ύπαρξη χαμηλού pH αποτελεί η μέτρηση χαμηλής τιμής της αλκαλικότητας.
- Η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25°C, διότι η συμπεριφορά των ΡΑΟ δεν είναι γνωστή έξω από αυτά τα όρια και οι προβλέψεις μπορεί να μην είναι λογικές, κυρίως όσον αφορά την απομάκρυνση του φωσφόρου.
- Τα προϊόντα της ζύμωσης είναι η μόνη οργανική τροφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα πολυφωσφορικά βακτήρια (ΡΑΟ). Οι (άλλοι) ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν για την ανάπτυξή τους τα ζυμώσιμα οργανικά υποστρώματα S_F και S_A .
- Τα πολυφωσφορικά βακτήρια μπορούν να αναπτυχθούν κάτω από αερόβιες συνθήκες χρησιμοποιώντας απευθείας μόνο τα εσωκυτταρικά αποθηκευμένα προϊόντα τους (X_{PHA}) και όχι τα αναερόβια προϊόντα της ζύμωσης S_A .
- Οι χαμηλές συγκεντρώσεις φωσφόρου και αμμωνίας μπορεί να αποτελέσουν περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης στις διεργασίες που συμμετέχουν.

2.4 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 2d (ASM2d)

Το μοντέλο ASM2d αποτελεί μια επέκταση του ASM2 και περιλαμβάνει δύο επιπλέον διεργασίες, οι οποίες προσομοιώνουν την ικανότητα των πολυφωσφορικών οργανισμών (PAOs) να χρησιμοποιούν τα αποθηκευμένα οργανικά προϊόντα στο εσωτερικό του κυττάρου τους για απονιτροποίηση (Henze et al., 1999). Πιο συγκεκριμένα, το ASM2d περιλαμβάνει την αποθήκευση των X_{PP} κάτω από ανοξικές συνθήκες και την ανάπτυξη των X_{PAO} σε αερόβιες συνθήκες, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω. Σημειώνεται ότι όλες οι υπόλοιπες διαδικασίες που περιγράφονται στο ASM2 ισχύουν και στο ASM2d.

Αποθήκευση των X_{PP} κάτω από ανοξικές συνθήκες. Η αποθήκευση των ορθοφωσφορικών S_{PO4} στη μορφή των X_{PP} , απαιτεί ενέργεια που προσφέρεται από την ανοξική αναπνοή των X_{PHA} . Η αναγέννηση των πολυφωσφορικών βακτηρίων αποτελεί προϋπόθεση για την ανάπτυξη των PAO, επειδή τα οργανικά υποστρώματα S_A αποθηκεύονται μόνο κατά την απελευθέρωση των πολυφωσφορικών. Η αποθήκευση των X_{PP} διακόπτεται αν η περιεκτικότητα σε φώσφορο των PAO γίνει υπερβολικά υψηλή. Το γεγονός αυτό αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την αποθήκευση των X_{PP} . Επίσης, κάτω από ανοξικές συνθήκες, ο μέγιστος ρυθμός αποθήκευσης των πολυφωσφορικών είναι μειωμένος κατά έναν συντελεστή η_{NO3} σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό κάτω από αερόβιες συνθήκες. Αυτό συμβαίνει διότι δεν έχουν όλοι οι PAO την ικανότητα νιτροποίησης.

Ανάπτυξη των X_{PAO} κάτω από αερόβιες συνθήκες. Αυτοί οι οργανισμοί έχουν την ικανότητα να αναπτύσσονται μόνο εις βάρος των εσωτερικών κυτταρικών οργανικών προϊόντων X_{PHA} . Επειδή ο φώσφορος απελευθερώνεται συνεχώς από τη λύση των X_{PP} , μπορεί να υποτεθεί ότι οι οργανισμοί καταναλώνουν ορθοφωσφορικά S_{PO4} για την παραγωγή βιομάζας. Είναι γνωστό ότι οι PAO μπορούν να αναπτυχθούν εις βάρος διαλυτών υποστρωμάτων (όπως το S_A), αλλά είναι απίθανο τέτοιου είδους τροφή να είναι διαθέσιμη κάτω από αερόβιες συνθήκες σε μια βιολογική εγκατάσταση απομάκρυνσης αζώτου. Συνεπώς, η ομάδα εργασίας της IAWQ πρότεινε αυτή η πιθανότητα να αγνοηθεί προς το παρόν. Κάτω από ανοξικές συνθήκες ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των PAO (μ_{PAO}) είναι μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο αερόβιο κατά ένα συντελεστή η_{NO3} . Αυτό συμβαίνει διότι δεν έχουν όλοι οι PAO την ικανότητα νιτροποίησης.

Πίνακας 2.10 Στοιχειομετρία των διεργασιών των πολυφωσφορικών βακτηρίων, οι οποίες ανήκουν μόνο στο ASM2d (IWA, 2000)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	S_{O_2}	S_{N_2}	S_{NO_3}	S_{PO_4}	X_{PAO}	X_{PP}	X_{PHA}
ΑΝΟΞΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΩΝ X_{PP}		$-v_{12,NO_3}$	v_{12,NO_3}	-1		1	$-Y_{PHA}$
ΑΕΡΟΒΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ X_{PAO}	v_{13,O_2}			$-i_{PBM}$	1		$\frac{-1}{Y_H}$

2.5 Περιγραφή του μοντέλου ενεργού ιλύος 3 (ASM3)

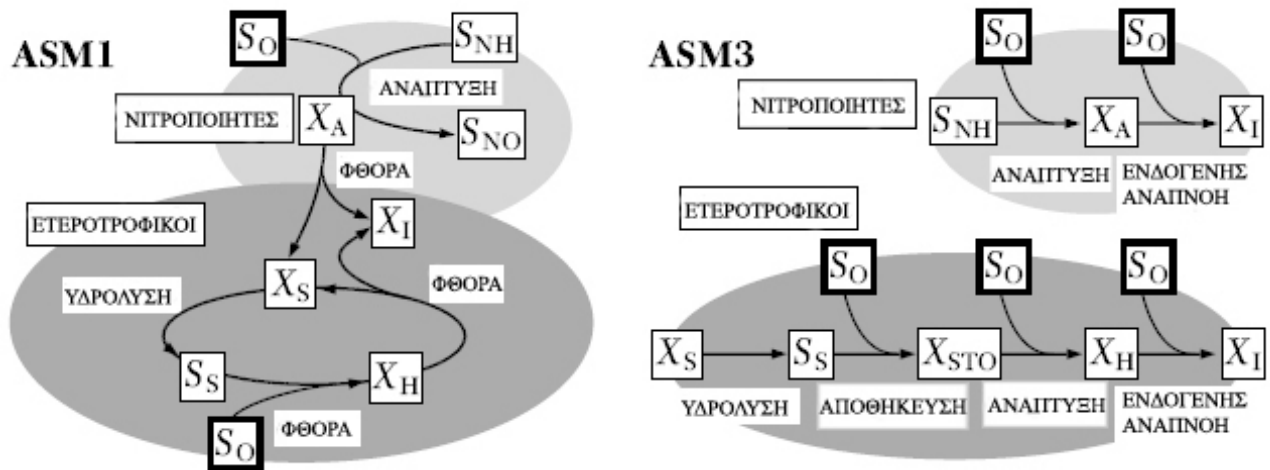
Το μοντέλο ASM3 αναπτύχθηκε για να διορθώσει ορισμένες ατέλειες του ASM1, μερικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

- Δεν περιλαμβάνει κινητικές που αναφέρονται στους περιορισμούς ανάπτυξης των ετεροτροφικών οργανισμών σε σχέση με το άζωτο και την αλκαλικότητα.
- Είναι αρκετά περίπλοκο ως προς τη χρήση του, διότι το μοντέλο περιέχει οργανικό βιοδιασπάσιμο κλάσμα και σωματιδιακό οργανικό άζωτο, που δεν μπορούν να υπολογιστούν.
- Δεν προσφέρει τη δυνατότητα για διαφοροποίηση στον ρυθμό λύσης των νιτροποιητών ανάλογα με το αν επικρατούν ανοξικές ή αερόβιες συνθήκες.
- Στο ASM1 η ενδογενής αναπνοή περιγράφεται από τις διαδικασίες της φθοράς, της υδρόλυσης και της ανάπτυξης των μικροοργανισμών.
- Το ASM1 περιλαμβάνει δύο συστατικά αδρανούς σωματιδιακού οργανικού υλικού, το οποίο εξαρτάται από την προέλευσή του. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει τρόπος να γίνει διάκριση ανάμεσα στο X_I και το X_P .
- Η διαδικασία της υδρόλυσης έχει σημαντική επίδραση στην κατανάλωση οξυγόνου και στην διεργασία της απονιτροποίησης από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Ωστόσο, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν οι κινητικές παράμετροι αυτής.
- Οι κινητικές της αμμωνιοποίησης δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν στο ASM1.
- Οι συγκεντρώσεις των MLSS στους βιοαντιδραστήρες της εγκατάστασης δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο.

Αυτές οι ελλείψεις και απλοποιήσεις ήταν στην πλειονότητά τους αποτέλεσμα των περιορισμένων δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σήμερα, που δεν υπάρχει αυτός ο περιορισμός σε τόσο μεγάλο βαθμό, το ASM3 εισάγει μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση στο μοντέλο, όσον αφορά τη διαδικασία της φθοράς. Στο ASM1 η ροή του COD είναι αρκετά περίπλοκη. Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν το COD με κυκλικό τρόπο. Η διαδικασία της φθοράς τροφοδοτεί την υδρόλυση και πυροδοτεί επιπλέον ανάπτυξη. Οι νιτροποιητές φθείρονται και επομένως, βελτιώνουν την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, οι οποίοι δεν μπορούν να διαχωριστούν εξ'ολοκλήρου από τους αυτοτροφικούς. Σημειώνεται ότι υπάρχουν δύο μόνο σημεία εισόδου για το

οξυγόνο. Αντίθετα, στο ASM3 οι αυτοτροφικοί και οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί είναι ξεκάθαρα διαχωρισμένοι, δεν υπάρχει ροή COD από τη μία στην άλλη ομάδα, ενώ υπάρχουν πολλαπλά σημεία εισόδου για το οξυγόνο (Gujer et al., 1991).

Οι διαφορές στα δύο μοντέλα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο παρακάτω σχήμα.

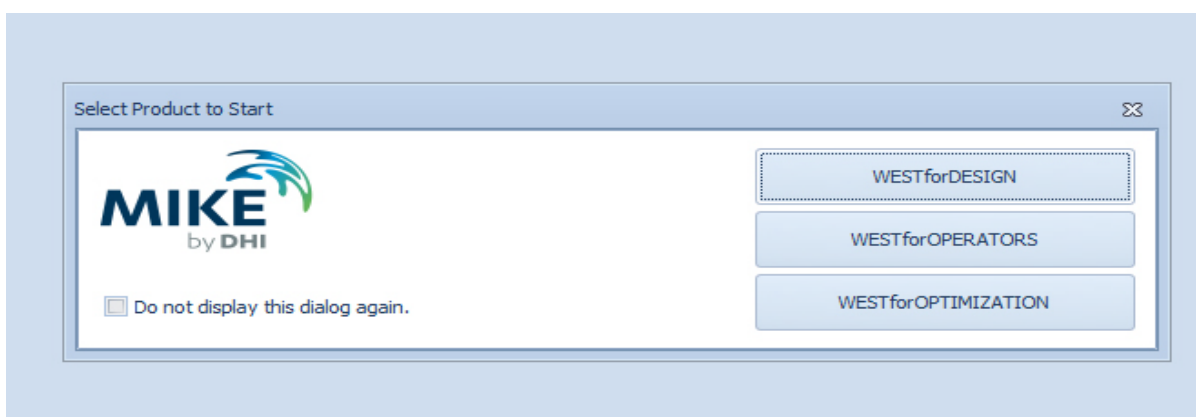


Σχήμα 2.1 Ροή του COD στο ASM1 και στο ASM3 (IWA, 2000)

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ WEST

3.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό WEST 2012 αναπτύχθηκε από την εταιρεία DHI για το σχεδιασμό και κυρίως για την προσομοίωση της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε σταθερές είτε σε δυναμικές συνθήκες. Το WEST αποτελείται από τέσσερα ξεχωριστά προϊόντα, τα οποία απευθύνονται σε συγκεκριμένα είδη χρηστών.



Σχήμα 3.1 Οθόνη έναρξης του λογισμικού WEST 2012

Το WESTforDESIGN επιτρέπει τη διερεύνηση διαφορετικών επιλογών σχεδιασμού εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων, καθώς και την αξιολόγηση αυτών με την πραγματοποίηση σεναρίων (πχ. χαμηλά φορτία εισόδου προς υψηλά φορτία).

Το WESTforOPERATORS επιτρέπει στον χρήστη να αξιολογεί την απόκριση της εγκατάστασης σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, αλλά και σε απρόσμενα γεγονότα (πχ. πλημμυρικά γεγονότα). Οι αξιολογήσεις αυτές πραγματοποιούνται διεξάγοντας σενάρια για συγκεκριμένες παροχές και συνθήκες λειτουργίας, καθώς και αξιολόγηση κόστους. Το λογισμικό έχει επίσης τη δυνατότητα να βελτιώνει την κατανόηση της λειτουργίας της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

Το WESTforOPTIMIZATION είναι πιθανότατα το πιο χρήσιμο εργαλείο από τα τέσσερα, καθώς επιτρέπει στους μηχανικούς να βελτιστοποιούν τη διαδικασία επεξεργασίας λυμάτων προσφέροντας συγκεκριμένα εργαλεία για εύκολο καλιμπράρισμα (calibration) του μοντέλου της προσομοίωσης και την αξιολόγηση της λειτουργίας της εγκατάστασης (ανάλυση ευαισθησίας, ανάλυση αβεβαιότητας, κλπ).

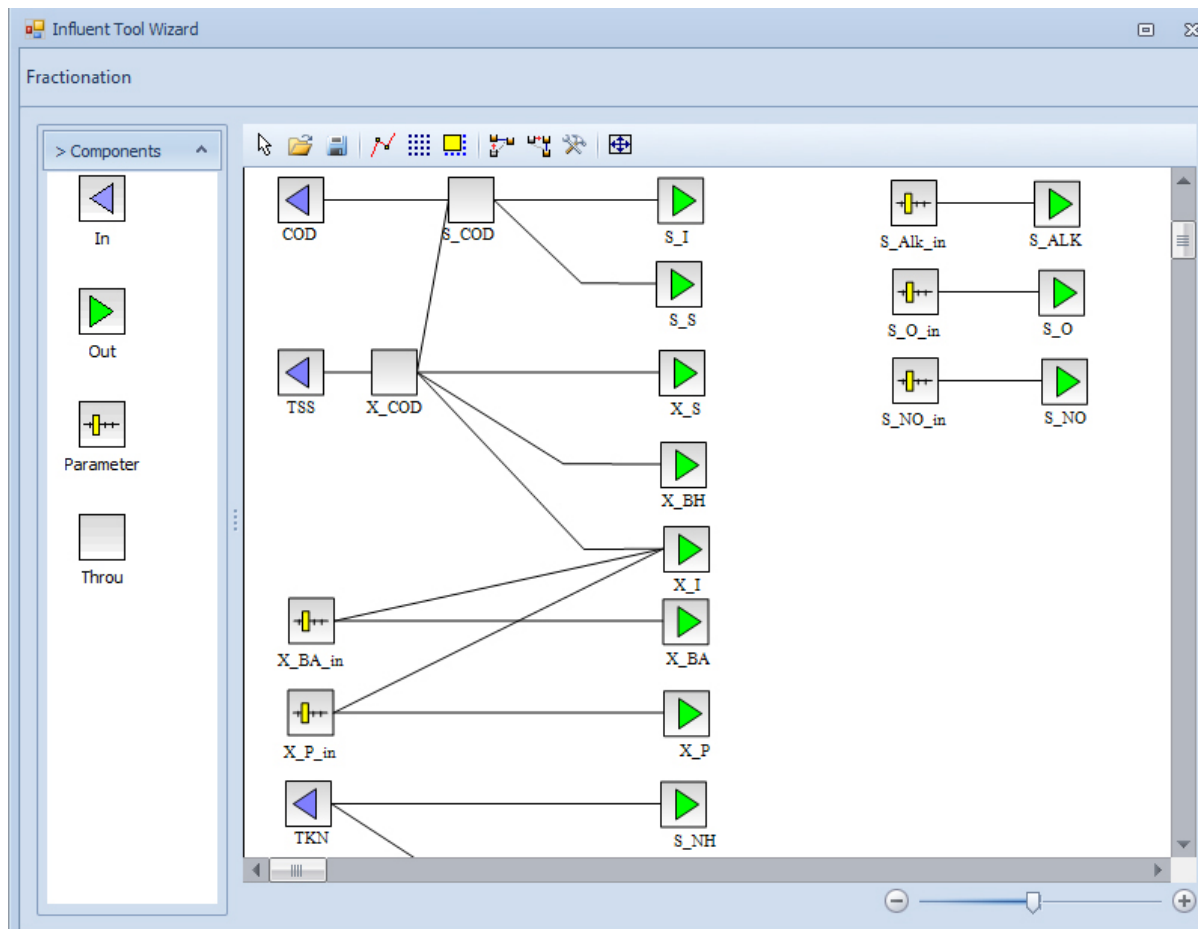
Το WESTforAUTOMATION επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη πραγματοποίηση προσομοιώσεων σε συνηθισμένες εφαρμογές από αυτοματιστές ή προγραμματιστές. Διαφορετικά SDKs που περιέχουν κατανοητά και εκτεταμένα αρχεία και πρότυπα, επιτρέπουν στο WEST να συνδέεται με συστήματα SCADA ή άλλα λογισμικά, όπως MATLAB, CFD, MIKE URBAN, κλπ.

Το WEST 2012 περιέχει επίσης τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται επιγραμματικά στον παρακάτω πίνακα. Τα σπουδαιότερα από αυτά αναλύονται στις επόμενες σελίδες αυτού του κεφαλαίου.

Πίνακας 3.1 Δυνατότητες του WEST 2012

	WESTfor- OPERATORS	WESTfor- DESIGN	WESTfor- OPTIMISATION	WESTfor- AUTOMATION
ΕΦΑΡΜΟΓΗ WEST	✓	✓	✓	
Προσομοίωση Steady-state	✓	✓	✓	
Δυναμική προσομοίωση	✓	✓	✓	
Αντικειμενική αξιολόγηση	✓	✓	✓	
Έλεγχοι εξόδου	✓	✓	✓	
Έλεγχοι εισόδου	✓	✓	✓	
Διαδραστική Επεξεργασία Διάταξης		✓	✓	
Οδηγός εισόδου/εξόδου		✓	✓	
Κατασκευαστής εκτελέσιμου μοντέλου		✓	✓	
Ανάλυση Σεναρίων			✓	
Εκτίμηση Παραμέτρων			✓	
Καθολική Ανάλυση Ευαισθησίας			✓	
Τοπική Ανάλυση Ευαισθησίας			✓	
Ανάλυση Αβεβαιότητας			✓	
Εφαρμογή Επεξεργασίας Μονάδων			✓	
Εφαρμογή Επεξεργασίας Μοντέλου			✓	
Εφαρμογή Επεξεργασίας Αριθμητικών Μονάδων	✓	✓	✓	

Εργαλείο Μετατροπής WEST3		✓	✓	
API				✓



Σχήμα 3.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό WEST 2012

3.2 Το περιβάλλον του WEST

Παρακάτω γίνεται αναφορά στα στοιχεία που απαρτίζουν το γραφικό περιβάλλον του WEST.

- Η σελίδα έναρξης (Start-up Sheet), η οποία εμφανίζεται κατά την έναρξη του λογισμικού και κάθε φορά που κλείνει ένα αρχείο (Project). Περιέχει λειτουργίες για τη δημιουργία ή το άνοιγμα ενός αρχείου και για την εύρεση πληροφοριών σχετικά με τη βοήθεια (Help) και τα νέα (News) του WEST.
- Υπάρχουν τρία είδη σελίδων στο WEST:
 1. το Layout, το οποίο είναι η περιοχή στην οποία γίνεται η σχεδίαση της εγκατάστασης,

2. οι σελίδες Input/Output, στις οποίες γίνεται η είσοδος των δεδομένων και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αντίστοιχα
 3. και η σελίδα Web-Browser.
- Το παράθυρο συστήματος (System Window), που προσφέρει πληροφορίες για τις ιδιότητες ενός αντικειμένου σε ένα φύλλο (Properties και Block Details window), έναν τρόπο πλοήγησης στη δομή του μοντέλου του πειράματος (Model Explorer) και έναν τρόπο ελέγχου για την δραστηριότητα του WEST (Info και Message Log Window), πρόσβαση στην περιοχή σχεδίασης (Layers και Overview window), μια γραφική παρουσίαση των βιβλιοθηκών του μοντέλου (Block Library) και ένα μέσο για την πραγματοποίηση των πειραμάτων (Control Center window).
 - Το μενού εφαρμογών (Application Menu) δίνει πρόσβαση σε βασικές δραστηριότητες και στις επιλογές του λογισμικού.
 - Η ράβδος κατάστασης (Status bar).

3.3 Είδη εικονικών πειραμάτων στο λογισμικό

Το WEST περιλαμβάνει πέντε (5) είδη εικονικών πειραμάτων, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

Ένα πείραμα ανάλυσης σεναρίου (Scenario Analysis ή SA) δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης του αποτελέσματος ενός δοσμένου σετ παραμέτρων σε ένα συγκεκριμένο σετ μεταβλητών, με τη διεξαγωγή (δυναμικών) προσομοιώσεων.

Ένα πείραμα ανάλυσης αβεβαιότητας (Uncertainty Analysis ή UA) επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης της αβεβαιότητας σε ένα σετ παραμέτρων και πώς αυτή επηρεάζει τις μεταβλητές του μοντέλου. Σε αντίθεση με το πείραμα ανάλυσης σεναρίου, οι τιμές των παραμέτρων προσδιορίζονται μέσω μιας διαδικασίας που εξασφαλίζει ισοδύναμη διασπορά των τιμών στο πεδίο ορισμού των παραμέτρων.

Τα πειράματα καθολικής ανάλυσης ευαισθησίας (Global Sensitivity Analysis ή GSA) δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να ελέγχει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται ένα σετ μεταβλητών σε σχέση με ένα σετ παραμέτρων.

Ένα πείραμα τοπικής ανάλυσης ευαισθησίας (Local Sensitivity Analysis ή LSA) υπολογίζει με αριθμητική ακρίβεια την τοπική ευαισθησία μιας μεταβλητής σε σχέση με τις παραμέτρους και/ή τις αρχικές συνθήκες.

Ένα πείραμα προσδιορισμού παραμέτρων (*Parameter Estimation* ή *PE*) τρέχει μια σειρά προσομοιώσεων έχοντας ως βάση το ίδιο μοντέλο και χρησιμοποιώντας τιμές που παράγονται αυτόματα για ένα συγκεκριμένο σετ παραμέτρων για κάθε τρέξιμο, προσπαθεί να προσδιορίσει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το αποτέλεσμα μιας συνάρτησης.

3.4 Μοντέλα ενεργού ιλύος στο λογισμικό

- **Activated Sludge Model No 1:** Το λογισμικό περιλαμβάνει το ASM1 όπως περιγράφηκε από τον IAQW και έχει επεκταθεί για να διορθώνει δύο από τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω στο κεφάλαιο 2: περιλαμβάνει θερμοκρασιακή διόρθωση και κινητικές για τον περιορισμό του αζώτου στην αερόβια και ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών οργανισμών.
- **Activated Sludge Model No 1-Anammox:** Το μοντέλο ASM1_AN είναι μια επέκταση του ASM1 που περιλαμβάνει τη διαδικασία της αναερόβιας οξειδωσης της αμμωνίας (anammox) και μια διαδικασία νιτροποίησης και απονιτροποίησης δύο βημάτων. Για τις διαδικασίες της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης, ως τροφή για την ανάπτυξη των απαραίτητων μικροοργανισμών χρησιμοποιούνται, αντί για το αμμώνιο και τις νιτρώδεις ρίζες, η αμμωνία και το νιτρώδες οξύ αντίστοιχα.
- **Activated Sludge Model for GHG No 1:** Το μοντέλο ενεργού ιλύος για GHG No 1 (ASMG1) είναι επέκταση του ASM1 και προσομοιώνει την παραγωγή του υποξειδίου του αζώτου (N_2O), ενός σημαντικού αερίου του θερμοκηπίου, σε συστήματα ενεργού ιλύος, από ετεροτροφικούς και αυτοτροφικούς οργανισμούς. Οι ετεροτροφικοί οργανισμοί λειτουργούν όπως στο μοντέλο ενεργού ιλύος για άζωτο (ASMN) (Hiatt and Grady, 2008), το οποίο έχει ως βάση το ASM1 και περιλαμβάνει μια διαδικασία νιτροποίησης δύο βημάτων και μία απονιτροποίησης τεσσάρων βημάτων. Το ASMG1 περιέχει επίσης, το μοντέλο που προτάθηκε από τους Mampaey et al. (2011) και περιγράφει τη διαδικασία της απονιτροποίησης από βακτήρια που οξειδώνουν την αμμωνία (AOB) και εξισώσεις για τον αερισμό και την αφαίρεση του αερίου. Το μοντέλο έχει υποστεί θερμοκρασιακή διόρθωση.
- **Activated Sludge Model No 2d:** Το λογισμικό περιλαμβάνει το ASM1 όπως περιγράφηκε από τον IAQW και έχει επεκταθεί για να συνδέει τους ρυθμούς αποσύνθεσης με τον εφιστάμενο αποδέκτη ηλεκτρονίων.

- **Activated Sludge Model No 3:** Το λογισμικό περιλαμβάνει το ASM3 όπως αναπτύχθηκε και περιγράφηκε από τον IAQW και έχει επεκταθεί για να περιλαμβάνει θερμοκρασιακή διόρθωση.
- **Activated Sludge Model No 3 EAWAG bio-P:** Το συγκεκριμένο βαθμονομημένο μοντέλο βασίζεται στο ASM3 και περιλαμβάνει βελτιωμένες διεργασίες απομάκρυνσης του φωσφόρου από τα λύματα, οι οποίες βασίζονται στο ASM2d (Rieger et al., 2001).

3.5 Βιολογική επεξεργασία

Το WEST, εκτός από τις συμβατικές δεξαμενές αερισμού, περιλαμβάνει συστήματα MBBR/IFAS (αναπτύσσεται αναλυτικά παρακάτω), MBR (δεξαμενή αερισμού που λειτουργεί και ως δεξαμενή καθίζησης με εσωτερικές ή εξωτερικές μεμβράνες), Trickling Filter, SBR (δεξαμενή αερισμού διακοπτόμενης λειτουργίας, στην οποία πραγματοποιούνται όλες οι βιολογικές διεργασίες, όπως και οι διεργασίες διαχωρισμού), CFCD και CFID.

3.6 Διεργασίες διαχωρισμού των λυμάτων

Το λογισμικό υποστηρίζει διεργασίες διαχωρισμού των λυμάτων σε όλα τα στάδια επεξεργασίας αυτών. Περιλαμβάνει μοντέλα πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης, καθώς και διεργασίες διαχωρισμού με αμμόφιλτρα και μεμβράνες (εσωτερικές και εξωτερικές). Παρακάτω αναλύονται συνοπτικά τα μοντέλα καθίζησης που περιλαμβάνονται στο λογισμικό.

Πρωτοβάθμια καθίζηση

- **Lessard-Beck:** Το μοντέλο αυτό περιγράφει τη διαδικασία της καθίζησης σε κυκλική δεξαμενή και περιλαμβάνει τη βιολογική διεργασία της υδρόλυσης.
- **Otterpohl-Freund:** Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην υπόθεση ότι η απομάκρυνση ενός ικανοποιητικού ποσοστού σωματιδιακής ύλης από τα λύματα εξαρτάται από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής. Γίνεται απομάκρυνση σωματιδιακού COD και δεν πραγματοποιείται καμία βιολογική αντίδραση.
- **Point Settler:** Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι απλοποίηση της κανονικής διαδικασίας, με τη δεξαμενή καθίζησης να αποτελεί απλά έναν διαχωριστή φάσεων χωρίς κανέναν απολύτως όγκο. Συνεπώς δεν λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος παραμονής στη δεξαμενή, όπου δεν πραγματοποιείται και καμία βιολογική διεργασία. Γενικά δεν είναι δυναμικό μοντέλο και βασίζεται στο ισοζύγιο μάζας.

- Takacs: Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στο μοντέλο της Vitasonic. Η δεξαμενή προσομοιώνεται με έναν αριθμό στρώσεων, από τις οποίες κατασκευάζεται μια ισορροπία στερεών σωματιδίων. Δύο από τις βασικότερες υποθέσεις του μοντέλου είναι ότι τα εισερχόμενα στερεά διανέμονται άμεσα ομογενώς πάνω στη στρώση τροφοδοσίας και μόνο η κάθετη ροή λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Η ταχύτητα καθίζησης της ιλύος έχει βρεθεί ότι είναι μια μη γραμμική συνάρτηση της συγκέντρωσης των στερεών. Στο μοντέλο της Vitasonic, η ροή της καθίζησης επηρεάζεται από την καθίζηση λόγω βαρύτητας και τη ροή των λυμάτων. Η τελευταία, έχει ανοδική φορά πάνω από τη στρώση τροφοδοσίας και είναι αποτέλεσμα του ρυθμού υπερχειλίσης. Κάτω από τη στρώση τροφοδοσίας, η ροή των λυμάτων είναι καθοδική και είναι αποτέλεσμα του ρυθμού απομάκρυνσης της ιλύος από τη δεξαμενή καθίζησης. Σημειώνεται ότι κάτω από μια ελάχιστη συγκέντρωση στερεών δεν πραγματοποιείται καθίζηση λόγω βαρύτητας. Για τις στρώσεις πάνω από τη στρώση τροφοδοσίας προστίθεται ένα κατώφλι για τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών.
- Takacs All Fraction: Το μοντέλο αυτό είναι μια επέκταση του μοντέλου του Takacs που λαμβάνει υπόψη τη διάδοση όλων των συστατικών, σωματιδιακών και διαλυτών. Η διάδοση των τελευταίων οφείλεται στην παροχή. Πιο συγκεκριμένα, κάτω από τη στρώση τροφοδοσίας είναι αποτέλεσμα του ρυθμού απομάκρυνσης της ιλύος, ενώ πάνω από αυτή οφείλεται στο ρυθμό υπερχειλίσης. Η διάδοση του σωματιδιακού μέρους προκαλείται μερικώς από την παροχή και μερικώς από την καθίζηση λόγω βαρύτητας, ενώ η καθίζηση κάθε συστατικού ξεχωριστά εξαρτάται από τη συνολική συγκέντρωση των σωματιδιακών στερεών στις στρώσεις. Η ποσότητα που βασίζεται στη βαρυτική καθίζηση κάθε σωματιδιακού συστατικού είναι συνεπώς ένα ποσοστό της συνολικής ποσότητας.
- Takacs Reactive: Το μοντέλο αυτό είναι μια επέκταση του μοντέλου του Takacs, που λαμβάνει υπόψη τη διάδοση όλων των συστατικών, σωματιδιακών και διαλυτών. Επίσης, στο μοντέλο αυτό, κατά τη διάρκεια της καθίζησης, πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις κροκίδωσης και αμμωνιοποίησης. Η διάδοση των συστατικών πραγματοποιείται με το μηχανισμό που αναλύθηκε στο Takacs All Fraction.
- Takacs Solubles Propagator: Το μοντέλο αυτό, όπως υποδηλώνει και το όνομά του, αποτελεί μια επέκταση του Takacs και, σε αντίθεση με το Takacs All Fraction, το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη μόνο τη διάδοση των διαλυτών συστατικών.

- Tay: Αυτό το μοντέλο καθίζησης χρησιμοποιεί, για να υπολογίσει το σωματιδιακό ποσοστό στα λύματα, τον υδραυλικό χρόνο παραμονής λυμάτων, καθώς και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής που απαιτείται για να απομακρυνθεί το μισό σωματιδιακό υλικό από αυτά. Για αυτούς τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η μέση παροχή εισροής. Στο μοντέλο δεν λαμβάνεται υπόψη καμία βιολογική διεργασία.

Δευτεροβάθμια καθίζηση

- Otterpohl-Freund: Το μοντέλο των Otterpohl και Freund για τη δευτεροβάθμια καθίζηση παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με αυτό για την πρωτοβάθμια. Περιλαμβάνει το μοντέλο του Hartel (το οποίο επιτυγχάνει αποτελέσματα κοντά στην πραγματικότητα τόσο για τις συγκεντρώσεις όσο και για τις αποθηκευμένες μάζες στη δευτεροβάθμια καθίζηση) και βρίσκει λύση για τα προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν στις τιμές της συγκέντρωσης των στερεών εκροής σε εισροή μετά από βροχόπτωση. Το μοντέλο χωρίζει τη δεξαμενή καθίζησης σε 10 στρώσεις, για κάθε μια από τις οποίες σχηματίζεται μια εξίσωση μάζας. Κάθε στρώση έχει μια μέγιστη χωρητικότητα για την αποθήκευση ύλους. Η χωρητικότητα αυτή μειώνεται όσο οδηγούμαστε στην επιφάνεια της δεξαμενής.
- Burger: Το μοντέλο από τους Burger et al. (2011) βασίζεται σε μια χωρική μονοδιάστατη μερική διαφορική εξίσωση. Η αριθμητική εκτέλεσή της μπορεί να θεωρηθεί ως μια επέκταση της προσέγγισης των στρώσεων, όπως εφαρμόστηκε από τη Vitasonic (1986) και τους Takacs et al. (1991). Το μοντέλο αυτό είναι περισσότερο αξιόπιστο και ευέλικτο σε σύγκριση με αυτό του Takacs. Σύμφωνα με αυτό, όταν τα λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή καθίζησης, τα στερεά διανέμονται άμεσα και ομογενώς στη στρώση τροφοδοσίας. Επίσης, μόνο η κάθετη ροή λαμβάνεται υπόψη (παράλληλη με τον άξονα της δεξαμενής).
- Marsili-Libelli: Το μοντέλο αυτό αποτελεί μια δυναμική εφαρμογή για τη μεταφορά και τη συγκέντρωση της μάζας της ύλους στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης που βασίζεται στη θεωρία της εμποδιζόμενης καθίζησης χωρίς τη χρήση στρώσεων.
- Plosz: Το μοντέλο του Plosz είναι μονοδιάστατο και ενσωματώνει μια δευτεροβάθμια παράγωγο στην εξίσωση μεταφοράς της μάζας (που αντιπροσωπεύει μια παραβολική μερική διαφορική εξίσωση), σε αντίθεση με το μοντέλο του Takacs, στο οποίο η εξίσωση είναι υπερβολική. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει την εξίσωση του Takacs για την ταχύτητα καθίζησης.

- Plosz SVI: Το μοντέλο αυτό αποτελεί επέκταση του μοντέλου του Plosz, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί το δείκτη καθιζησιμότητας SVI για να προσεγγίσει τις παραμέτρους της ταχύτητας καθίζησης.
- Takacs SVI: Το μοντέλο αυτό είναι μια επέκταση του μοντέλου του Takacs, στο οποίο η εκτίμηση της παραμέτρου καθίζησης για παρεμποδιζόμενη καθίζηση (r_H) γίνεται μέσω του δείκτη SVI, σύμφωνα με τους Daiger και Roper (1985) με τη σχέση:

$$r_H = \frac{0.148 + 0.0210 \cdot SVI}{1000}$$

Η δευτεροβάθμια καθίζηση περιλαμβάνει επίσης και τα μοντέλα Point Settler, Takacs, Takacs All Fraction και Takacs Solubles, για τα οποία ισχύουν τα ίδια με την πρωτοβάθμια καθίζηση.

3.7 Επεξεργασία ιλύος

Το λογισμικό περιλαμβάνει, για την προσομοίωση της επεξεργασίας της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος, αναερόβιο χωνευτή, ταινιοφιλτρόπρεσες, παχυντή βαρύτητας και φυγόκεντρο. Σημειώνεται ότι ορισμένα από αυτά τα στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα για όλα τα μοντέλα ενεργού ιλύος.

3.8 Μορφές ελέγχου

Οι παρακάτω μορφές χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν ορισμένα μεγέθη του συστήματος

- Constant ratio: Ένας Constant ratio controller ρυθμίζει την τιμή μιας μεταβλητής αναλογικά με τη μετρημένη τιμή μιας άλλης.
- On-Off Ideal: Ένας Ideal on-off controller «κλείνει» το ελεγχόμενο σήμα όταν η μετρημένη τιμή υπερβεί το όριο που έχει τεθεί από το χρήστη (ή το διαχειριστή της εγκατάστασης). «Ανοίγει» πάλι το σήμα όταν η μετρημένη τιμή γίνει πολύ χαμηλή. Το σφάλμα είναι η διαφορά μεταξύ της μετρημένης τιμής και του ορίου. Το μειονέκτημα ενός τέτοιου είδους controller είναι ότι οι γρήγορες εναλλαγές στη λειτουργία του μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στο μηχανολογικό εξοπλισμό.
- On-Off Band: Ένας On-Off Band controller λειτουργεί όπως ο Ideal on-off controller, με τη διαφορά ότι λύνει το πρόβλημα των γρήγορων εναλλαγών και τελικά, προστατεύει τα μηχανολογικά μέρη της εγκατάστασης.

- P Saturation: Στη συγκεκριμένη μορφή ελέγχου, θέτεται ένα κατώτερο και ανώτερο όριο. Μέσα σε αυτά τα όρια, η επιθυμητή τιμή του μεγέθους που θέλουμε να ρυθμίσουμε είναι ανάλογη της τιμής ενός άλλου συγκεκριμένου μεγέθους. Έξω από αυτά, παίρνει μια προκαθορισμένη κατώτερη ή ανώτερη τιμή.
- PI Saturation: Ο PI Saturation αποτελεί μια επέκταση του P Saturation, που συμπεριλαμβάνει το ολοκλήρωμα του χρόνου ως παράμετρο σχεδιασμού.
- PID Saturation: Ο PID Saturation αποτελεί μια επέκταση του P Saturation, η οποία εντάσσει το ολοκλήρωμα και την παράγωγο του χρόνου ως παραμέτρους σχεδιασμού.

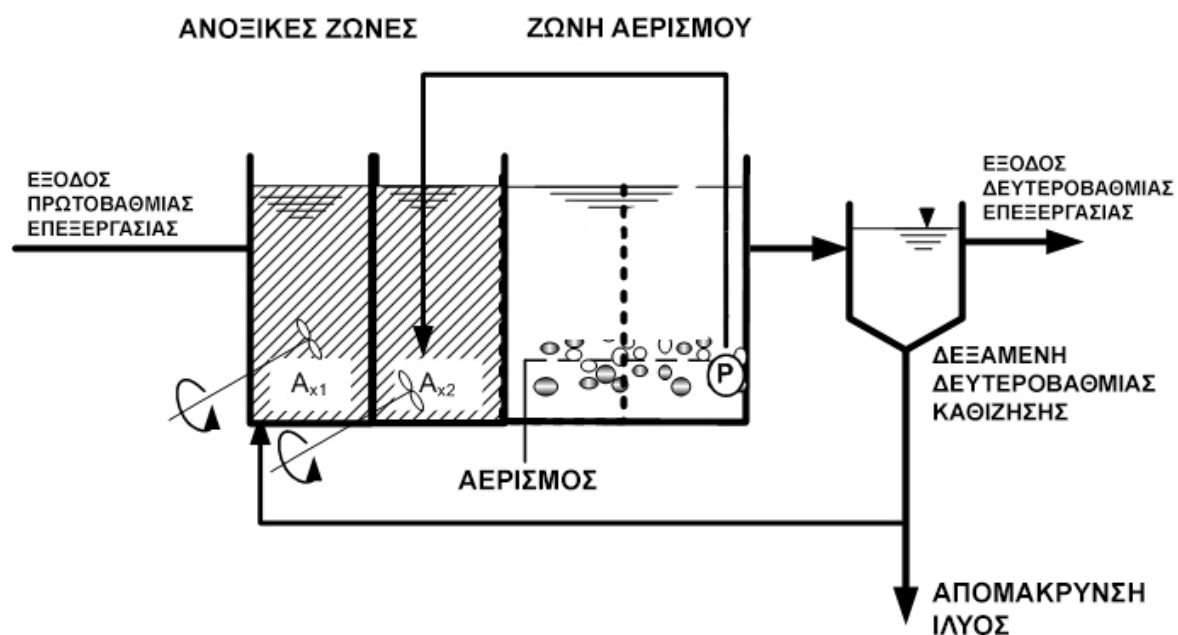
3.9 Χημικές ουσίες

Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η χρήση χημικών ουσιών για την υποβοήθηση ορισμένων διεργασιών. Συγκεκριμένα, το λογισμικό προσομοιώνει τη χρήση οξικού άλατος, αιθανόλης και μεθανόλης ως εξωτερικές πηγές άνθρακα (τα δύο τελευταία χρησιμοποιούνται κυρίως στη διεργασία της απονιτροποίησης), καθώς και τη χρήση αργιλίου και υδροξειδίου του σιδήρου για τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου.

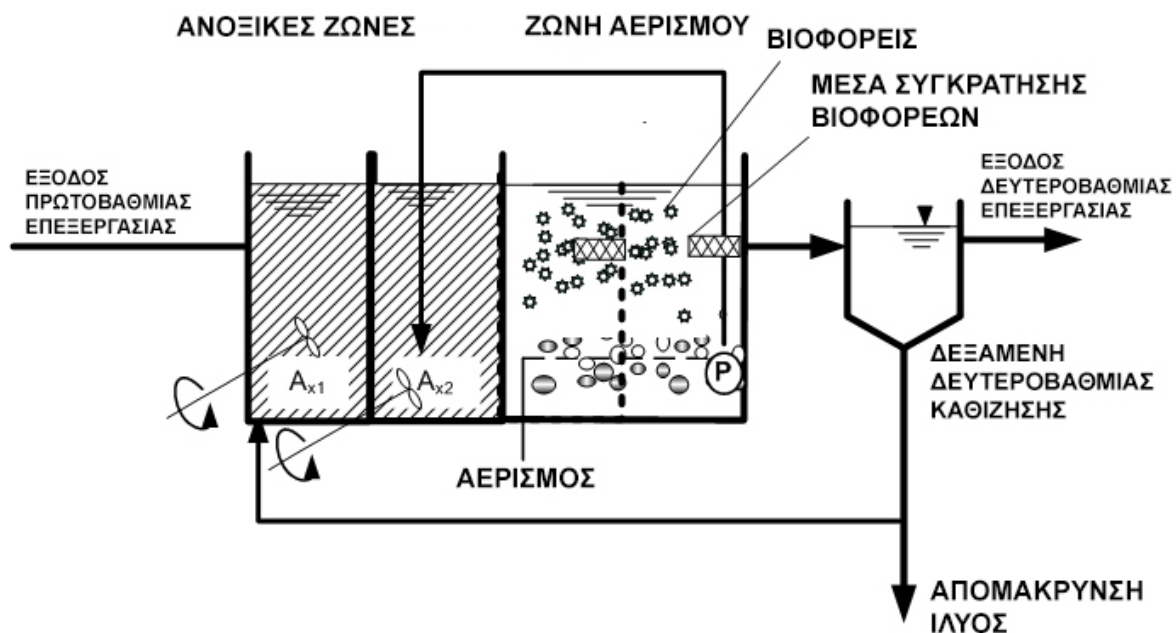
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ MBBR/IFAS

4.1 Εισαγωγή

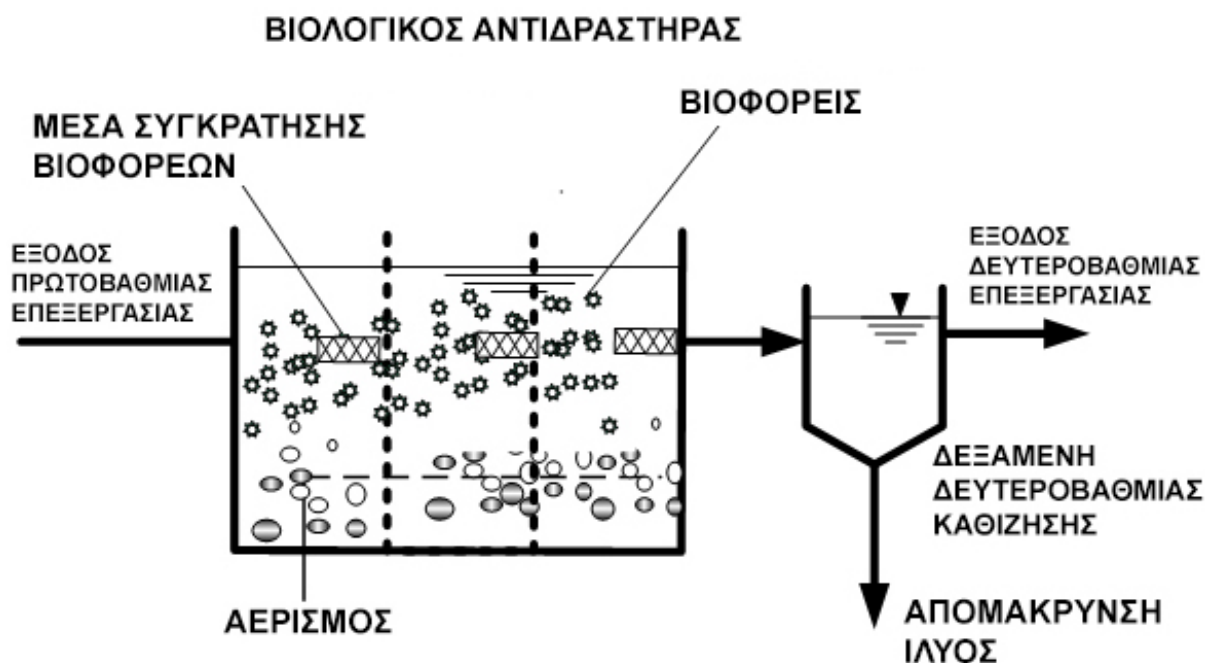
Τα τελευταία χρόνια, έχει δημιουργηθεί ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη υβριδικών βιοαντιδραστήρων, με στόχο κυρίως την αναβάθμιση υφιστάμενων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων που δεν είναι πλέον σε θέση να συμμορφωθούν με τα θεσμοθετημένα όρια εξόδου για απόρριψη σε ευαίσθητους αποδέκτες. Σε τέτοιου είδους συστήματα, η βιομάζα μπορεί να αναπτυχθεί τόσο σε αιωρούμενους βιοφορείς, όσο και σε σταθερά τοποθετημένα βιοφίλτρα, με αποτέλεσμα την αύξηση της βιομάζας στον αντιδραστήρα (επίτευξη καλύτερης ποιότητας εκροής) χωρίς την παράλληλη αύξηση του φορτίου στη δευτεροβάθμια καθίζηση και χωρίς την απαίτηση για ανακυκλοφορία ιλύος. Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί τους αιωρούμενους βιοφορείς και μπορεί να λειτουργήσει χωρίς την ανακυκλοφορία ιλύος ονομάζονται βιοαντιδραστήρες κινούμενης κλίνης ή MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor), ενώ η παραλλαγή της, στην οποία γίνεται και ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος ονομάζεται IFAS (Intergraded Fixed-Film Activated Sludge).



Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση ενός συμβατικού συστήματος ενεργού ιλύος.



Σχήμα 4.2 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος IFAS.



Σχήμα 4.3 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος MBBR.

Η παραπάνω τεχνολογία αναπτύσσεται τα τελευταία 60-70 χρόνια, από τη δεκαετία του 1930. Εκείνη την εποχή, οι βιοφορείς ήταν πλάκες αμιάντου που αναρτούνταν κάθετα πάνω από ένα πλέγμα κατασκευασμένο με διάτρητους σωλήνες αερισμού. Ανάμεσα στις πλάκες αυτές ήταν τοποθετημένες δεξαμενές καθίζησης. Το σύστημα δεν είχε τη δυνατότητα ανακυκλοφορίας ιλύος, ενώ ο συνολικός υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) κυμαινόταν από 1.7 έως 3 ώρες. Η διαδικασία ήταν σταθερή και ανταποκρινόταν καλά στις εναλλαγές της παροχής εισόδου, ωστόσο χωρίς την ανακυκλοφορία ιλύος, δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και του αζώτου. Επίσης, οι πλάκες δεν επέτρεπαν την επαρκή διασπορά οξυγόνου, την καλή μίξη των λυμάτων και ήταν ενεργειακά ασύμφωρες. Τελικά, η μέθοδος αυτή εγκαταλείφθηκε, δίνοντας χώρο στις μεθόδους ενεργού ιλύος και ξαναήρθε στο προσκήνιο τη δεκαετία του 1980, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η τεχνολογία των MBBR εφαρμόζεται κυρίως σε εγκαταστάσεις που κατασκευάζονται εξαρχής για αυτό το σκοπό και χρησιμοποιεί χιλιάδες βιοφορείς, συνήθως από πολυαιθυλένιο (PVC), οι οποίοι ρίχνονται σε έναν πλήρους μίξης αεριζόμενο βιοαντιδραστήρα. Όλες οι βιολογικές διεργασίες πραγματοποιούνται κυρίως από τη σχηματιζόμενη βιομάζα που αναπτύσσεται στους βιοφορείς. Συνεπώς, κάθε βιοφορέας αυξάνει τη λειτουργικότητα της εγκατάστασης και προσφέροντας μια προστατευμένη επιφάνεια για την ανάπτυξη των αυτοτροφικών και ετεροτροφικών μικροοργανισμών στα λύματα, επιτυγχάνει υψηλούς ρυθμούς αποικοδόμησης στο σύστημα. Σημειώνεται ότι το βιοφίλμ που δημιουργείται πάνω στους βιοφορείς μπορεί να ανταποκριθεί αυτόματα στις εναλλαγές του φορτίου εισόδου.

Αντίθετα, η τεχνολογία των IFAS εγκαθίσταται συνήθως σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, οι οποίες βρίσκονται στα όρια της χωρητικότητας τους και υπολειτουργούν. Η αναβάθμιση με IFAS λοιπόν προσφέρει μια εξαιρετικά οικονομικά αποδοτική λύση, αποφεύγοντας την επέκταση της εγκατάστασης και αξιοποιώντας τα ήδη υπάρχοντα συστήματα και εξοπλισμό. Η τεχνολογία είναι επίσης συμβατή με συστήματα αερισμού λεπτής φυσαλίδας και έχει καλή απόκριση σε δυναμική φόρτιση.

Υπάρχουν αρκετά είδη συστημάτων MBBR/IFAS, αλλά οι βασικές κατηγορίες είναι δύο: οι διασκορπιζόμενοι βιοφορείς, που παγιδεύονται στη δεξαμενή αερισμού και τα σταθερά μέσα, όπως δομημένες πλάκες ή πλέγματα, τοποθετημένα σε σταθερό μέρος στη δεξαμενή. Στα πρώτα συστήματα, οι βιοφορείς αναρτώνται ή διασκορπίζονται και είναι συνήθως κατασκευασμένοι από πορώδη υλικά (σπόγγος) ή πλαστικό σε κυλινδρικό σχήμα με πτερύγια. Τα συστήματα αυτά παρέχουν καλή ανάμιξη υγρού και ικανοποιητική επιφάνεια

για την ανάπτυξη της βιομάζας, όμως είναι ακριβά στην εφαρμογή τους λόγω του πρόσθετου εξοπλισμού που απαιτείται για τη συγκράτηση των βιοφορέων, καθώς και για τη συντήρησή τους, αφού με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζουν απώλεια της επιφάνειάς τους (λόγω τριβής) και πρέπει να αναπληρώνονται. Οι σταθεροί βιοφορείς κατασκευάζονται από εύκαμπτα υλικά με δομή υφάσματος και συνδέονται σε άκαμπτα πλαίσια ή από PVC. Τα τελευταία προσφέρουν έναν εξαιρετικό συνδυασμό υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι τύποι των βιοφορέων (ορισμένοι από αυτούς μπορούν να εφαρμοστούν και σε MBBR συστήματα), καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Πίνακας 4.1 Τύποι βιοφορέων (Πηγή: Brentwood Industries, 2009)

ΣΤΑΘΕΡΑ ΜΕΣΑ		ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
	Φύλλα από PVC	<ul style="list-style-type: none"> • Απλή εγκατάσταση • Χαμηλό αρχικό κόστος • Δεν υπάρχει απώλεια μέσων 	<ul style="list-style-type: none"> • Υπάρχει κίνδυνος συμφόρησης των πόρων των μέσων
	Μέσα τύπου υφάσματος	<ul style="list-style-type: none"> • Απλή εγκατάσταση • Δεν υπάρχει απώλεια μέσων 	
ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ		ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
	Κύλινδροι από πολυπροπυλένιο	<ul style="list-style-type: none"> • Εξαιρετικές συνθήκες μίξης • Μεγάλη διαθέσιμη επιφάνεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Υπάρχει κίνδυνος απομάκρυνσης βιοφορέων • Είναι δύσκολη η λειτουργία συστήματος αερισμού
	Σπόγγοι		

Οι διασκορπιζόμενοι βιοφορείς από PVC διατίθενται σε διάφορα σχέδια (ανάλογα με τη χρήση τους), ενώ το ύψος και η διάμετρος τους είναι μερικά εκατοστά και κυμαίνονται από 0.7 cm έως 1.2 cm και 1.0 cm έως 3.0 cm αντίστοιχα. Πωλούνται με το τετραγωνικό μέτρο και κοστίζουν από 100 – 500 \$. Σημειώνεται ότι οι βιοφορείς αυτοί αντέχουν σε θερμοκρασίες μικρότερες των 70 °C και έχουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 30 ετών.

4.2 Μαθηματικές προσεγγίσεις μοντέλων για συστήματα IFAS (υβριδικά συστήματα)

Στα συστήματα IFAS οι βιολογικές διεργασίες πραγματοποιούνται τόσο από τα αιωρούμενα οργανικά στερεά του βιοαντιδραστήρα, αλλά και από την προσκολλημένη βιομάζα των βιοφορέων. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, η μαθηματική προσέγγιση των διεργασιών ενός τέτοιου συστήματος είναι ιδιαίτερα δύσκολη, με αποτέλεσμα ελάχιστα μαθηματικά μοντέλα να έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν για το σκοπό αυτό. Όσα δημιουργήθηκαν αναφέρονται κυρίως σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης, με στόχο να μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο από τη λύση της πρώτης τάξεως διαφορικής εξίσωσης που εμπλέκεται στις εξισώσεις των κινητικών. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε τέτοιου είδους μοντέλα.

Το μοντέλο σταθερών συνθηκών που προτάθηκε από τους Chen et al. (1997) εξετάζει την ποσοτική απομάκρυνση των ευκόλως και αργά βιοδιασπάσιμων οργανικών ουσιών. Σε αυτή τη μελέτη, λήφθηκε υπόψη μία μόνο οργανική ουσία και ένα επίπεδο μέσο ανάπτυξης μικροοργανισμών, θεωρώντας τις ίδιες κινητικές παραμέτρους και για την αιωρούμενη, αλλά και για την προσκολλημένη βιομάζα, με σκοπό να απλοποιηθεί το μοντέλο προσομοίωσης για την απομάκρυνση των οργανικών ουσιών από το βιοφίλμ. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT), ο ρυθμός της οργανικής φόρτισης και το ποσοστό της επιφάνειας υποστήριξης στον όγκο του αντιδραστήρα θεωρήθηκαν οι πιο σημαντικές παράμετροι λειτουργίας.

Ο Lee (1992) παρουσίασε ένα μαθηματικό μοντέλο για να περιγράψει το υβριδικό σύστημα, υποθέτοντας ότι η ιλύς χάνεται από την αερόβια δεξαμενή ως ποσοστό της τροφής που χρησιμοποιείται από την αιωρούμενη βιομάζα σε σταθερές συνθήκες. Το μοντέλο υποθέτει δύο ξεχωριστές διαδικασίες ανάπτυξης που ανταγωνίζονται για το περιορισμένο υπόστρωμα και βασίζονται σε μια κινητική έκφραση Monod. Σύμφωνα με το συγγραφέα, το σπουδαιότερο πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι το γεγονός ότι διατηρεί όλα τα απαραίτητα σενάρια για την κινητική απλής ανάπτυξης, αλλά χρησιμοποιεί μόνο δύο βασικές παραμέτρους για να υποθέσει τα αποτελέσματα των αντικρουόμενων διεργασιών.

Το μοντέλο που προτάθηκε από τον Gebara (1999) υποθέτει ότι η δεξαμενή αερισμού αποτελείται από δύο αντιδραστήρες τοποθετημένους σε σειρά. Ο συγγραφέας πρότεινε δύο υπομοντέλα για κάθε αντιδραστήρα. Αυτή η μέθοδος σχεδιασμού δεν έδωσε ακριβή αποτελέσματα ούτε καλές εκτιμήσεις για τις παραμέτρους του συστήματος.

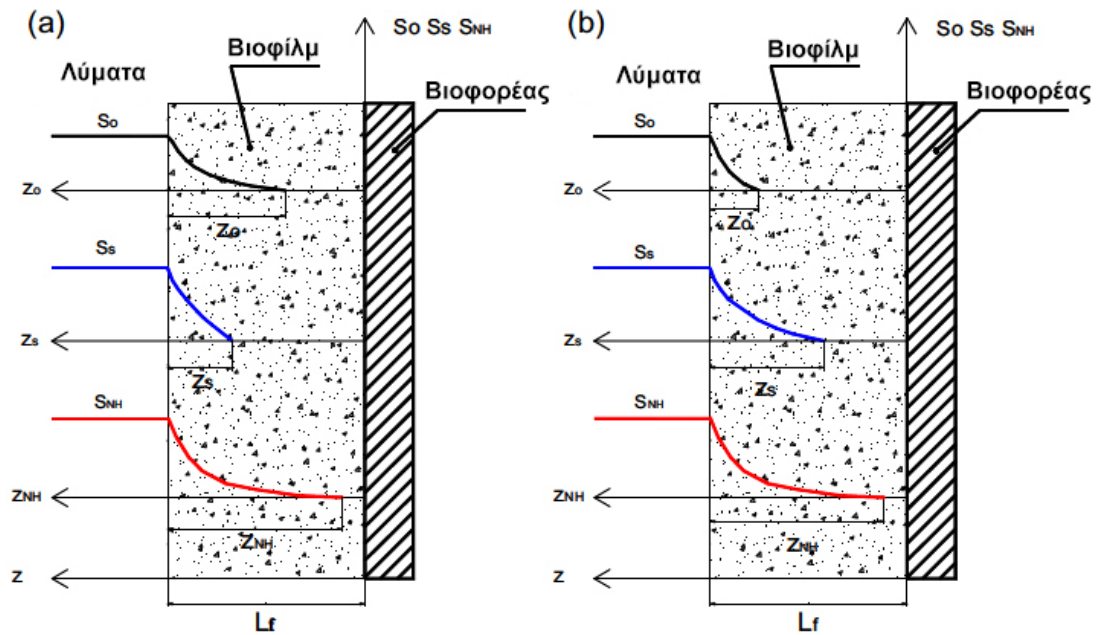
Ο Pastorelli (1992) πρότεινε ένα απλοποιημένο μοντέλο για λειτουργία του υβριδικού συστήματος σε σταθερές συνθήκες, που λάμβανε υπόψη τις ισορροπίες μαζών (κινητικές τύπου Monod) και εισήγαγε την ιδέα ότι η δραστηριότητα της προσκολλημένης βιομάζας εκφράζεται ως ποσοστό του υποστρώματος που απομακρύνεται από το βιοφίλμ. Το προτεινόμενο μοντέλο υπολόγιζε μόνο την απομάκρυνση του ευκόλως βιοδιασπάσιμου υποστρώματος.

Οι Fouad and Bhargava (2005) πρότειναν ένα απλό μαθηματικό μοντέλο για την αιωρούμενη και για την προσκολλημένη βιομάζα που βασίζεται σε κινητικές Monod, καθώς και στο νόμο διάχυσης του Fickian για βιοφίλμ. Το μοντέλο είχε ως στόχο την διερεύνηση μιας απλής έκφρασης για την ροή της τροφής στο βιοφίλμ. Από τη στιγμή που η τελευταία είναι η βασική παράμετρος του μοντέλου και η τιμή της αλλάζει με το HRT, αυτό μπορεί να περιγράψει το υβριδικό σύστημα με ακρίβεια, αν μια ακριβής τιμή για την ροή είναι διαθέσιμη. Σημειώνεται ότι από τη στιγμή που η ροή της τροφής παίζει σημαντικό ρόλο στους υβριδικούς αντιδραστήρες, τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού έχουν μικρότερη απόκλιση από τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα σε σύγκριση με τα μοντέλα που βασίζονται στην ιδέα της πλήρους προσκολλημένης ανάπτυξης.

Οι Plattes et al. (2006) πρότειναν ένα μοντέλο για τη δυναμική προσομοίωση μιας πιλοτικής MBBR εγκατάστασης, συνδυάζοντας τις εξισώσεις του ASM1 για την ανάπτυξη και τη φθορά του βιοφίλμ με εξισώσεις που περιγράφουν την προσκόλληση των σωματιδίων από τα λύματα σε αυτό, καθώς και την αποκόλληση μέρους του βιοφίλμ στο κυρίως υγρό. Οι συγγραφείς προσπάθησαν να ξεπεράσουν τον περιορισμό μεταφοράς της μάζας μέσω διάχυσης εισάγοντας στις εξισώσεις Monod σταθερές μισό-κορεσμού. Αν και τα παρατηρούμενα πειραματικά αποτελέσματα της εξόδου δεν ταίριαζαν ιδιαίτερα με αυτά της προσομοίωσης και η διάρκεια αξιολόγησης ήταν μικρή (5.5 ημέρες), το μοντέλο κατάφερε να περιγράψει τις τάσεις των μορφών του αζώτου στην εκροή, επιβεβαιώνοντας την προσαρμοστικότητα της προσέγγισης των διαδικασιών που αφορούν βιοφίλμ με τη χρήση μοντέλων ενεργού ιλύος.

Πρόσφατα, οι Sin et al. (2008) κατάφεραν επιτυχώς να εφαρμόσουν το ASM1 για να προβλέψουν την απομάκρυνση της αμμωνίας σε ένα σύστημα MBBR, επισημαίνοντας την επίδραση της θερμοκρασίας και του φορτίου της εισροής στην επίδοση του συστήματος κάτω από δυναμικές συνθήκες. Επίσης, οι Boltz et al. (2009) πρότειναν ένα μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση συστημάτων IFAS και MBBR σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Το μοντέλο ήταν μια επέκταση του ASM2d και θεωρούσε ότι οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στο βιοφίλμ είναι αντιδράσεις τύπου Monod και αντιδράσεις διάχυσης. Η υπόθεση του μοντέλου είναι ότι οι κινητικές αυτών είναι πανομοιότυπες για τα βακτήρια που βρίσκονται τόσο στην αιωρούμενη βιομάζα, όσο και στο βιοφίλμ. Ο βασικός σκοπός αυτού του μοντέλου ήταν να προσφέρει ένα χρήσιμο εργαλείο σε ερευνητές και επαγγελματίες που επιθυμούν να αναλύσουν ή να σχεδιάσουν ένα σύστημα IFAS και/ή MBBR.

Βασιζόμενοι στα συμπεράσματα των παραπάνω μοντέλων, ικανοποιητικά αποτελέσματα κατάφερε να επιτύχει και η ομάδα εργασίας των Mannina et al. (2011), η οποία εφάρμοσε το μοντέλο ASM1 για την περιγραφή των διεργασιών της αιωρούμενης και της προσκολλημένης βιομάζας και ένα δυναμικό μοντέλο για την αποκόλληση σωματιδίων από το βιοφίλμ στο κυρίως υγρό. Επίσης, χρησιμοποίησαν μαθηματικές εκφράσεις για να προσομοιώσουν τη ροή της διαλυμένης τροφής στην επιφάνεια του βιοφίλμ και την ικανότητά της να το διαπερνά πλήρως ή μερικώς, ανάλογα με την πυκνότητά του. Το σχήμα 4.1 παρουσιάζει σχηματικά την περίπτωση κατά την οποία η διαπερατότητα είναι μειωμένη και επηρεάζεται από την απουσία θρεπτικών συστατικών. Τα τελικά αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της εκροής μιας πιλοτικής εγκατάστασης IFAS στη Νορβηγία. Η σύγκριση αυτή έδειξε ότι το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωνε αρκετά καλά την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου από την εγκατάσταση, αλλά τα αποτελέσματα παρουσίαζαν διαφορές στις συγκεντρώσεις του ολικού και αμμωνιακού αζώτου.



Σχήμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση βιοφίλμ, το οποίο επιτρέπει μερικώς τη ροή της τροφής (Mannina et al., 2011)

Άλλες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν κυρίως συστήματα MBBR και είχαν ως στόχο την απομάκρυνση αζώτου από βιομηχανικά λύματα ή τη βελτίωση της εκροής με χημικά μέσα. Μια μελέτη που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι αυτή των Rosso et al. (2011), η οποία συγκρίνει ένα συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος με ένα σύστημα IFAS. Τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος έδειξαν ότι η απομάκρυνση COD και αμμωνίας ήταν ίδια και στα δύο συστήματα, αλλά το IFAS μπορούσε να διαχειριστεί σχεδόν το διπλάσιο υδραυλικό φορτίο σε σχέση με το συμβατικό. Τέλος, βρέθηκε ότι το IFAS είχε μεγαλύτερες απαιτήσεις σε οξυγόνο και ενέργεια.

4.3 Μέθοδοι διαστασιολόγησης συστημάτων MBBR/IFAS

- Διαστασιολόγηση με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού: Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια ευρεία εξάπλωση λογισμικών προσομοίωσης, τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με τα μοντέλα ενεργού ιλύος της IAQW και ενσωματώνουν κατάλληλα στοιχεία για τη σχεδίαση συστημάτων MBBR/IFAS. Τα λογισμικά αυτά θεωρούνται ακριβή εργαλεία για την προσομοίωση εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Μετά από τη διεξαγωγή εντατικών πειραμάτων ειδικά για το εκάστοτε σύστημα MBBR/IFAS, τα λογισμικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων με αξιόπιστα αποτελέσματα. Πιλοτικές μελέτες στις ίδιες τις εγκαταστάσεις

χρησιμοποιούνται συχνά για τη βαθμονόμηση του συστήματος και την επίτευξη μιας βελτιστοποιημένης διαδικασίας σχεδιασμού. Βασιζόμενοι στις εκάστοτε ανάγκες, ήδη υπάρχουσες δεξαμενές μπορούν να μετατραπούν σε ξεχωριστές αναερόβιες, ανοξικές και αερόβιες ζώνες και να γεμίσουν με το κατάλληλο πλήθος βιοφορέων για την επίτευξη της επιθυμητής απομάκρυνσης του BOD, της αμμωνίας, του TN και του TP. Χαρακτηριστικά εισροής, όπως η παροχή, το BOD, τα TSS, η αμμωνία, η αλκαλικότητα, κλπ. είναι απαραίτητα για να μπορέσει το λογισμικό να υπολογίσει την ποσότητα των βιοφορέων για τη βελτίωση της εκροής.

- Διαστασιολόγηση με τη χρήση κινητικών: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί εμπειρικούς ρυθμούς απομάκρυνσης της αμμωνίας για να υπολογίσει τις απαιτήσεις σχεδιασμού ενός συστήματος MBBR/IFAS. Αυτοί οι ρυθμοί νιτροποίησης μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος του βιοφορέα που χρησιμοποιείται και εξαρτώνται από τις συγκεντρώσεις του αζώτου, του διαλυμένου οξυγόνου (DO) και του BOD. Η κινητική μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, διότι προσφέρει απλά μια εκτίμηση σχετικά με την ποσότητα των απαιτούμενων μέσων για την επίτευξη μιας αισθητά βελτιωμένης ποιότητας εκροής.
- Διαστασιολόγηση με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων: Μια απλή μέθοδος εκτίμησης της ποσότητας των απαραίτητων βιοφορέων για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι να υπολογιστεί η πρόσθετη ποσότητα της βιομάζας που απαιτείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη βελτίωση στην επεξεργασία μιας συμβατικής εγκατάστασης ενεργού ιλύος. Η απαιτούμενη ποσότητα βιοφορέων που υποστηρίζουν την ανάπτυξη της ζητούμενης βιομάζας, μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστή η τυπική ποσότητα βιομάζας που αναπτύσσεται στο συγκεκριμένο είδος βιοφορέα. Αν και η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αποδεκτή για αρχικές εκτιμήσεις, δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα αξιόπιστη για την αποτελεσματικότητα της ανάπτυξης της βιομάζας, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά εισόδου των λυμάτων, τη θερμοκρασία τους ή την ανακυκλοφορία της ιλύος. Συνεπώς μειονεκτεί έναντι των πολύπλοκων λογισμικών που χρησιμοποιούν όλες αυτές τις παραμέτρους για να προβλέψουν με ακρίβεια τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος.

4.4 Πλεονεκτήματα συστημάτων MBBR/IFAS

Η παραπάνω υβριδική τεχνολογία παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, μερικά από τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

- Επιτρέπει στα συστήματα ενεργού ιλύος να επιτυγχάνουν βελτιωμένες επιδόσεις σε σχέση με τα συμβατικά, αυξάνοντας τα MLSS έως και 3000 mg/L στη δεξαμενή αερισμού, ενώ παράλληλα μειώνουν τα στερεά στη δεξαμενή τελικής καθίζησης.
- Βελτιώνει τη διαδικασία της νιτροποίησης. Η επιπλέον παραγόμενη βιομάζα αυξάνει τον χρόνο παραμονής στερεών (SRT), ευνοώντας τη δράση των νιτροποιητικών βακτηρίων, ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Είναι ανθεκτική σε απότομες μεταβολές (συνήθως αύξηση) της παροχής και του οργανικού φορτίου, διότι η παρουσία της βιομάζας στους βιοφορείς επιτρέπει την ταχύτερη επιστροφή του συστήματος στην κανονική του λειτουργία.
- Το σύστημα MBBR/IFAS είναι πιο σταθερό σε σχέση με τα συμβατικά λόγω της μείωσης του κλάσματος F/M, η οποία προκαλείται από την αύξηση της βιομάζας (M) (η τροφή (F) παραμένει σταθερή).
- Παρουσιάζει μειωμένη παραγωγή λάσπης, διότι το κλάσμα F/M είναι μειωμένο.
- Βελτιώνει την καθίζηση. Σε αρκετές μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι ο δείκτης καθιζησιμότητας (SVI) σε συστήματα MBBR/IFAS είναι καλύτερος σε σχέση με τα συμβατικά και παρουσιάζει λιγότερες διακυμάνσεις, ενώ στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί μείωση του SVI από 25%-40%. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι όσο μικρότερος είναι ο SVI τόσο πιο συμπυκνωμένη είναι η ιλύς που επιστρέφει στον βιοαντιδραστήρα, με αποτέλεσμα να γίνεται εξοικονόμηση σε ενέργεια.

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση των δυνατοτήτων του λογισμικού WEST για την προσομοίωση της λειτουργίας βιολογικών αντιδραστήρων τύπου MBBR/IFAS για την απομάκρυνση οργανικού άνθρακα και αζώτου από αστικά λύματα. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας έγινε προσομοίωση δύο συστημάτων ενεργού ιλύος, ενός συμβατικού και ενός υβριδικού (MBBR/IFAS), και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων τους από τις αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν. Στις προηγούμενες ενότητες έγινε μια περιγραφή της λειτουργίας και των δυνατοτήτων του λειτουργικού προγράμματος. Παράλληλα, περιγράφηκε αναλυτικά το μοντέλο ενεργού ιλύος 1 (ASM1), το οποίο περιέχεται στο WEST. Παρακάτω περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθενός από τα εξεταζόμενα συστήματα.

Βιολογικοί αντιδραστήρες:

Ο συνολικός όγκος περιλαμβάνει τον όγκο της ανοξικής και της δεξαμενής αερισμού. Οι όγκοι της κάθε δεξαμενής και για τα δύο συστήματα είναι :

- $V_{\text{ανοξ}} = 250 \text{ m}^3$

- $V_{\text{αερ}} = 400 \text{ m}^3$

Στο σύστημα MBBR/IFAS, στον αερόβιο αντιδραστήρα, προστίθενται επιπλέον βιοφορείς σε ποσοστό πλήρωσης όγκου 5%. Οι βιοφορείς αυτοί προσφέρουν ειδική επιφάνεια ανάπτυξης ίση με $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ και πυκνότητα βιοφίλμ (biofilm density) ίση με 10.000.

Συνολική επιφάνεια των δεξαμενών καθίζησης:

Ο διαχωρισμός της βιομάζας από τα επεξεργασμένα λύματα, πραγματοποιείται σε μια κυκλική δεξαμενή καθίζησης, συνολικής επιφάνειας 80 m^2 και ύψους 4 m. Ως μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το Tackacs.

Η ποσοτική και ποιοτική σύσταση των λυμάτων, που εισέρχονται στη βιολογική βαθμίδα της εγκατάστασης, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα και είναι ίδια για όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά είναι συνήθεις τιμές λυμάτων.

Πίνακας 5.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά στην είσοδο της εγκατάστασης

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΕΓΕΘΟΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Q	1000	m ³ /d
BOD	280	mg/l
COD	650	mg/l
TSS	300	mg/l
TKN	43	mg/l
SRT	18	d
R _{EA}	3Q	
Τλυμ	20	°C

Για την κλασματοποίηση του οργανικού φορτίου των λυμάτων λήφθηκαν υπόψη βιβλιογραφικά δεδομένα. Όλα τα ποσοστά είναι συναρτήσεως του COD.

Πίνακας 5.2 Κλασματοποίηση του COD

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ
S _I	6%
S _S	15%
X _S	66%
X _I	12%
X _{BH}	1%

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 5.3 Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις για απορρίψεις από Ε.Ε.Λ. , σύμφωνα με τα όρια της Οδηγίας 91/271.

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%

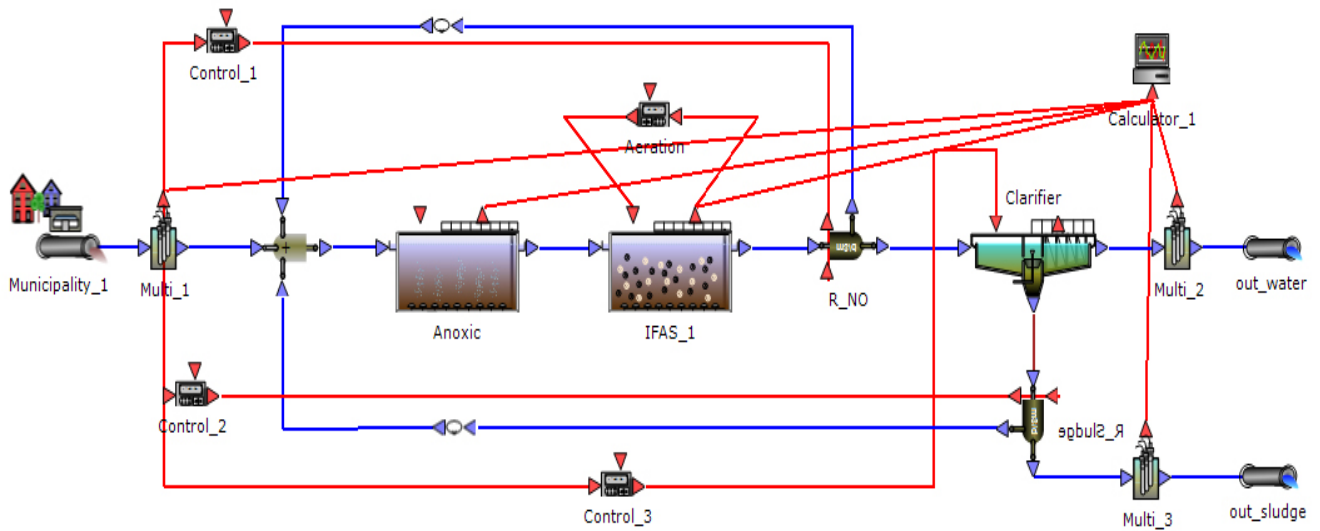
***ως μέση ετήσια τιμή

Στον πίνακα 5.4 παρατίθενται οι τιμές των στοιχειομετρικών, κινητικών, λειτουργικών παραμέτρων και των παραμέτρων καθίζησης του μοντέλου του Takacs. Τέλος να αναφερθεί ότι το μοντέλο εισαγωγής των δεδομένων εισροής, όπως επίσης και αυτό της ενεργού ιλύος που χρησιμοποιήθηκε είναι το ASM1, κατάλληλα τροποποιημένο, ώστε να προσομοιώνει τις βιολογικές διεργασίες που επιτελούνται σε ένα σύστημα MBBR/IFAS.

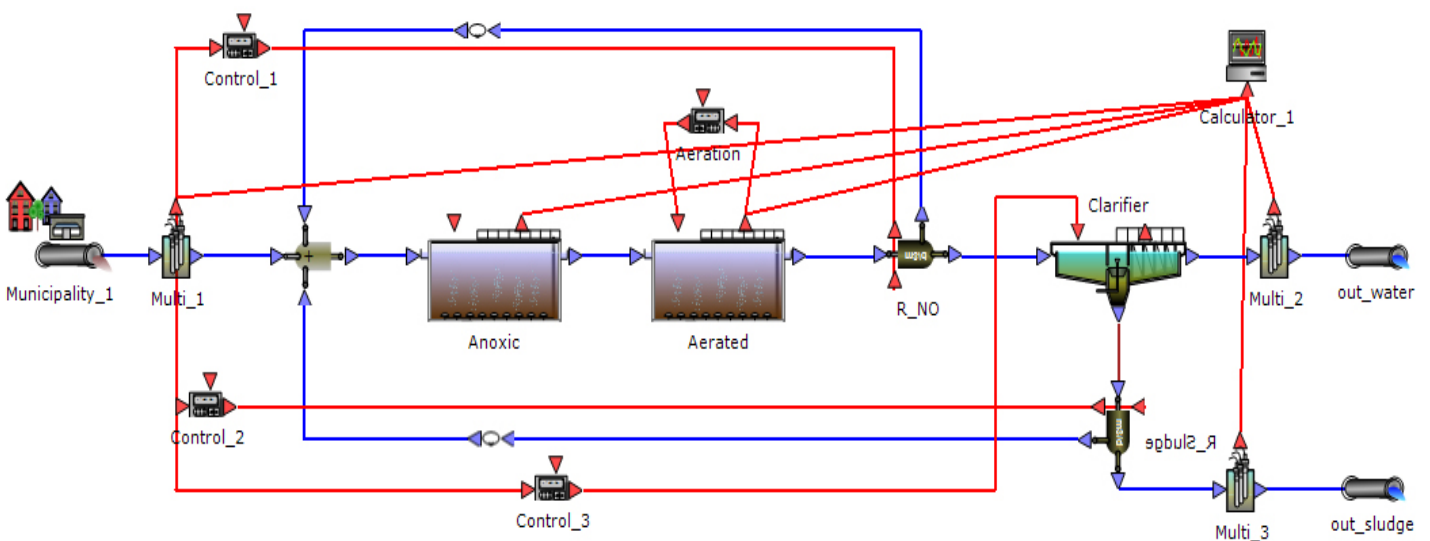
Πίνακας 5.4 Κινητικές και στοιχειομετρικές παράμετροι, παράμετροι για το σύστημα MBBR/IFAS και την καθίζηση.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
<i>Κινητικές παράμετροι</i>		
Συντελεστής παραγωγής αυ/φικής βιομάζας Y_A	0.24	-
Συντελεστής παραγωγής ετε/φικής βιομάζας Y_H	0.08	-
N στη βιομάζα i_{XB}	0.086	gN/gCOD
<i>Στοιχειομετρικές παράμετροι</i>		
Ετεροτροφική βιομάζα:		
Μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης της βιομάζας μ_{maxH}	6	1/d
Σταθερά Monod για τροφή K_S	20	gCOD/m ³
Σταθερά Monod για οξυγόνο K_{O_A}	0.4	gO ₂ /m ³
Σταθερά Monod για νιτρικά K_{NO}	0.5	gN/m ³
Σταθερά Monod για αμμωνιακό N K_{N_A}	0.05	gN/m ³
Συντελεστής αποσύνθεσης b_H	0.62	1/d
Διορθωτικός συντ. για ανοξικές συνθήκες ρ_{NO_3}	0.8	-
Αυτοτροφική βιομάζα:		
Μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης βιομάζας μ_{maxA}	0.8	1/d
Συντελεστής αποσύνθεσης b_A	0.15	1/d
Υδρόλυση:		
Μέγιστος ειδικός ρυθμός υδρόλυσης K_b	3	1/d
Διορθωτικός συντ. για ανοξικές συνθήκες ρ_{NO_3}	0.4	-
<i>Παράμετροι για το σύστημα MBBR/IFAS</i>		
Αρχικό πάχος του βιοφίλμ d_{ini}	0.0002	m
Συντελεστής για την προσκόλληση των σωματιδίων k_{At}	0.1	1/d
Μέγιστο πάχος του βιοφίλμ d_{max}	0.0005	m
<i>Παράμετροι για την καθίζηση</i>		
Μέγιστη ταχύτητα καθίζησης	250	m/d
Μέγιστη θεωρητική ταχύτητα καθίζησης	474	m/d
Μη καθιζήσιμο ποσοστό	0.228	%

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται σχηματικά τα εξεταζόμενα συστήματα.



Σχήμα 5.1 Σχηματική αναπαράσταση του βιολογικού τμήματος του συστήματος MBBR/IFAS στο οποίο έγιναν οι αναλύσεις.



Σχήμα 5.2 Σχηματική αναπαράσταση του βιολογικού τμήματος του συμβατικού συστήματος στο οποίο έγιναν οι αναλύσεις.

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

6.1 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης των συστημάτων συναρτήσει του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας Y_H

Οι κινητικές και στοιχειομετρικές παράμετροι αποτελούν τη βάση των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και τη λειτουργία μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Τέτοιες παράμετροι είναι ο συντελεστής μετατροπής της τροφής σε βιομάζα (Y), ο ρυθμός βακτηριακής φθοράς (b), η μέγιστη ειδική ταχύτητα ανάπτυξης των μικροοργανισμών (μ_{max}), κλπ. Παράλληλα, οι παραπάνω παράμετροι είναι απαραίτητοι και για την εκτίμηση της αναχαίτισης των βιολογικών διεργασιών από οργανικούς και ανόργανους τοξικούς ρυπαντές. Συνεπώς, είναι σκόπιμο σε μια Ε.Ε.Α. να πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, για να γίνει αξιολόγηση της επίδρασης αυτών στις μεταβλητές του συστήματος.

MLSS: Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για το συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας Y_H στο συμβατικό σύστημα (σχήμα 6.1), παρατηρείται ότι η συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στην αερόβια δεξαμενή (MLSS) αυξάνεται τόσο με την αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών (SRT) όσο και με την αύξηση του συντελεστή Y_H . Επίσης, για βαθμιαία αύξηση του Y_H παρατηρείται αύξηση στη συγκέντρωση των MLSS, η οποία είναι της τάξεως του 21% για μικρά SRT και φτάνει το 320% για τις 20 ημέρες. Στο σύστημα MBBR/IFAS (σχήμα 6.2), παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στα MLSS λόγω του συντελεστή Y_H και του SRT, ωστόσο τα τελικά αποτελέσματα είναι αυξημένα κατά 1000 mg/L (σε σχέση με το συμβατικό) λόγω της πρόσθετης βιομάζας που αναπτύσσεται στους βιοφορείς και τελικά τμήμα αυτής αποκολλάται .

COD: Η συγκέντρωση του COD στην έξοδο και των δύο εξεταζόμενων συστημάτων (σχήμα 6.3 και σχήμα 6.4) παραμένει πρακτικά αμετάβλητη για τις διάφορες τιμές του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας. Ακόμη, ανάμεσα στα δύο συστήματα δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές. Αξίζει να σημειωθεί 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.

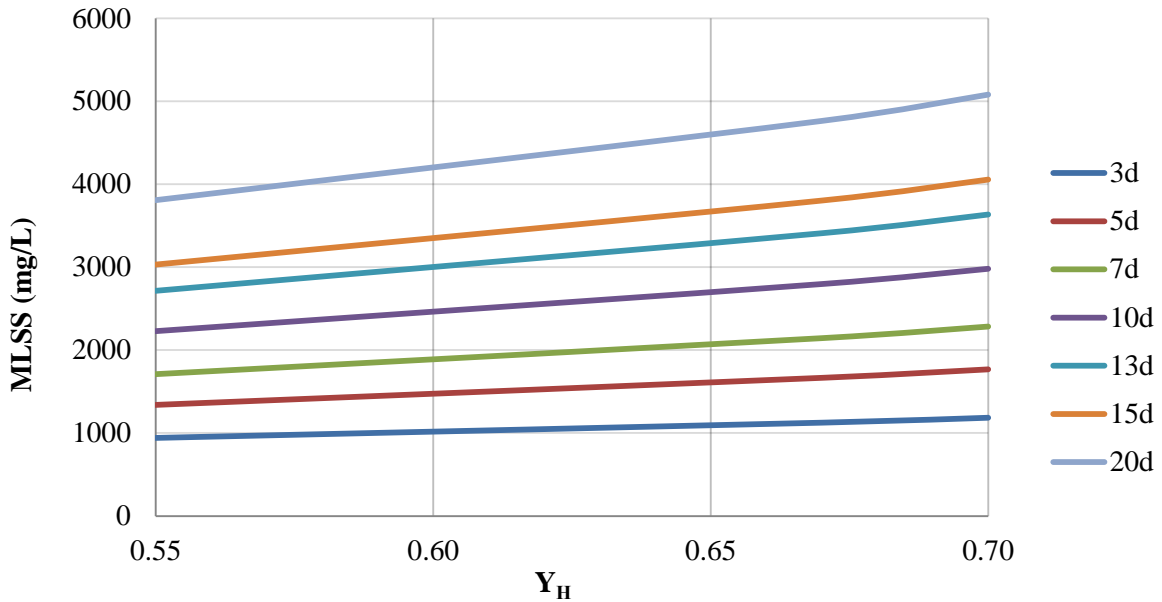
BOD: Και στα δύο συστήματα, η συγκέντρωση BOD στην έξοδο παρουσιάζει μικρή αύξηση (της τάξεως του 1 mg/L) με την αύξηση του συντελεστή Y_H (αν και στο MBBR/IFAS για χρόνο παραμονής στερεών 5 ημερών παρουσιάζει μείωση), ενώ ελαττώνεται με την αύξηση του SRT (σχήμα 6.5 και 6.6). Μεταξύ των δύο συστημάτων, για τις ίδιες παραμέτρους και συνθήκες, οι διαφορές είναι αμελητέες, με το MBBR/IFAS να παρουσιάζει ελαφριά αύξηση (περίπου 0.6 mg/L), που ίσως να οφείλεται στην επιπλέον βιομάζα που υπάρχει στο βιοαντιδραστήρα. Σημειώνεται, ότι καμία συγκέντρωση δεν ξεπερνά τα θεσμοθετημένα όρια.

TSS: Και στα δύο συστήματα, η συγκέντρωση των ολικών στερεών στην έξοδο (σχήμα 6.7 και σχήμα 6.8) φαίνεται να είναι πρακτικά ανεξάρτητη από τις διάφορες τιμές του συντελεστή Y_H , του χρόνου παραμονής στερεών (SRT), καθώς και της προσθήκης βιοφορέων (για το σύστημα MBBR/IFAS), αφού δεν παρατηρείται καμία διαφορά μεταξύ τους. Επίσης, όλες οι συγκεντρώσεις υπακούουν στα θεσμοθετημένα όρια.

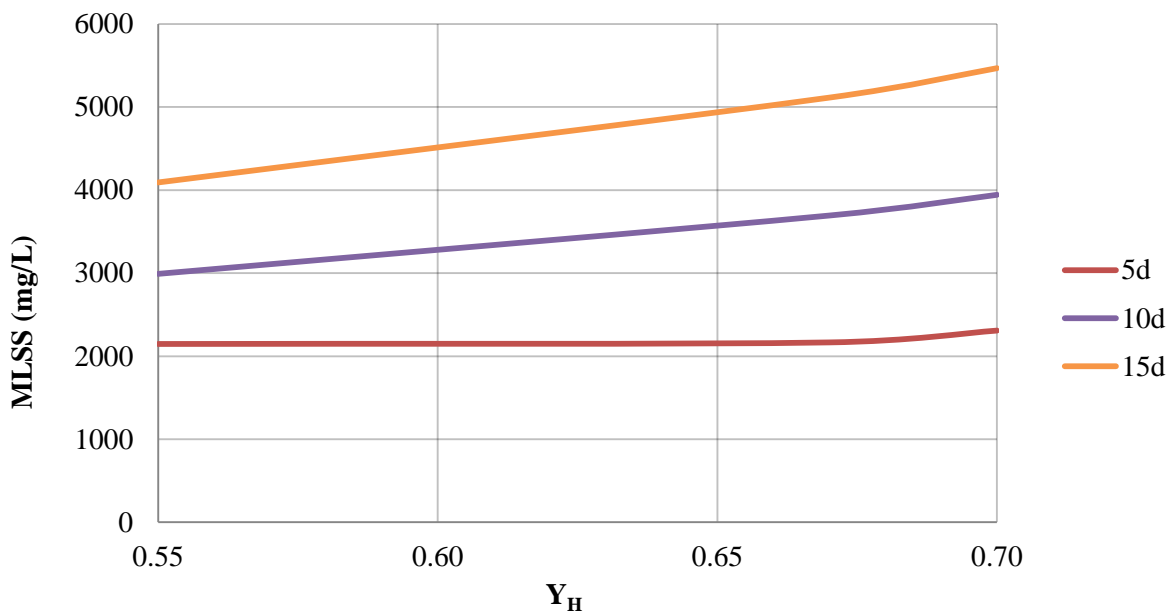
Αζωτο: Ως προς την συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην εκροή (σχήμα 6.9), το συμβατικό σύστημα δεν ανταποκρίνεται επαρκώς για χρόνους παραμονής στερεών τριών και πέντε ημερών. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αδυναμίας των αυτοτροφικών πραγματοποιήσουν οποιαδήποτε βιολογική διεργασία απομάκρυνσης του αζώτου. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, η ολική συγκέντρωση αζώτου στην εκροή είναι συμβατή με τα όρια της Ευρωπαϊκής οδηγίας και φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται ούτε από τον χρόνο παραμονής στερεών ούτε και από τον συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας, αφού κυμαίνεται σχεδόν σταθερά στα 9 mg/L. Επίσης, για SRT = 3, 5, 7 και 10 ημέρες υπάρχει σημαντική υπέρβαση του ορίου του 1 mg/L στη συγκέντρωση αμμωνιακών (σχήμα 6.11). Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η εγκατάσταση λειτουργεί οριακά, πιθανότατα χωρίς προβλήματα ως προς τη συγκέντρωση αμμωνιακών στην εκροή. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως και στη συγκέντρωση ολικού φορτίου αζώτου, η συγκέντρωση της αμμωνίας στην έξοδο, δεν επηρεάζεται από το συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας, αλλά από το χρόνο παραμονής στερεών, το οποίο είναι αναμενόμενο, αφού ο τελευταίος σχετίζεται άμεσα με τις διεργασίες των μικροοργανισμών και κυρίως με την απονιτροποίηση.

Η ίδια πρακτική ανεξαρτησία της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στην εκροή από το συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας παρατηρείται και στο σύστημα MBBR/IFAS (σχήμα 6.10). Ωστόσο, σε αντίθεση με το συμβατικό σύστημα, η εγκατάσταση με το σύστημα MBBR/IFAS παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά τη συγκέντρωση ολικού αζώτου και αμμωνίας στην έξοδο. Πιο αναλυτικά, ακόμα και για χρόνο παραμονής στερεών πέντε ημερών (SRT = 5 d), και τα δύο ποιοτικά χαρακτηριστικά

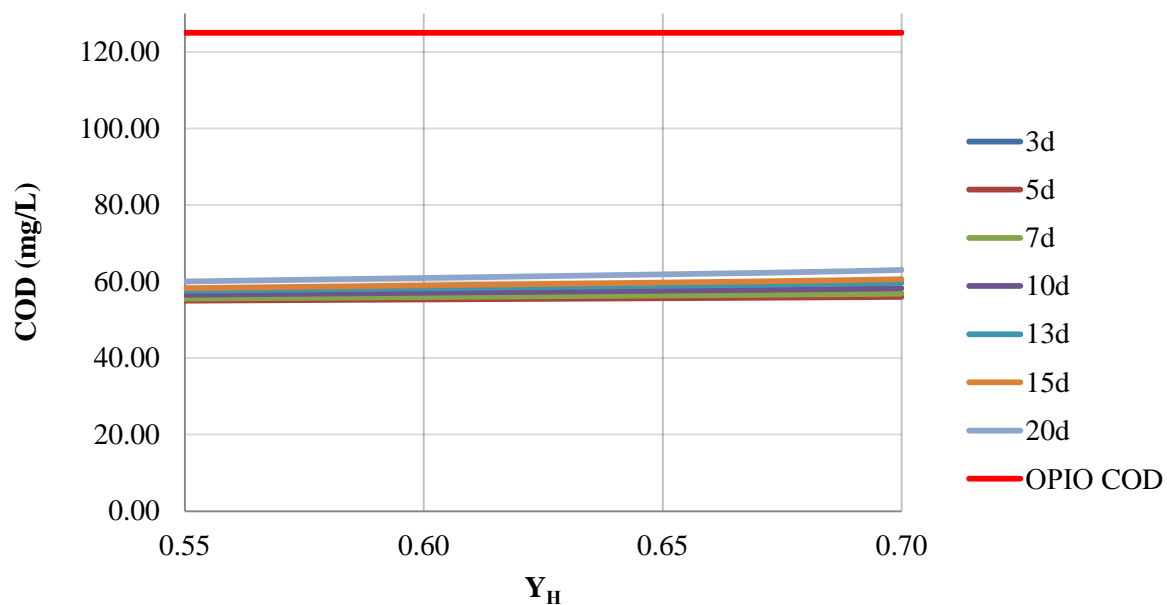
βρίσκονται εντός των θεσμοθετημένων ορίων και συγκεκριμένα, $TN \approx 7.50 \text{ mg/L}$ και $NH_4-N \approx 0.90 \text{ mg/L}$, όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.12. Παρατηρείται λοιπόν ότι τέτοιου είδους συστήματα είναι πρακτικά ανεξάρτητα από το χρόνο παραμονής στερεών, αφού έχουν την ικανότητα απονιτροποίησης, ακόμα και όταν αυτός δεν είναι ιδανικός.



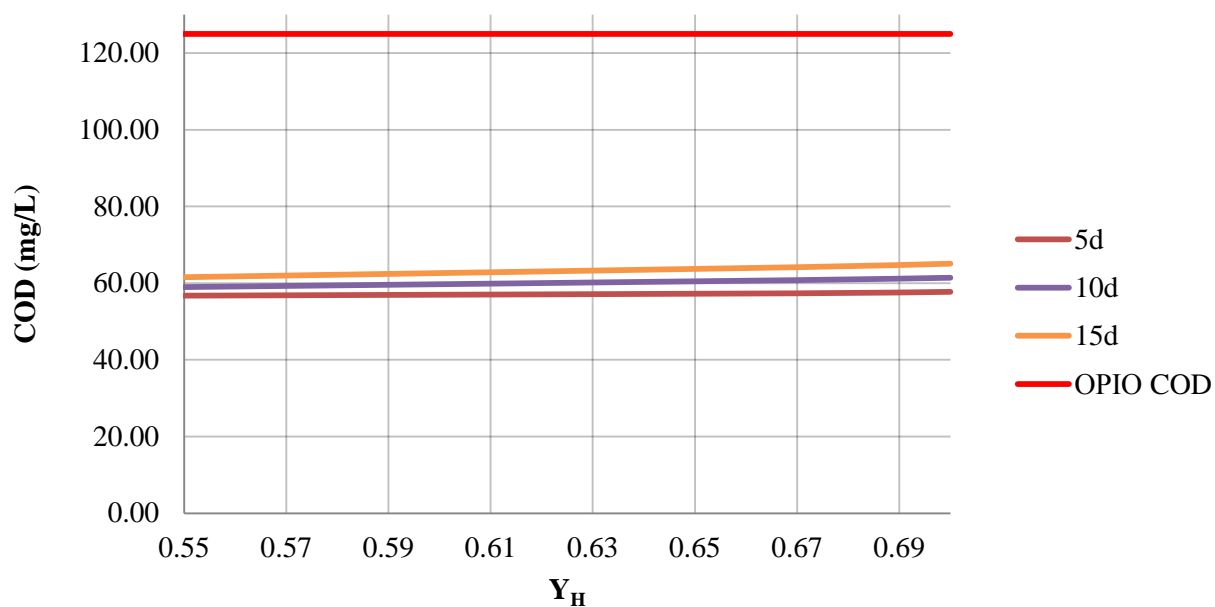
Σχήμα 6.1 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στον αερόβιο αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



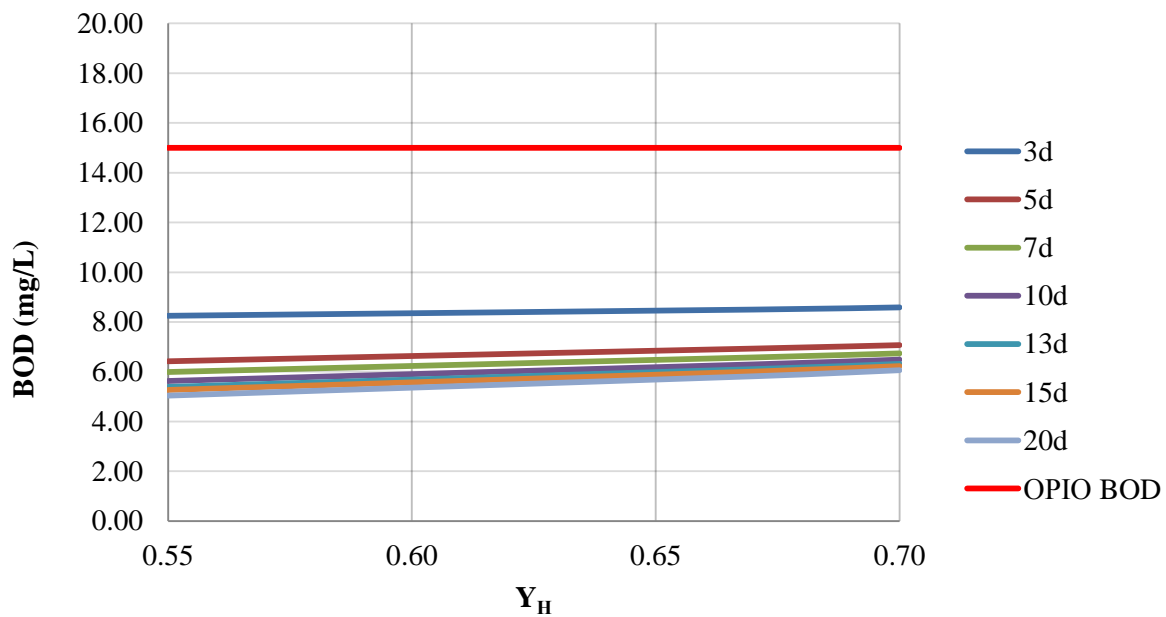
Σχήμα 6.2 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στον αερόβιο αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



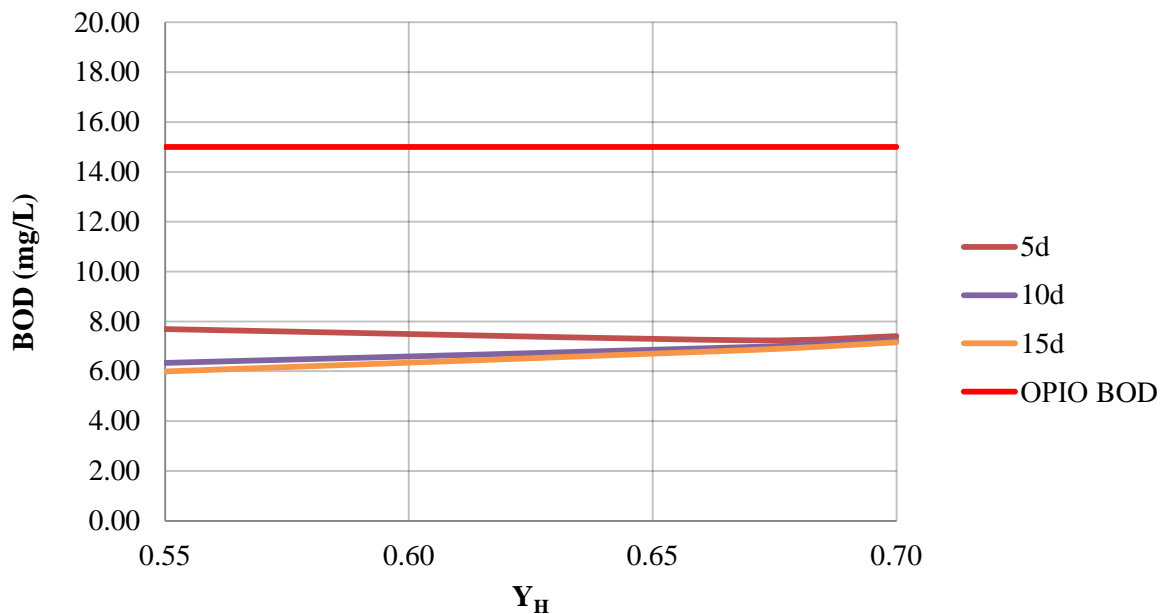
Σχήμα 6.3 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



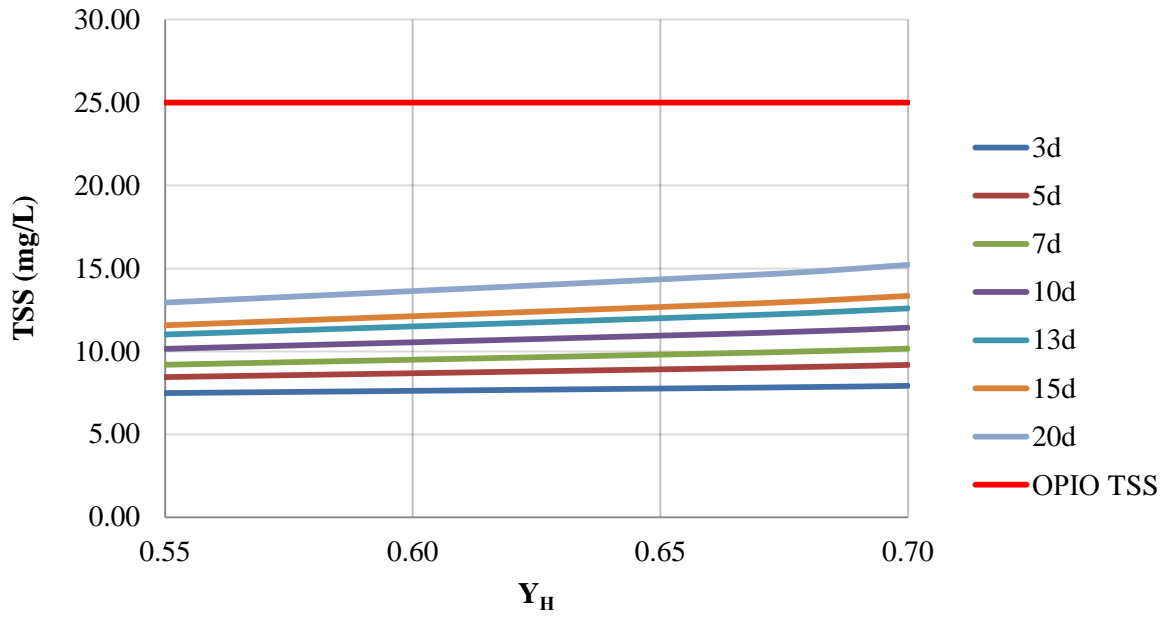
Σχήμα 6.4 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



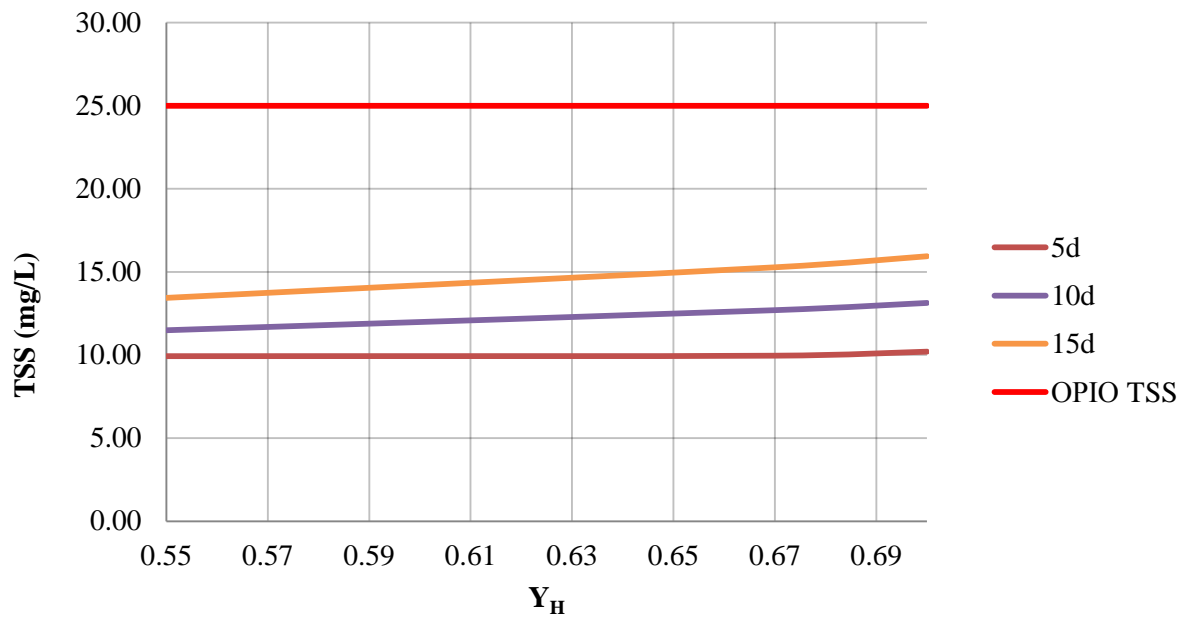
Σχήμα 6.5 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



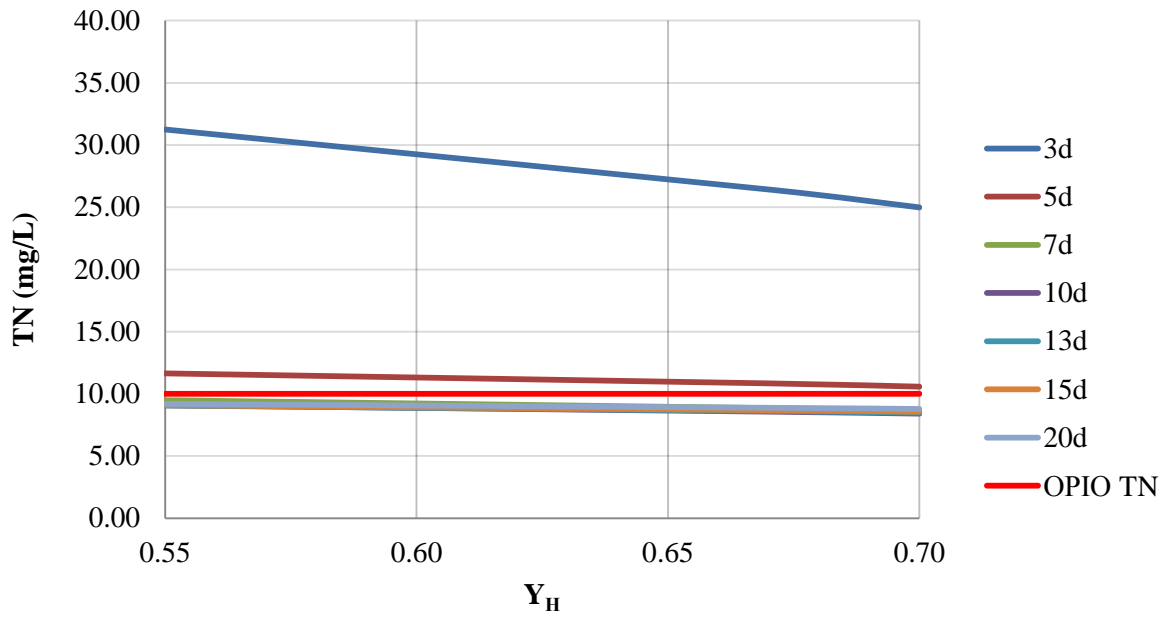
Σχήμα 6.6 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



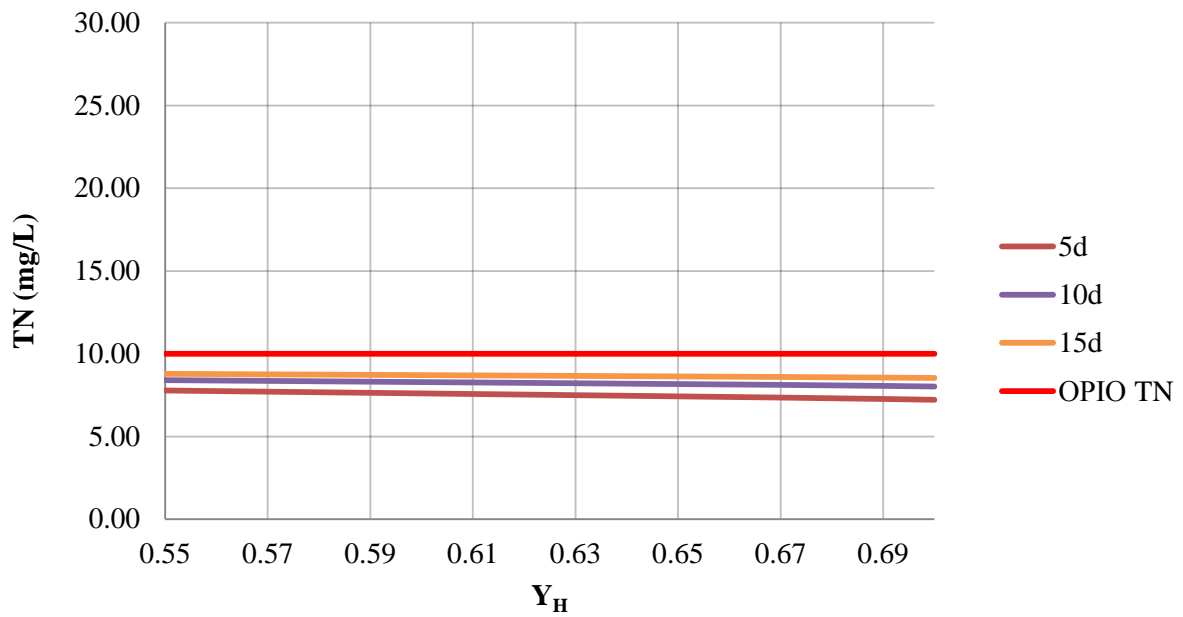
Σχήμα 6.7 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



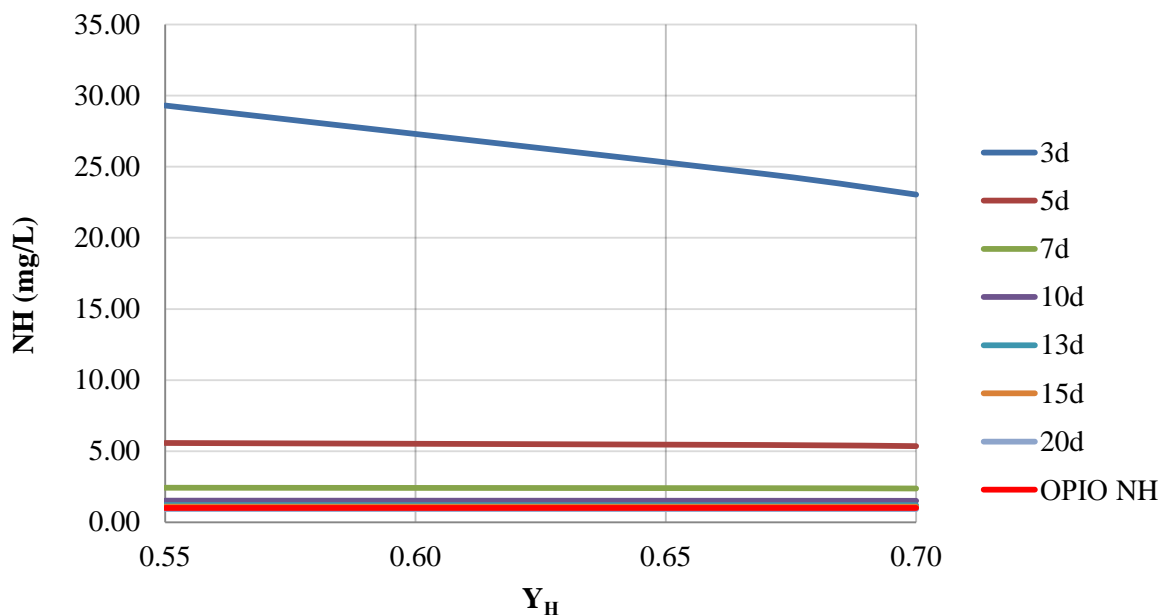
Σχήμα 6.8 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



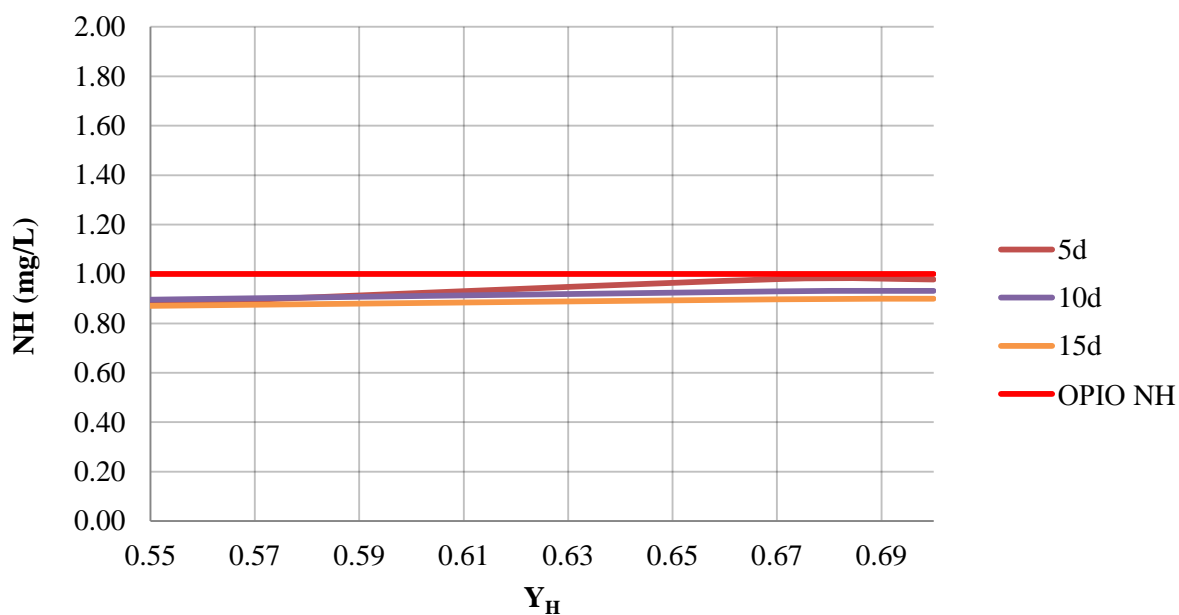
Σχήμα 6.9 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.10 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.11 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.12 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.

6.2 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης των συστημάτων συναρτήσει του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας Y_A

Η αξιολόγηση της ποιοτικής και ποσοτικής επίδρασης του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας Y_A στις εξεταζόμενες παραμέτρους είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω της σπουδαιότητας του ρόλου των αυτοτροφικών μικροοργανισμών στη διεργασία της νιτροποίησης.

MLSS: Σε αντίθεση με το συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικών οργανισμών Y_H , ο συντελεστής Y_A προκαλεί αμελητέα αύξηση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών MLSS στο βιολογικό αντιδραστήρα και των δύο συστημάτων (σχήμα 6.13 και σχήμα 6.14). Αυτό συμβαίνει διότι οι αυτοτροφικοί μ/ο αποτελούν ένα πολύ μικρό μέρος των ολικών αιωρούμενων στερεών. Επίσης, από το σχήμα 6.14, φαίνεται ότι στο σύστημα MBBR/IFAS, η συγκέντρωση των MLSS είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 1000 mg/L σε σχέση με το συμβατικό για τις ίδιες συνθήκες, όπως παρατηρήθηκε και παραπάνω. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών αυξάνει και τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών, ανεξαρτήτως συστήματος.

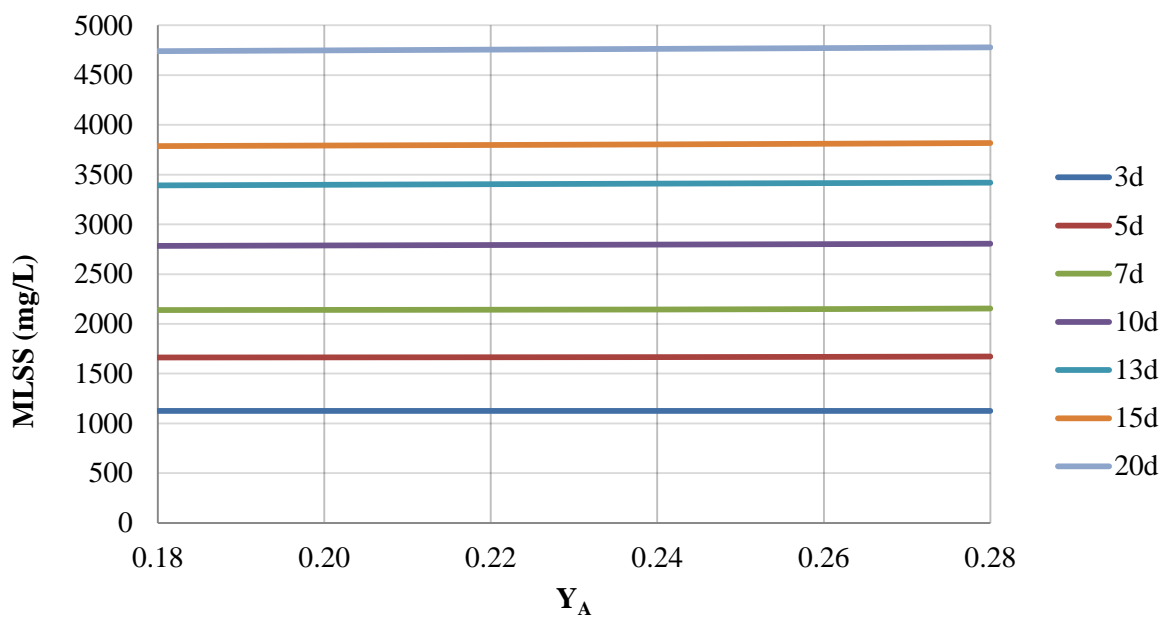
COD: Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, παρατηρείται συμμόρφωση της Ε.Ε.Λ. με τις απαιτήσεις της οδηγίας για τη συγκέντρωση COD στην εκροή, ενώ ο συντελεστής παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας δεν επηρεάζει πρακτικώς τα αποτελέσματα σε κανένα από τα δύο συστήματα (σχήμα 6.15 και σχήμα 6.16).

BOD: Το BOD της εξόδου και στα δύο συστήματα παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητο από τη μεταβολή του συντελεστή ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας και του χρόνου παραμονής στερεών (σχήμα 6.17 και σχήμα 6.18). Απουσία διαφορών παρατηρείται και στις τιμές του ανάμεσα στα δύο συστήματα.

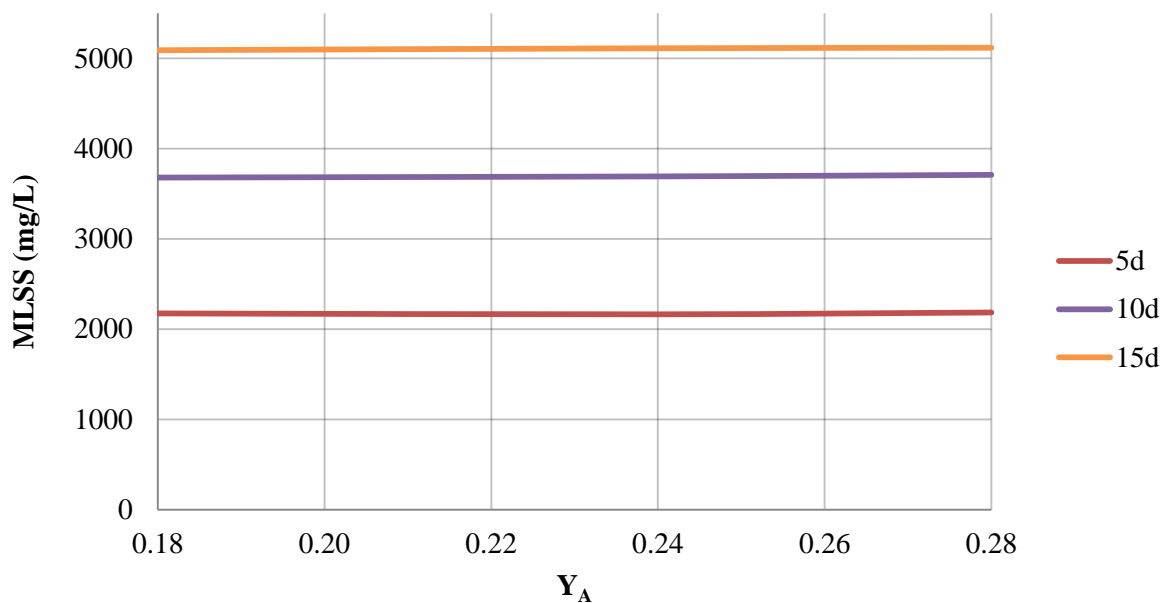
TSS: Από τα σχήματα 6.19 και 6.20, φαίνεται ότι ο συντελεστής παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας Y_A δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή σε κανένα από τα δύο συστήματα. Αντιθέτως, η συγκέντρωση των TSS στην έξοδο εξαρτάται από το χρόνο παραμονής στερεών και αυξάνεται ανάλογα. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι μεταξύ των δύο συστημάτων δεν παρουσιάζονται αξιοσημείωτες διαφορές στις τιμές των TSS.

Άζωτο: Όπως γίνεται φανερό από τα σχήματα 6.21 και 6.23, ο συντελεστής Y_A έχει αμελητέα επίδραση στο ολικό άζωτο της εκροής, με τον χρόνο παραμονής στερεών να καθορίζει ουσιαστικά τη συγκέντρωσή του και στα δύο συστήματα. Παράλληλα, το ίδιο

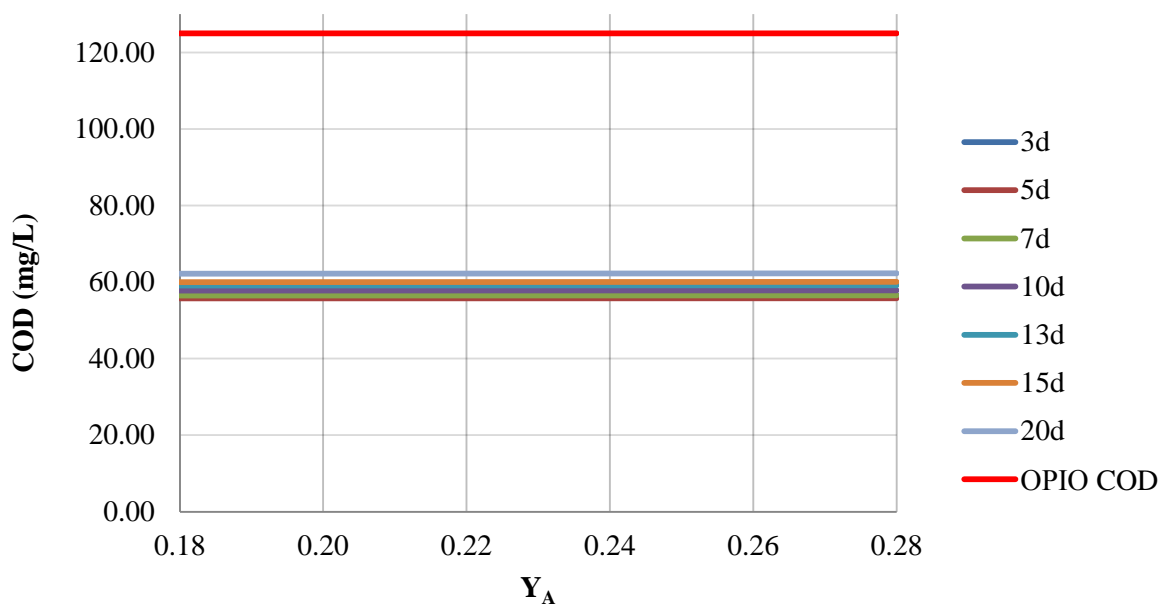
συμπέρασμα εξάγεται και για το αμμωνιακό άζωτο από τα σχήματα 6.22 και 6.24. Ωστόσο, στο συμβατικό σύστημα για $SRT = 3, 5$ και 7 ημέρες παρατηρείται σημαντική υπέρβαση των ορίων της οδηγίας για τη συγκέντρωση των TN και κυρίως του NH στην εκροή, η οποία οφείλεται στην δυσχέρεια των αυτοτροφικών οργανισμών να νιτροποιήσουν. Αντιθέτως, στο σύστημα MBBR/IFAS ακόμα και για χρόνο παραμονής στερεών 5 ημερών, η συγκέντρωση του NH παραμένει κάτω από 1mg/L , λόγω της παρουσίας της επιπλέον βιομάζας που αναπτύσσεται στους βιοφορείς και κάνει εφικτή την απονιτροποίηση.



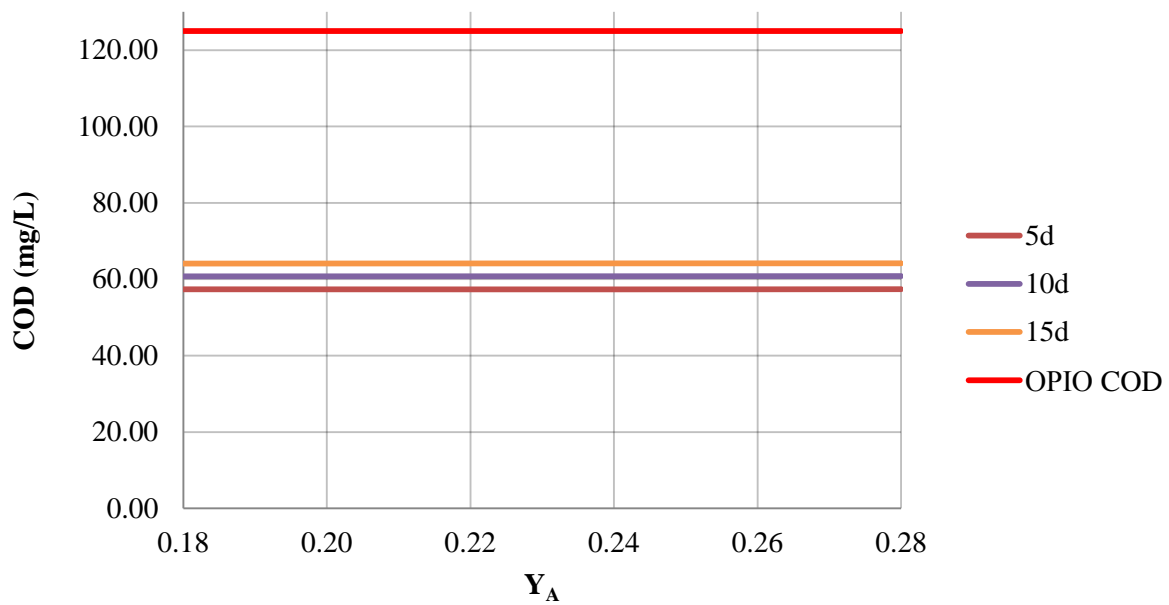
Σχήμα 6.13 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



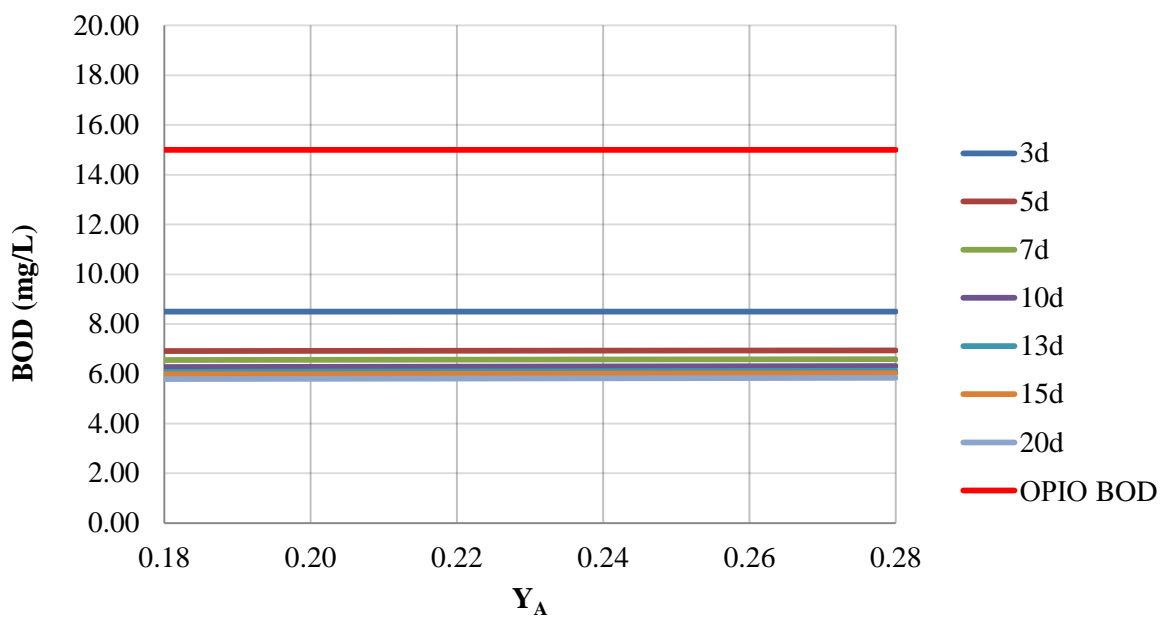
Σχήμα 6.15 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



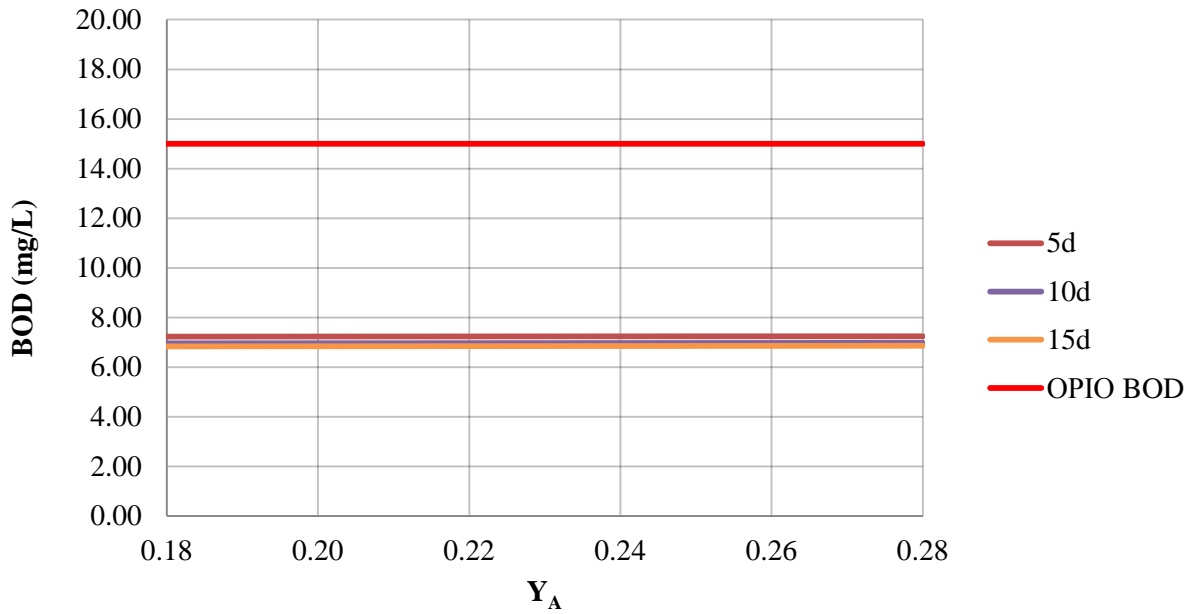
Σχήμα 6.14 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



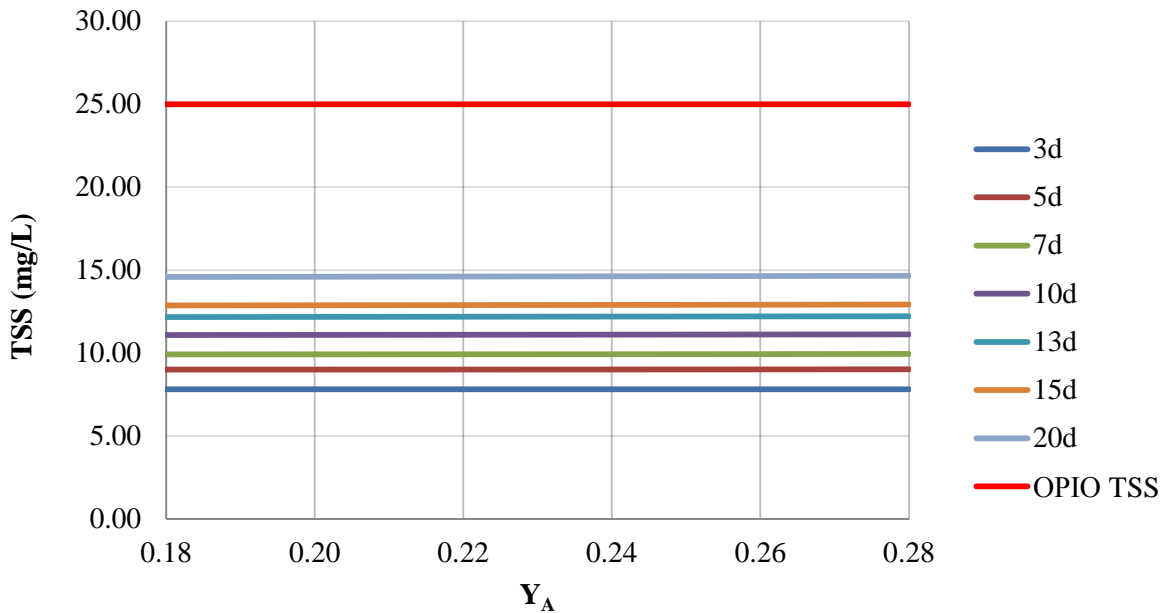
Σχήμα 6.16 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



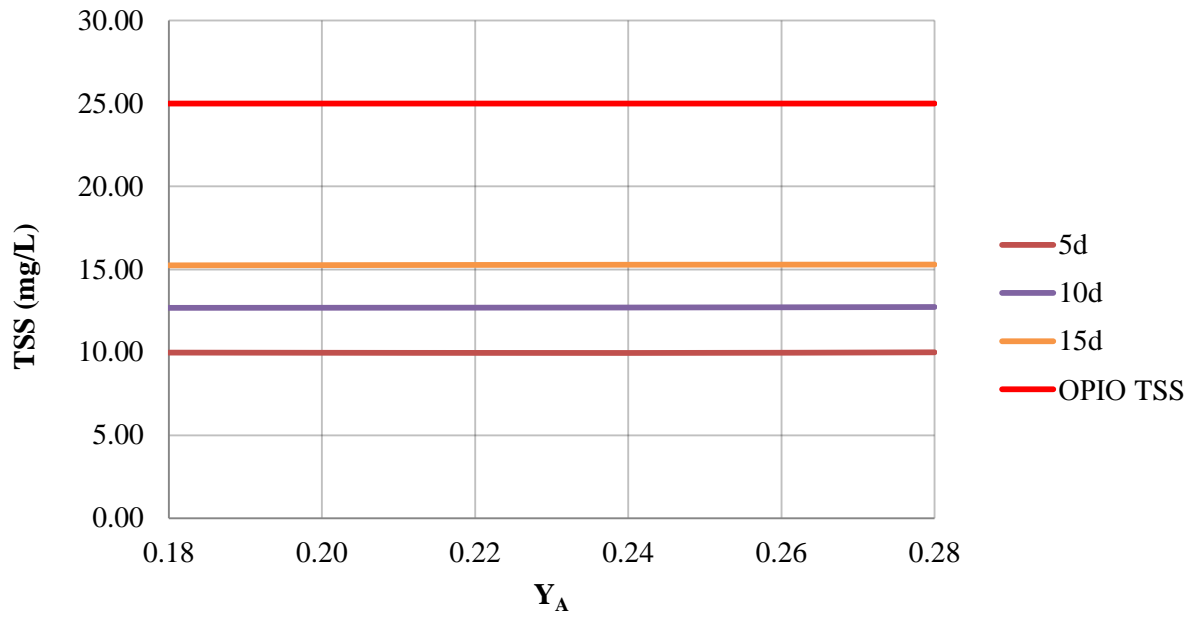
Σχήμα 6.17 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



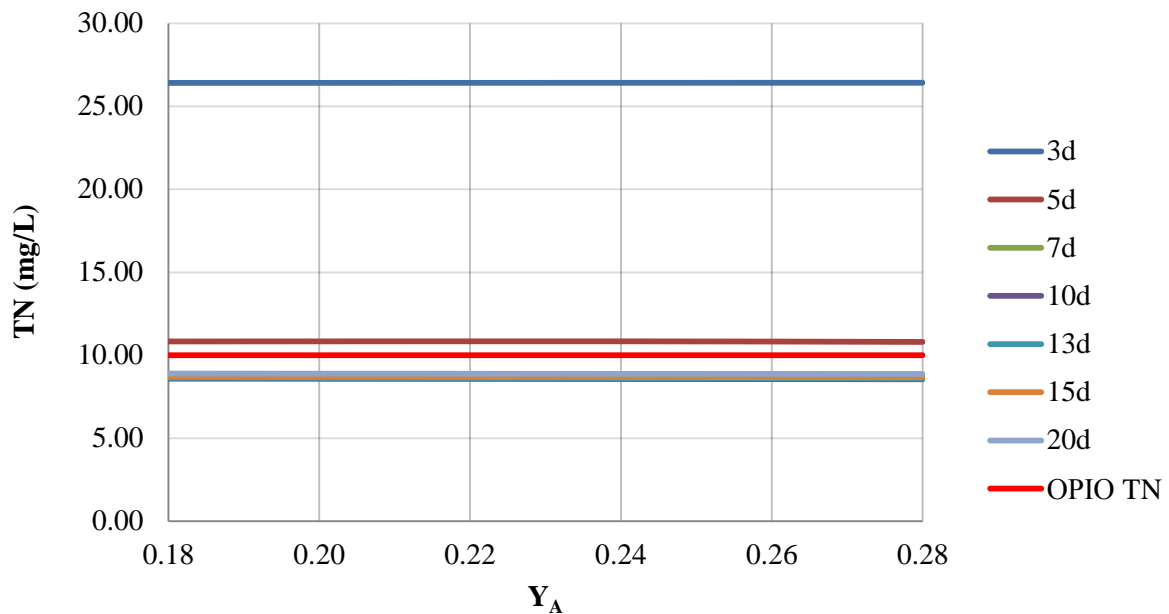
Σχήμα 6.18 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



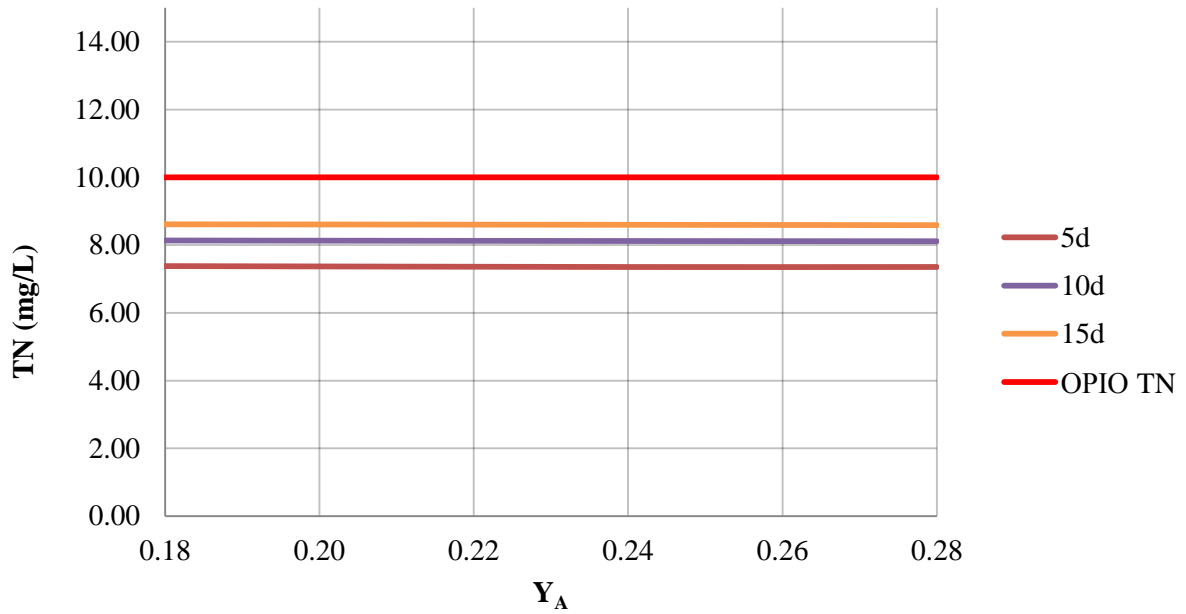
Σχήμα 6.19 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



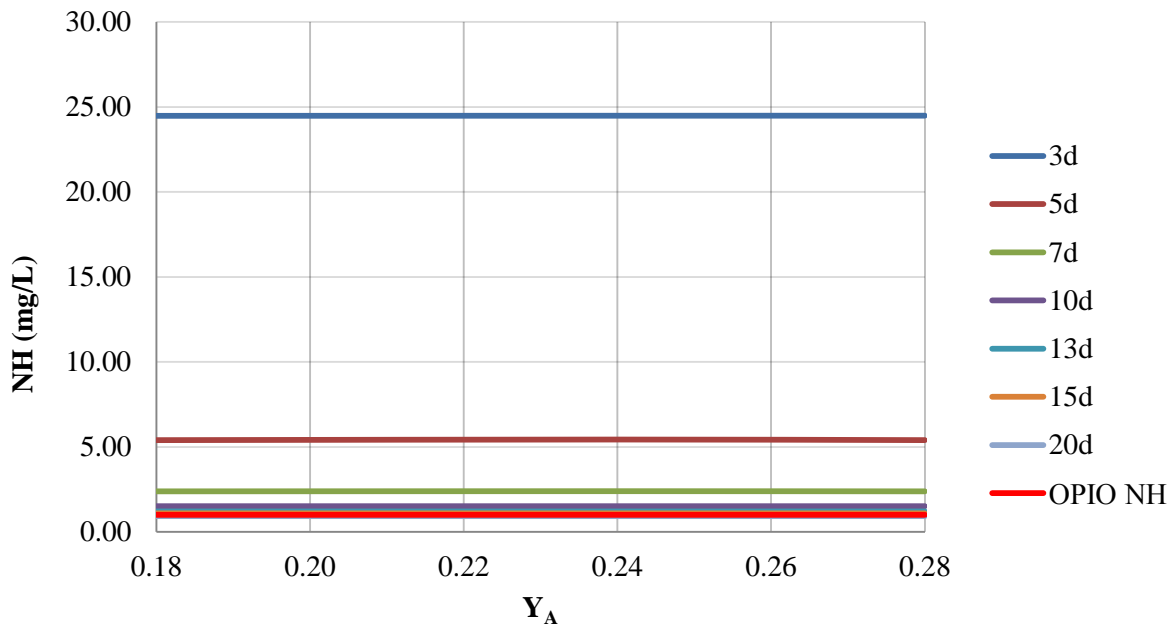
Σχήμα 6.20 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



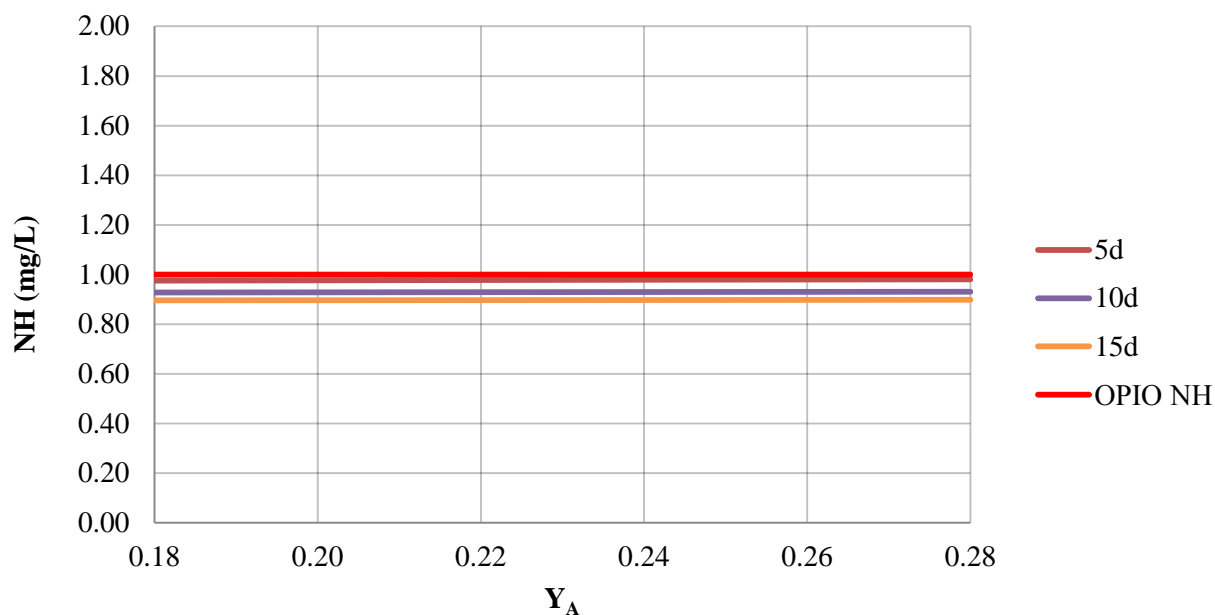
Σχήμα 6.21 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.22 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.23 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.24 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.

6.3 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης των συστημάτων συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας μ_{maxH}

Ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας (μ_{maxH}) είναι μια στοιχειομετρική παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου μέσω της διεργασίας της ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες.

MLSS: Σύμφωνα με τα σχήματα 6.25 και 6.26, συμπεραίνεται ότι η συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στη δεξαμενή είναι ανεξάρτητη του μ_{maxH} και στα δύο συστήματα. Επιπλέον, όπως παρατηρήθηκε και στην ανάλυση των δύο προηγούμενων παραμέτρων, στο σύστημα MBBR/IFAS η συγκέντρωση των MLSS είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 1000 mg/L σε σχέση με το συμβατικό για τις ίδιες συνθήκες.

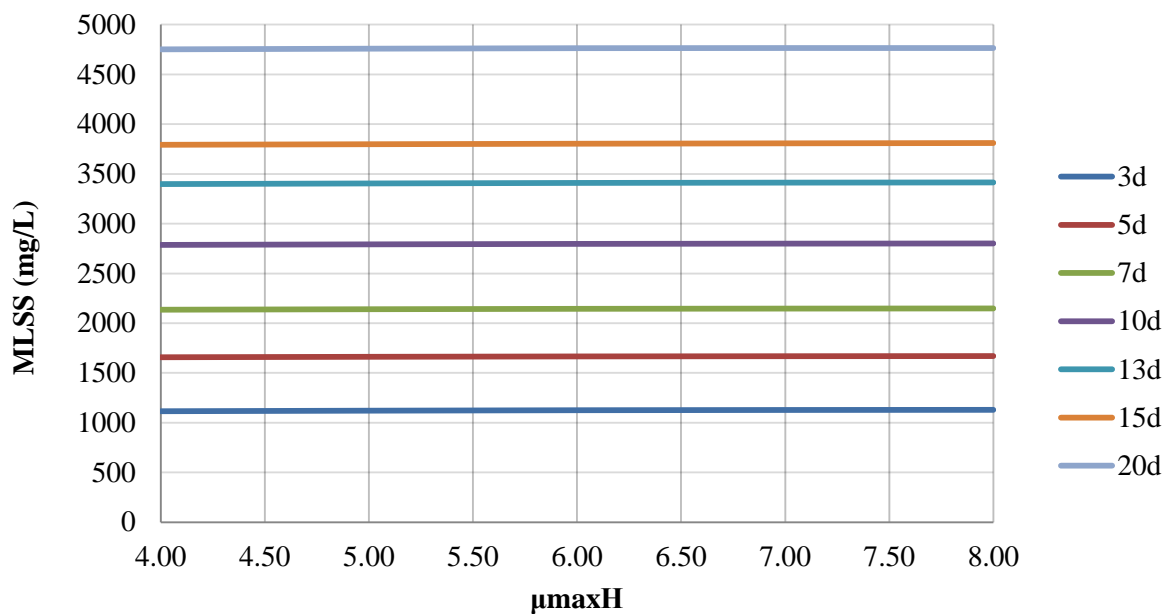
COD: Από τα σχήματα 6.27 και 6.28 φαίνεται ότι η αύξηση του συντελεστή μ_{maxH} μειώνει τη συγκέντρωση του COD στην έξοδο της εγκατάστασης, ενώ με την αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών αυξάνεται και αυτή. Παρατηρείται ότι η συγκέντρωσή του στο σύστημα MBBR/IFAS είναι εμφανώς μεγαλύτερη σε σχέση με το αντίστοιχο συμβατικό.

BOD: Ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας επηρεάζει τη συγκέντρωση του BOD στην εκροή (σχήματα 6.29 και 6.30) για τους δεδομένους χρόνους παραμονής στερεών και στα δύο συστήματα. Αναλυτικότητα, η αύξηση του συντελεστή μ_{maxH} μειώνει το BOD και, όπως φαίνεται και στα σχήματα, η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη για μεταβολή της τιμής της παραμέτρου από 4 1/d σε 6 1/d (πιο απότομη κλίση καμπύλης). Επίσης, παρατηρείται ότι στο σύστημα MBBR/IFAS η συγκέντρωση του είναι αυξημένη σε σχέση με το συμβατικό.

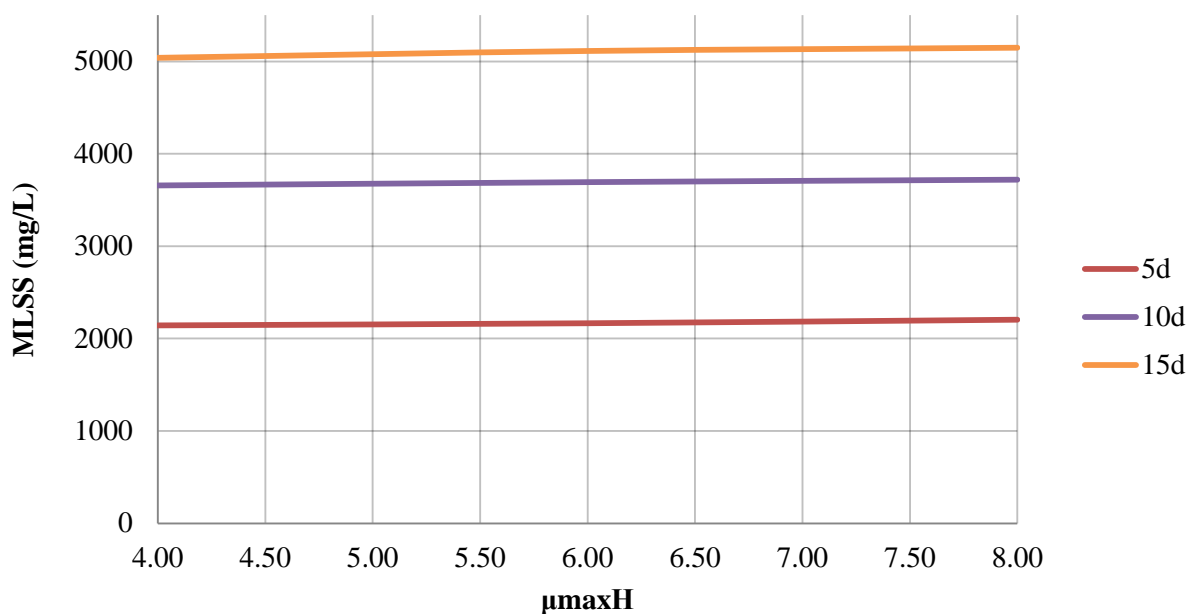
TSS: Ο συντελεστής μ_{maxH} δεν έχει καμία απολύτως επίδραση στη συγκέντρωση των ολικών στερεών της εξόδου, τα οποία επηρεάζονται μόνο από το χρόνο παραμονής στερεών (σχήμα 6.31 και σχήμα 6.32). Συγκεκριμένα, αύξηση του SRT προκαλεί αύξηση της συγκέντρωσης των TSS και, συγκρίνοντας τα δύο συστήματα, γίνεται φανερό ότι στο MBBR/IFAS η συγκέντρωση είναι αυξημένη κατά 1 – 3 mg/L.

Άζωτο: Στο συμβατικό σύστημα, για χρόνο παραμονής στερεών τριών, πέντε, επτά και 10 ημερών, παρατηρείται ουσιαστικά αδυναμία απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου, ενώ για όλους τους άλλους χρόνους παραμονής, η εγκατάσταση βρίσκεται οριακά εντός των ορίων, σύμφωνα με τα στοιχεία του σχήματος 6.35. Όσον αφορά το ολικό άζωτο, το συμβατικό σύστημα αστοχεί για $SRT \leq 7$ ημερών (σχήμα 6.33). Αντίθετα, από τα σχήματα 6.34 και 6.36, φαίνεται ότι το σύστημα MBBR/IFAS ανταποκρίνεται καλύτερα στις αλλαγές του συντελεστή μ_{maxH} , αφού το TN βρίσκεται, για κάθε σενάριο, εντός των ορίων. Παρόμοια συμπεριφορά έχει και το αμμωνιακό άζωτο, το οποίο για οποιοδήποτε SRT και για $\mu_{maxH} \geq 6 \text{ d}^{-1}$ έχει τιμή μικρότερη του 1 mg/L.

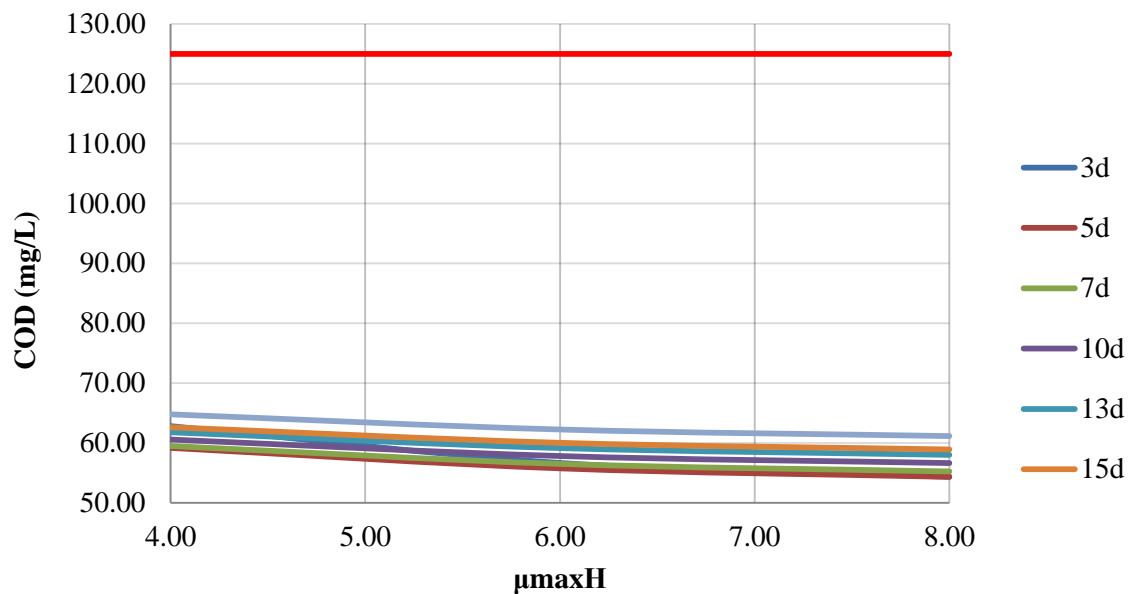
Όλες οι συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων παραμέτρων βρίσκονται εντός των θεσμοθετημένων ορίων, εκτός από τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.



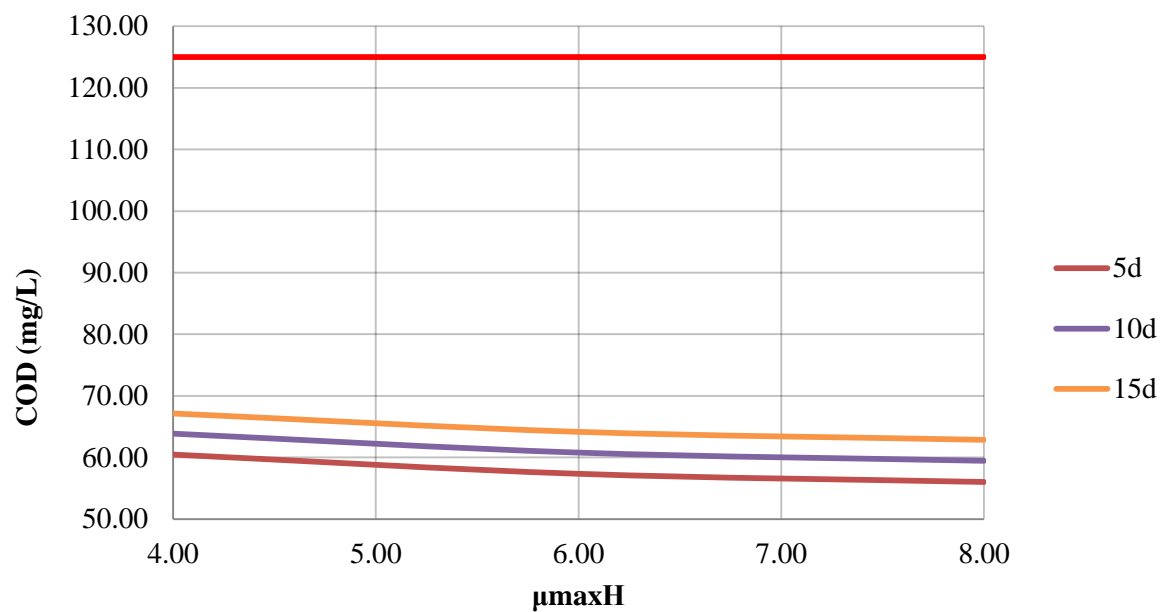
Σχήμα 6.25 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



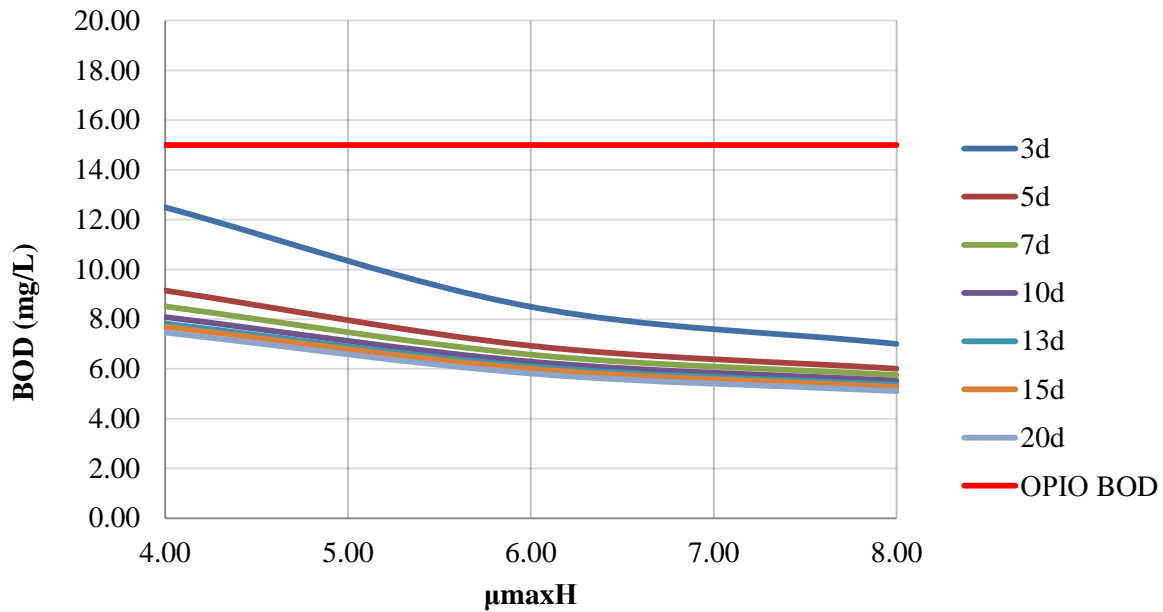
Σχήμα 6.26 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



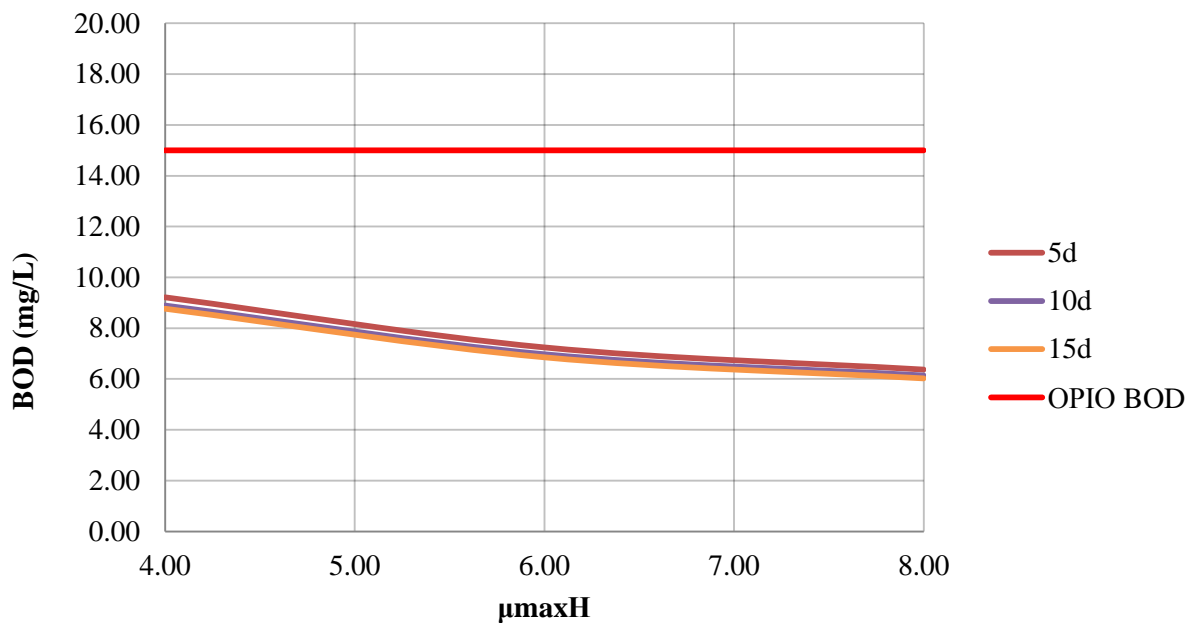
Σχήμα 6.27 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



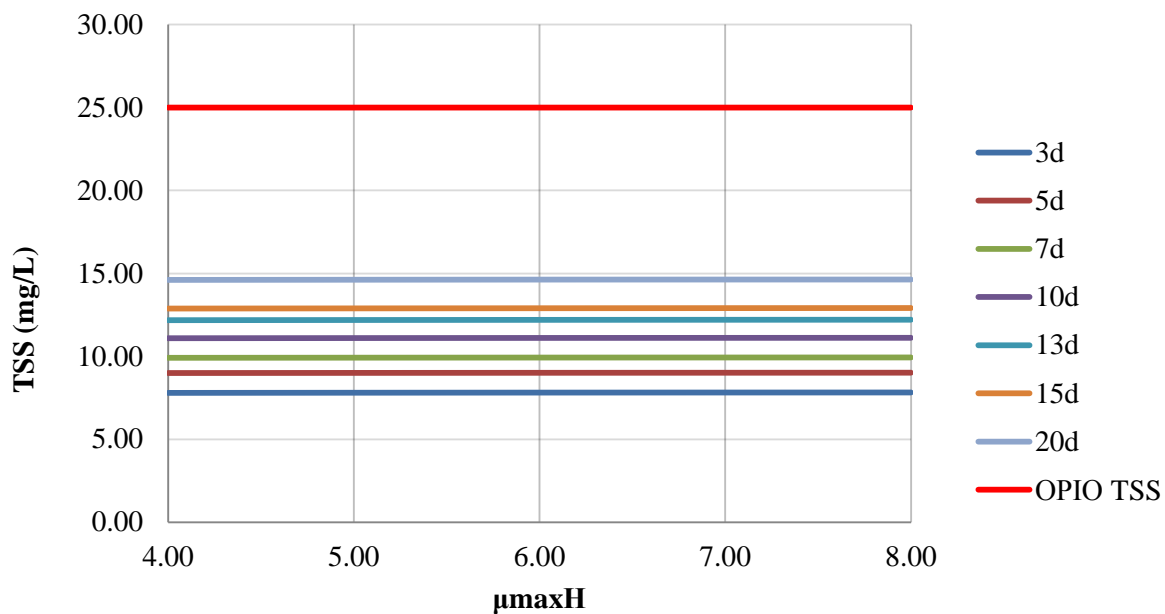
Σχήμα 6.28 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



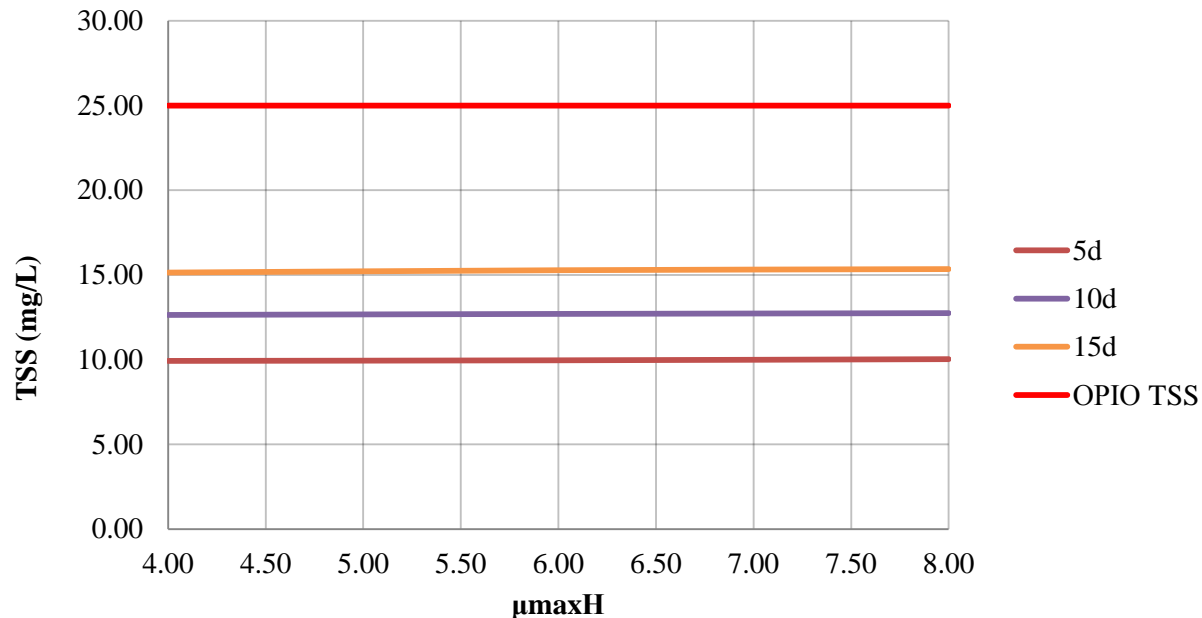
Σχήμα 6.29 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



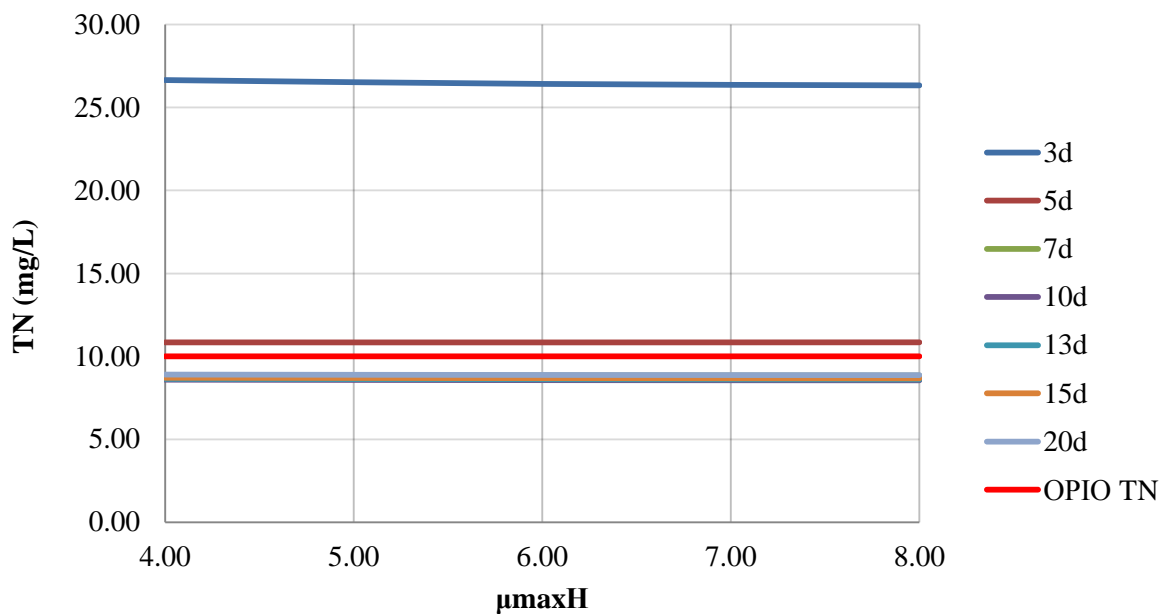
Σχήμα 6.30 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



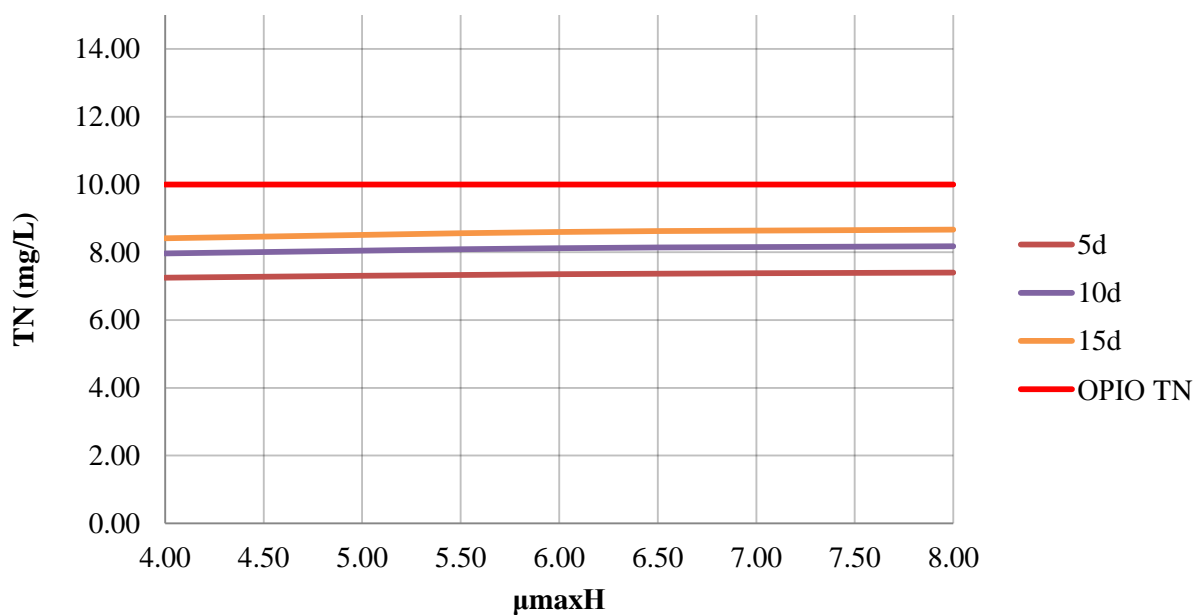
Σχήμα 6.31 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



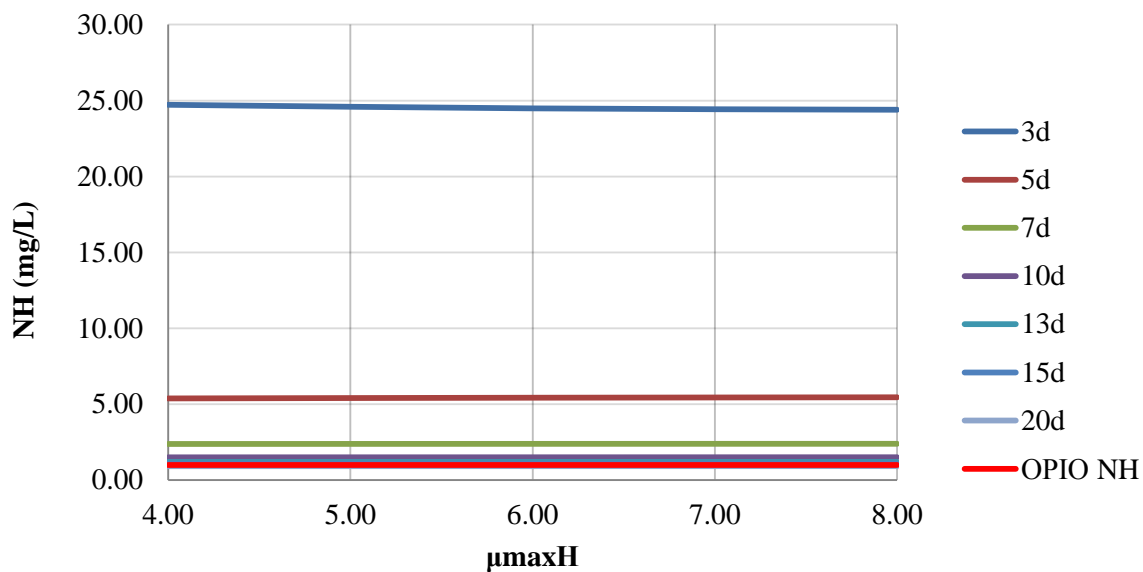
Σχήμα 6.32 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας



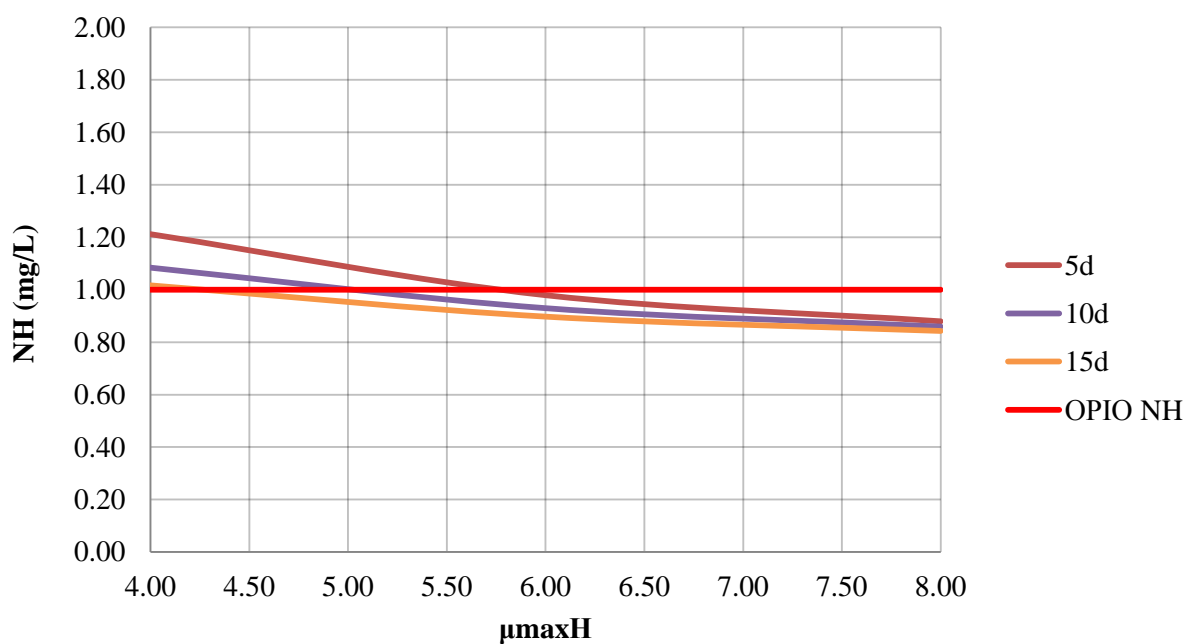
Σχήμα 6.33 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.34 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.35 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.36 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.

6.4 Παρουσίαση και σχολιασμός της απόκρισης των συστημάτων συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας μ_{maxA}

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_{maxA} 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.

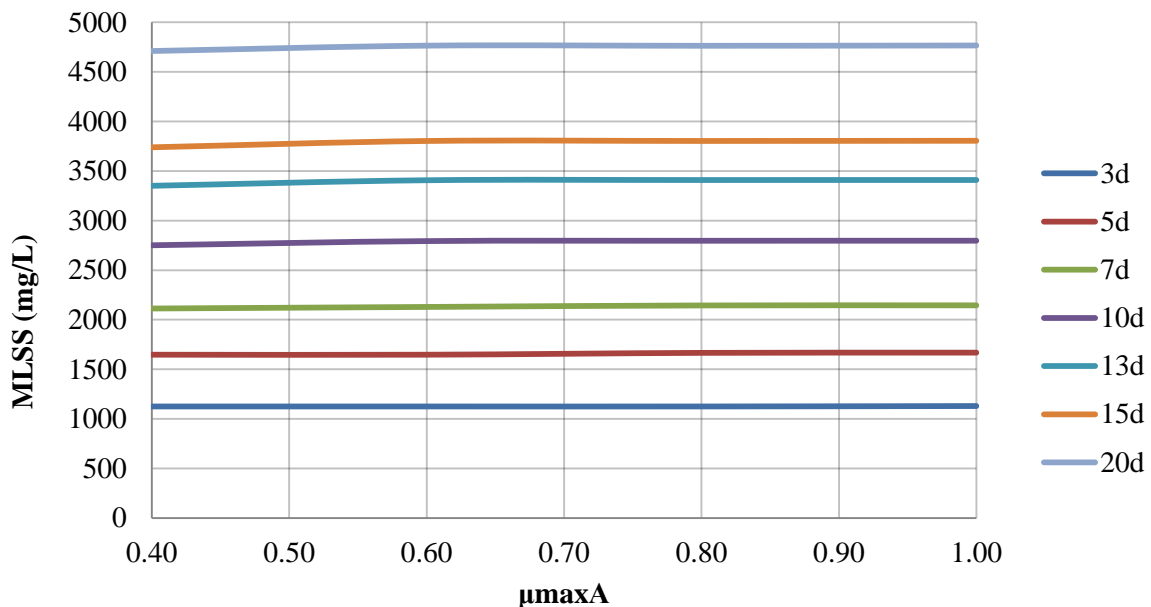
MLSS: Τα σχήματα 6.37 και 6.38 δείχνουν ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα και των δύο συστημάτων, σε σχέση με το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών μ_{maxA} , καθώς και σε σχέση με το χρόνο παραμονής στερεών.

COD: Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, η Ε.Ε.Λ. βρίσκεται εντός των ορίων της οδηγίας, αναφορικά με τη συγκέντρωση του COD στην εκροή (σχήμα 6.39 και σχήμα 6.40). Επίσης, παρατηρείται ότι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας δεν επηρεάζει τη συγκέντρωση του COD, αν και διαφορές εμφανίζονται με την αύξηση του SRT, καθώς και μεταξύ των δύο συστημάτων. Συγκεκριμένα, η αύξηση του χρόνου παραμονής στερεών προκαλεί αύξηση και στη συγκέντρωσή του, ενώ η προσκολλημένη βιομάζα των βιοφορέων του συστήματος MBBR/IFAS, αυξάνει αυτή τη συγκέντρωση ακόμα και κατά 4 mg/L σε σχέση με το συμβατικό.

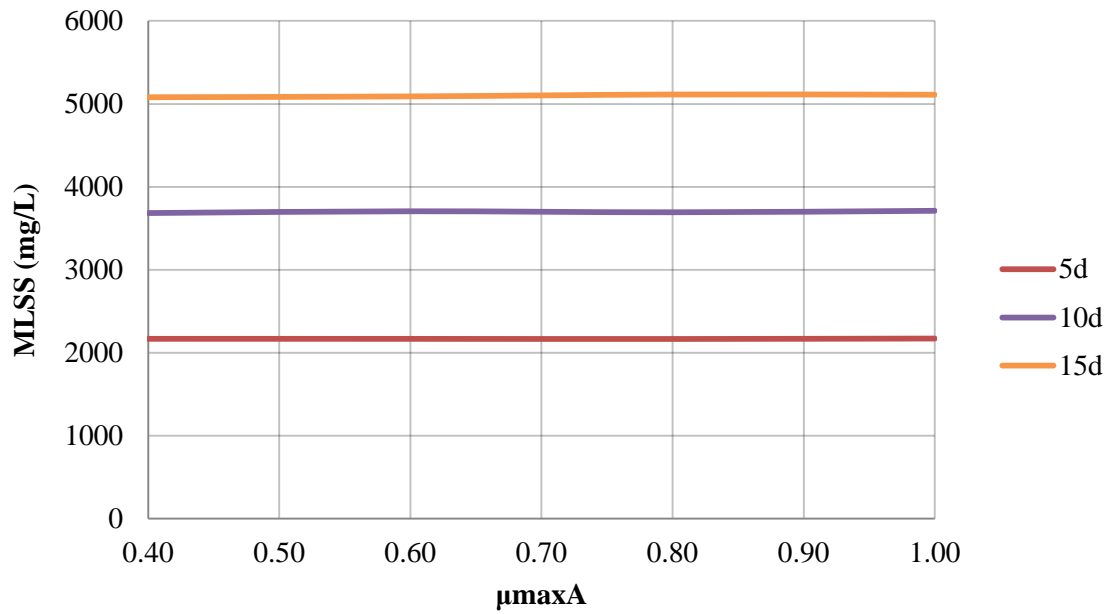
BOD: Ο συντελεστής μ_{maxA} έχει μηδαμινή επίδραση στη συγκέντρωση του BOD στην εκροή. Επίσης, ανάμεσα στα δύο συστήματα δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές στις τιμές του (σχήματα 6.41 και 6.42).

TSS: Και στα δύο συστήματα, παρατηρείται πρακτική ανεξαρτησία ανάμεσα στο συντελεστή μ_{maxA} και στη συγκέντρωση των ολικών στερεών στην εκροή (σχήματα 6.43 και 6.44). Συγκρίνοντας τα δύο συστήματα, γίνεται φανερό ότι στο MBBR/IFAS η συγκέντρωσή τους είναι αυξημένη περίπου κατά 1-3 mg/L για τον ίδιο χρόνο παραμονής στερεών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, η Ε.Ε.Λ. βρίσκεται εντός των ορίων της οδηγίας σχετικά με τη συγκέντρωση των TSS στην έξοδο.

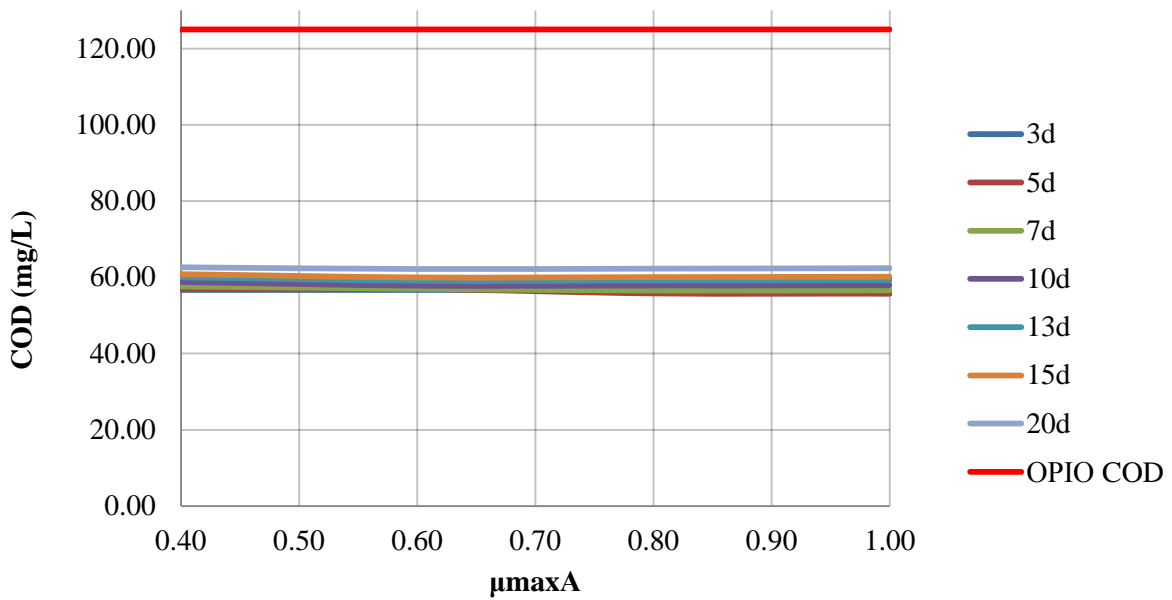
Άζωτο: Το συμβατικό σύστημα λειτουργεί εντός των ορίων της οδηγίας ως προς την συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή για χρόνους παραμονής στερεών μεγαλύτερους των πέντε ημερών και για μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης αυτοτροφικής βιομάζας μεγαλύτερο ή ίσο με 0.8 d^{-1} (σχήμα 6.45). Επίσης, παρατηρείται ότι ακόμα και για $\text{SRT} = 20 \text{ d}$, η εγκατάσταση δεν μπορεί να λειτουργήσει, όταν ο συντελεστής μ_{maxA} είναι μικρότερος από 0.5 d^{-1} , γεγονός που υποδηλώνει τη σπουδαιότητα του στην πραγματοποίηση των διεργασιών της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης. Ομοίως, από το σχήμα 6.47, προκύπτει πως για $\mu_{\text{maxA}} \geq 0.8 \text{ d}^{-1}$ και $\text{SRT} \geq 10 \text{ d}$, η εγκατάσταση συμμορφώνεται με τη συμβατική απαίτηση για συγκέντρωση αμμωνιακών στην εκροή μικρότερη ή ίση του 1 mg/L . Όπως φαίνεται από τα σχήματα 6.46 και 6.48, το σύστημα MBBR/IFAS έχει καλύτερη απόκριση από το συμβατικό σε μικρούς χρόνους παραμονής στερεών και δυσμενείς τιμές του συντελεστή μ_{maxA} , αφού λειτουργεί ικανοποιητικά για $\text{SRT} \geq 5 \text{ d}$ και $\mu_{\text{maxA}} \geq 0.6 \text{ d}^{-1}$, διατηρώντας τις τιμές του ολικού και αμμωνιακού αζώτου εντός των θεσμοθετημένων ορίων.



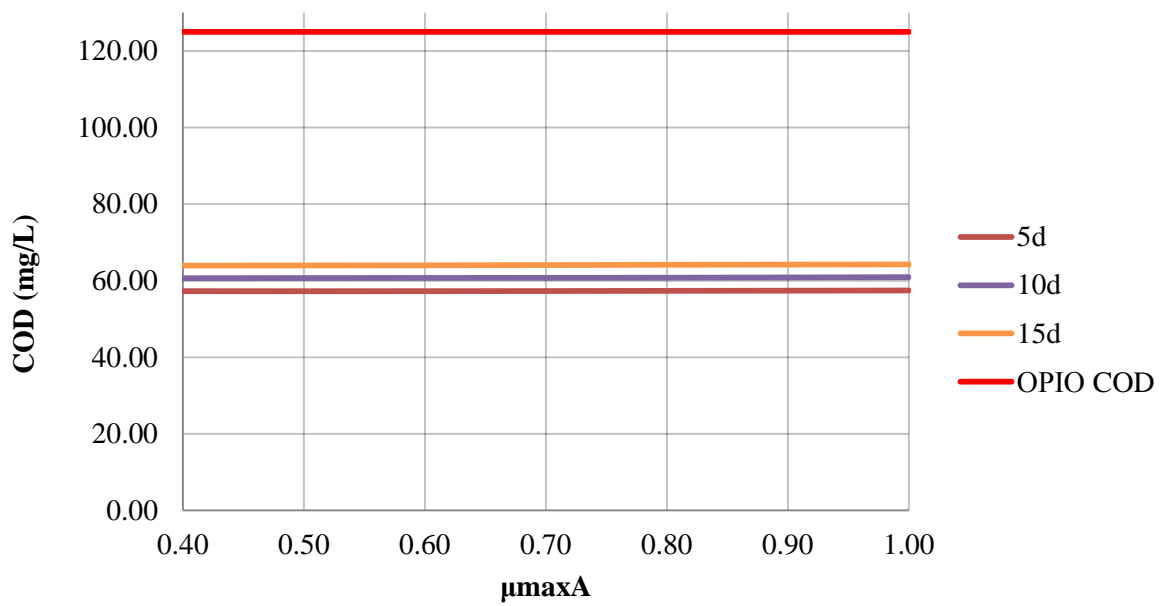
Σχήμα 6.37 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.



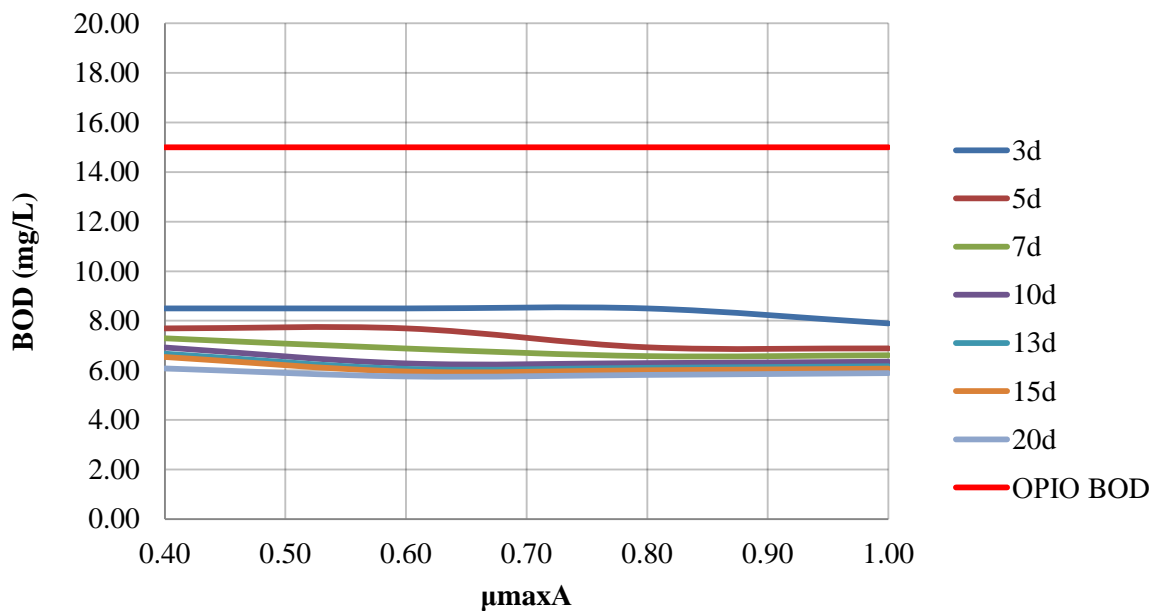
Σχήμα 6.38 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.



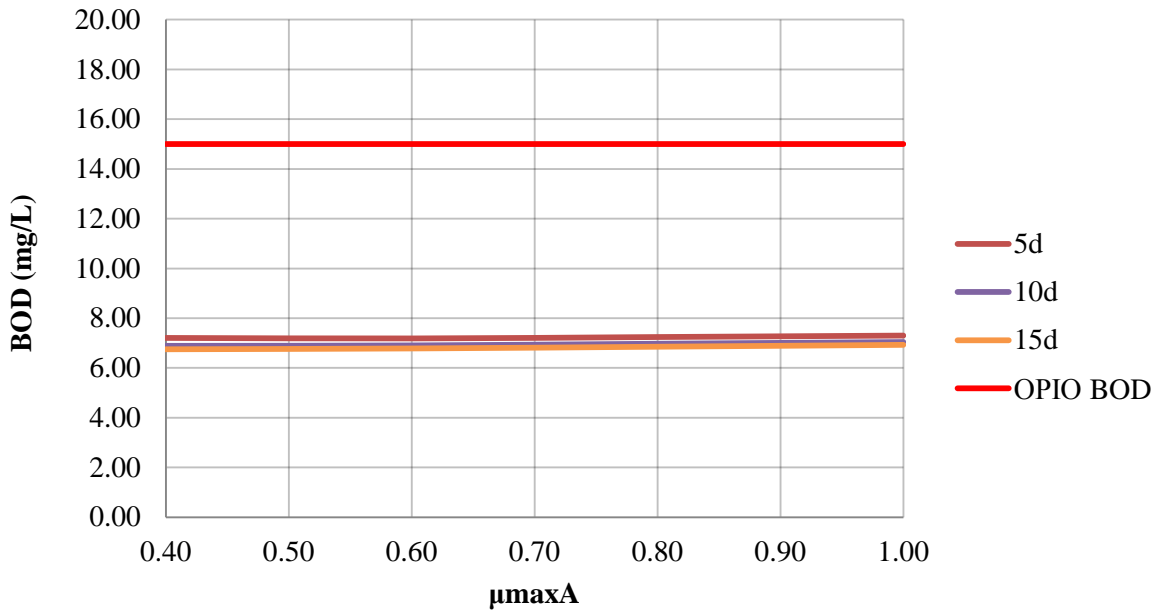
Σχήμα 6.39 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.



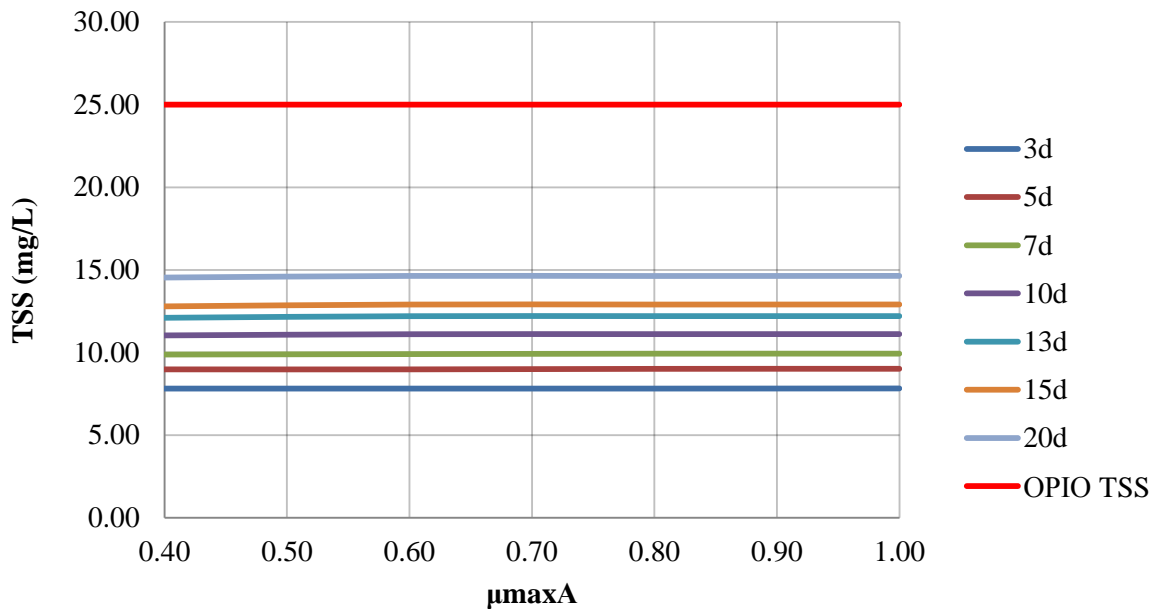
Σχήμα 6.40 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



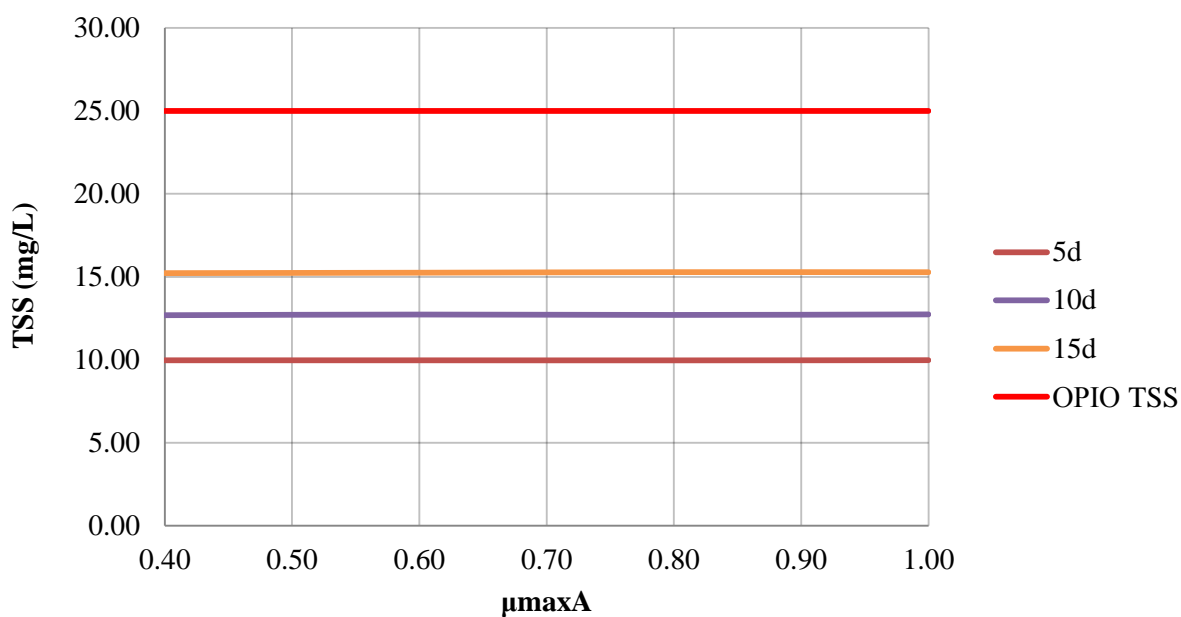
Σχήμα 6.41 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.



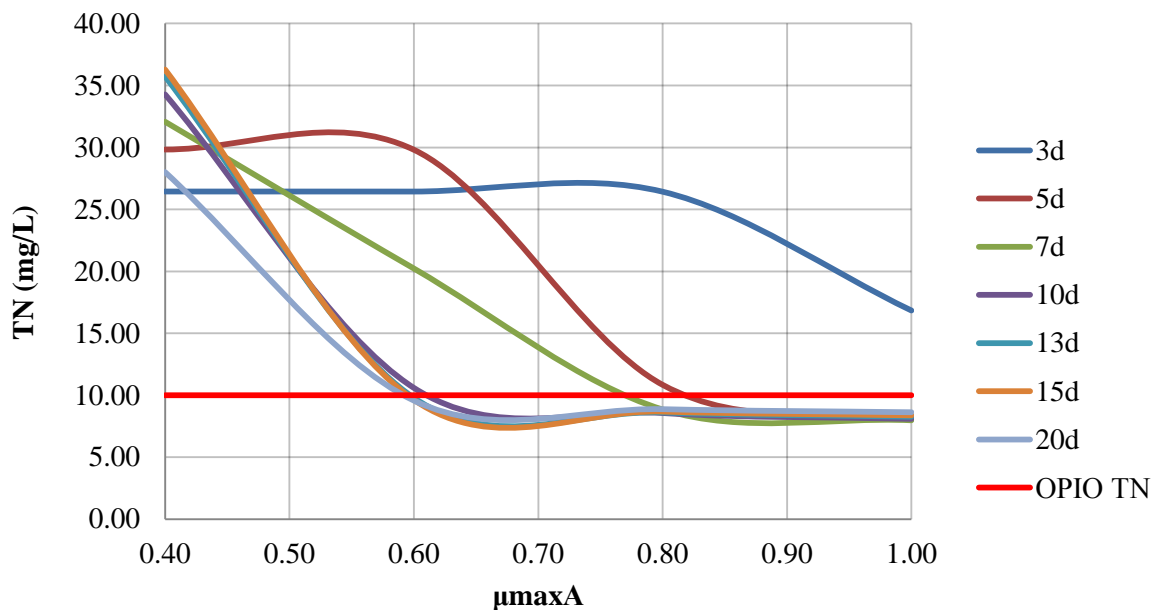
Σχήμα 6.42 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



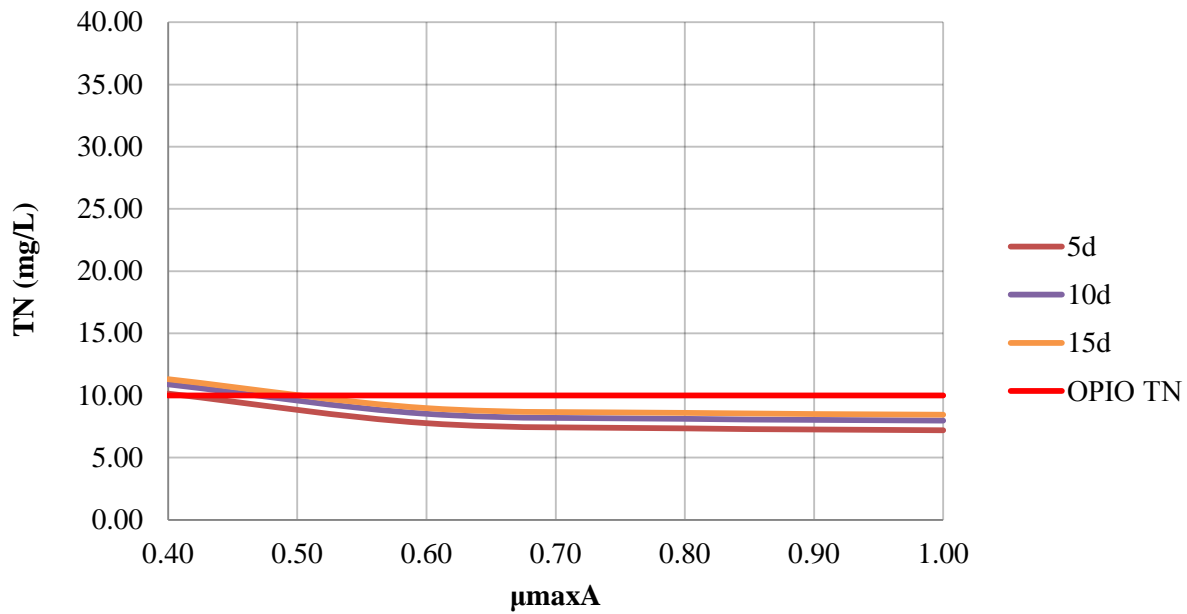
Σχήμα 6.43 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.



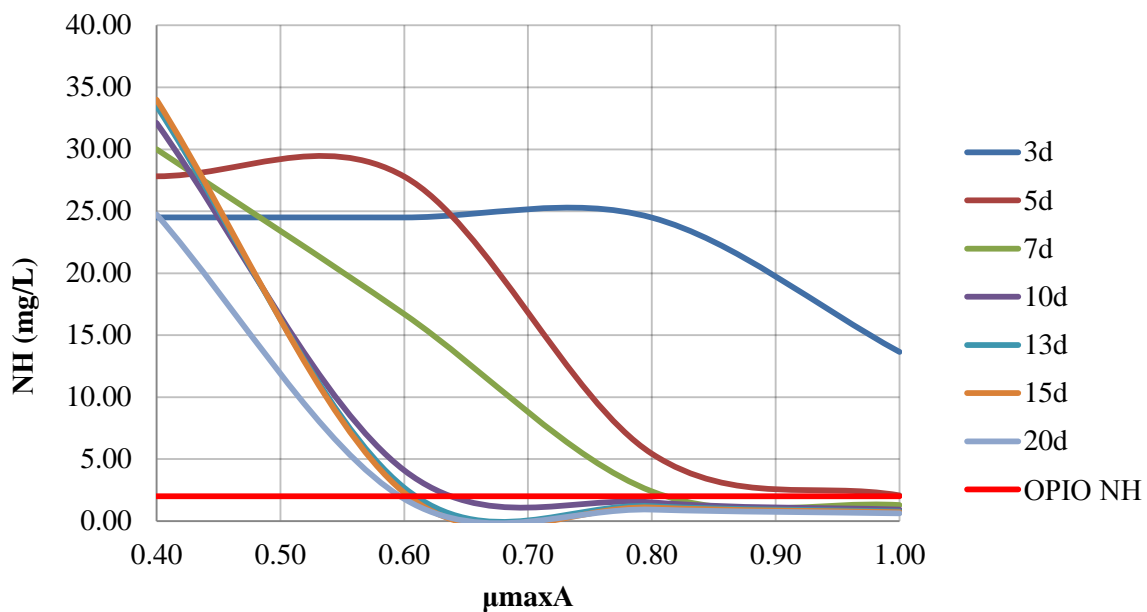
Σχήμα 6.44 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



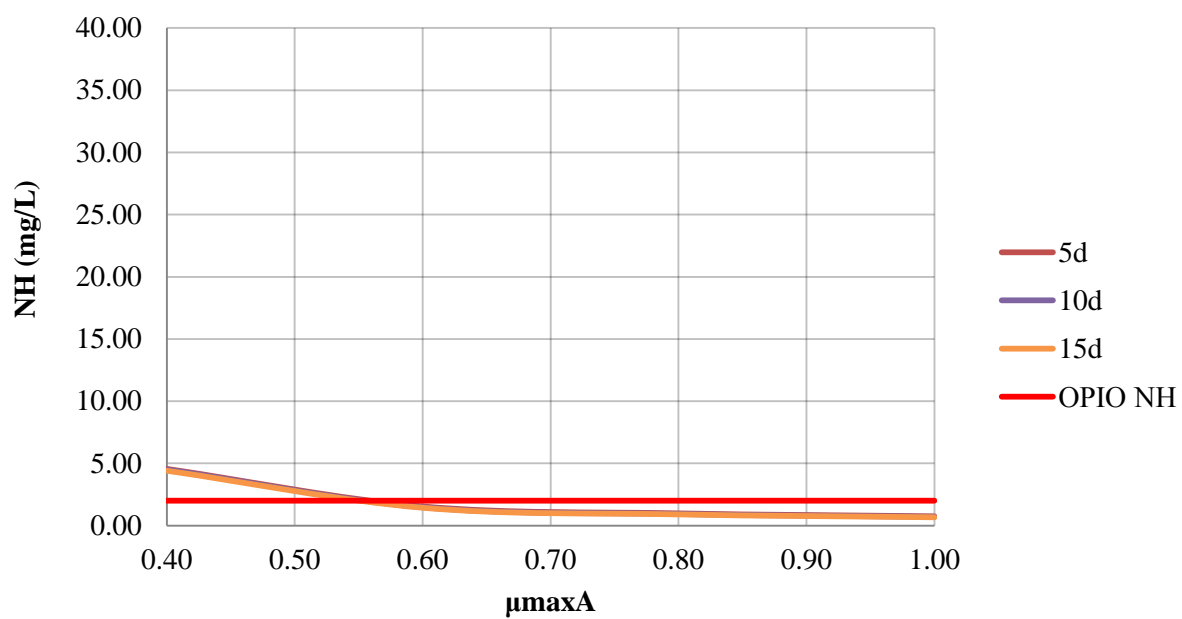
Σχήμα 6.45 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.46 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας



Σχήμα 6.47 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συμβατικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

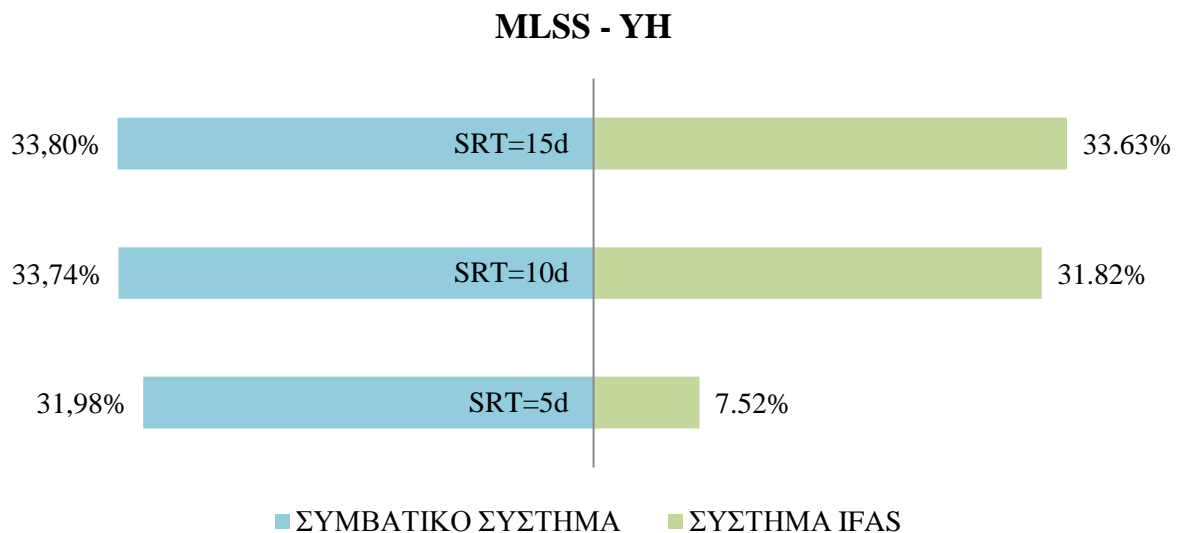


Σχήμα 6.48 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας

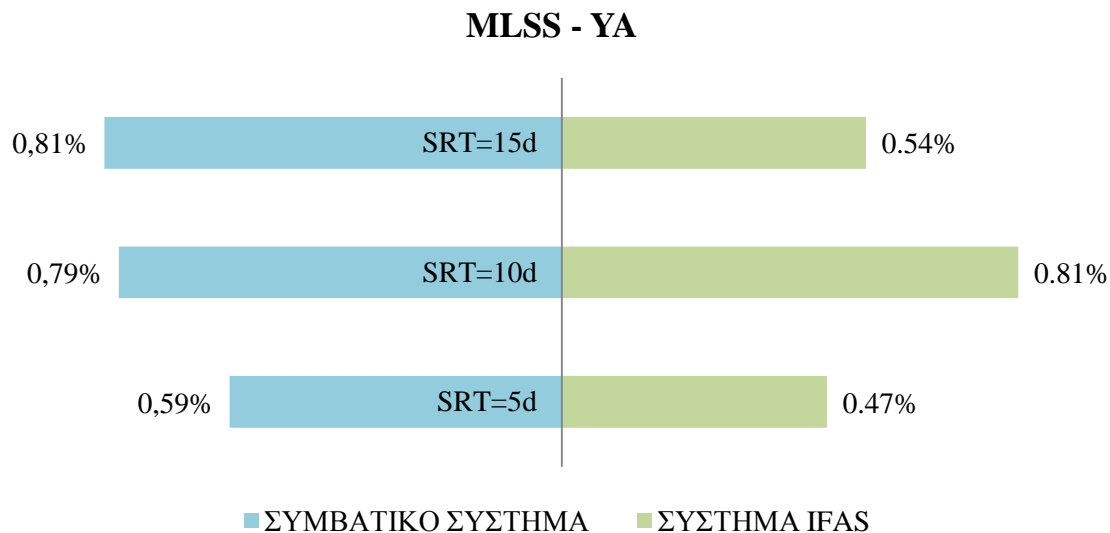
6.5 Γενικά συμπεράσματα για κάθε μία από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν

Στις επόμενες σελίδες γίνεται μια συνοπτική αναφορά της επίδρασης των παραπάνω στοιχειομετρικών παραμέτρων στις εξεταζόμενες μεταβλητές και παρουσιάζεται με τη μορφή σχημάτων η μεταβολή που προκαλούν σε αυτές.

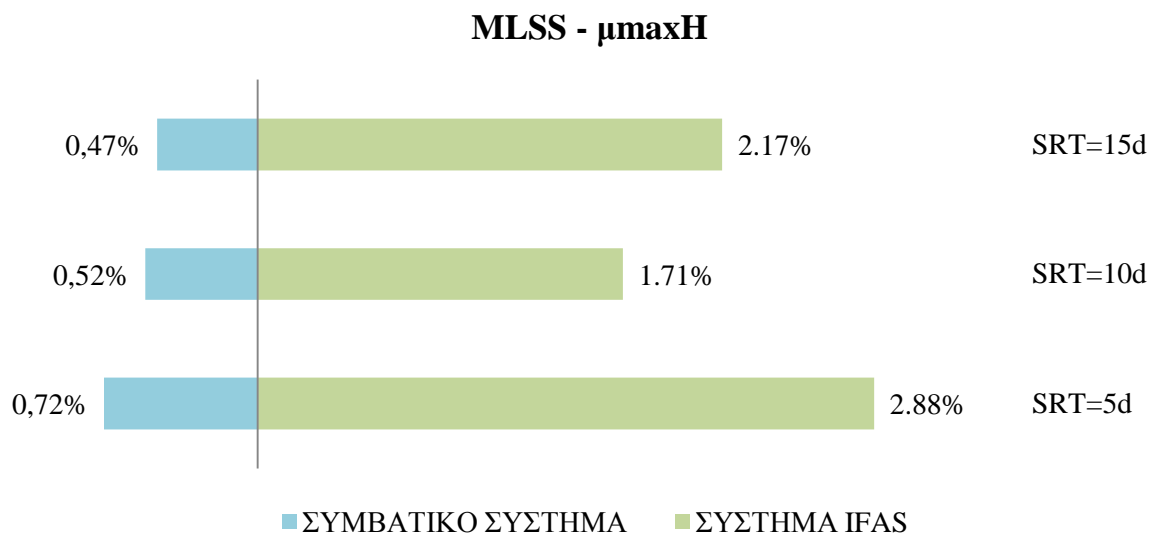
- **MLSS:** Η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής στερεών και το συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας (σχήμα 6.49). Είναι ανάλογη αυτών των μεταβλητών και πρακτικά ανεξάρτητη από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης τόσο της ετεροτροφικής όσο και της αυτοτροφικής βιομάζας (σχήματα 6.51 και 6.52). Παρατηρείται ότι όλοι οι εξεταζόμενοι συντελεστές έχουν την ίδια επίδραση στη συγκέντρωση των MLSS και στα δύο συστήματα. Επίσης, στο σύστημα MBBR/IFAS, σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση παρατηρήθηκε αυξημένη συγκέντρωση των MLSS της τάξεως των 1000 mg/L σε σχέση με το συμβατικό, γεγονός που οφείλεται στην αποκόλληση τμήματος της βιομάζας που αναπτύσσεται στους βιοφορείς. Τέλος, σε όλα σχεδόν τα σενάρια που εξετάστηκαν, η συγκέντρωσή τους είναι εντός των συμβατικών ορίων για την ομαλή και οικονομική λειτουργία του αερισμού ($2000 < \text{MLSS} < 5000$). Σημειώνεται ότι το σύστημα MBBR/IFAS έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε αερισμό.



Σχήμα 6.49 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.

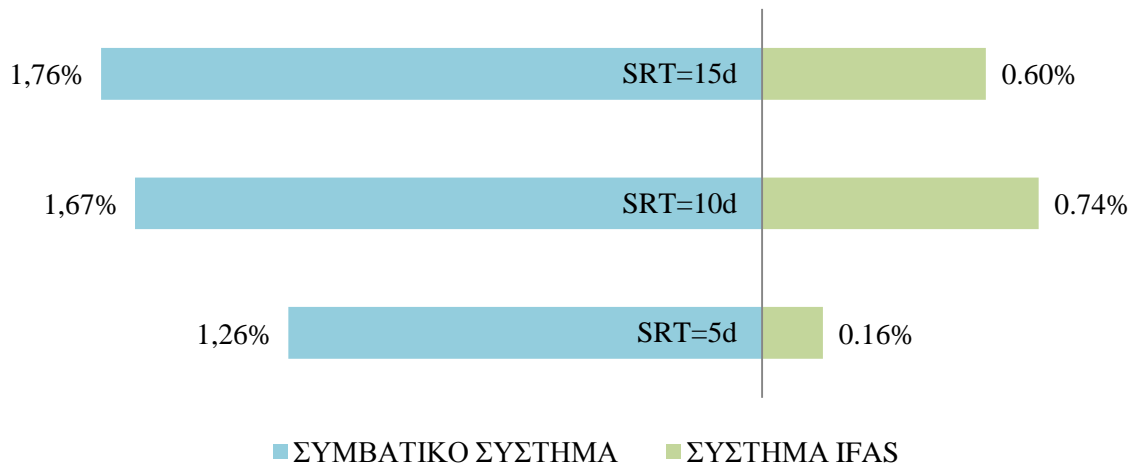


Σχήμα 6.50 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



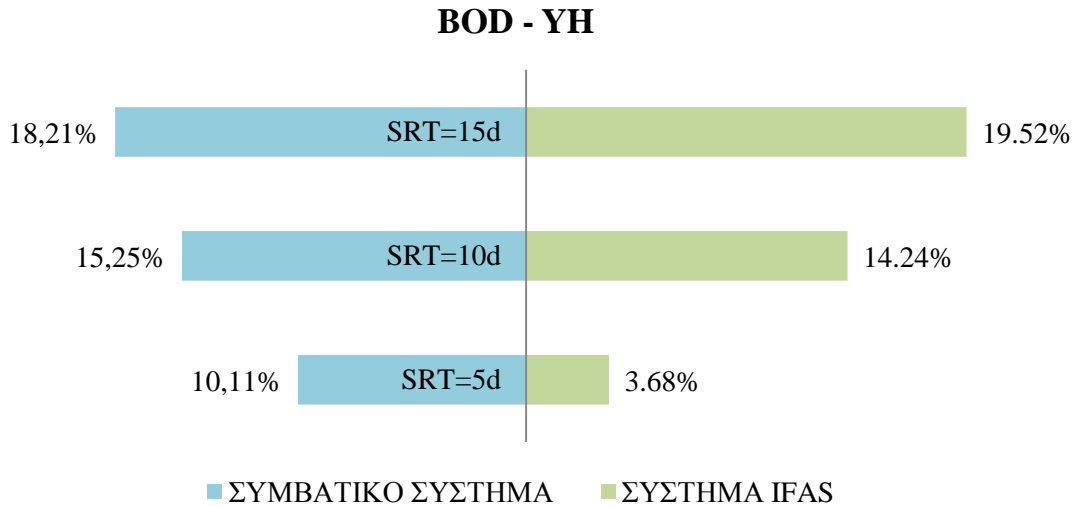
Σχήμα 6.51 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.

MLSS - μ_{maxA}

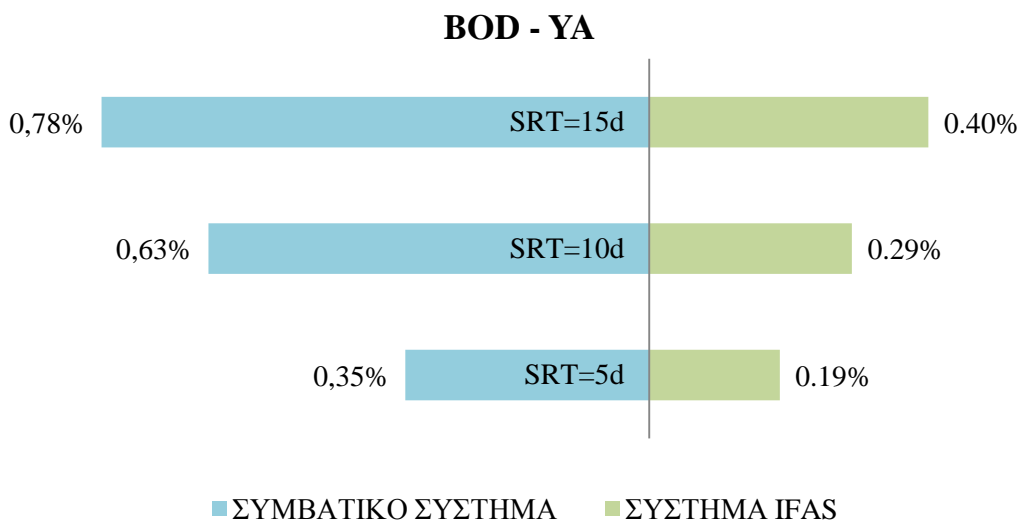


Σχήμα 6.52 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

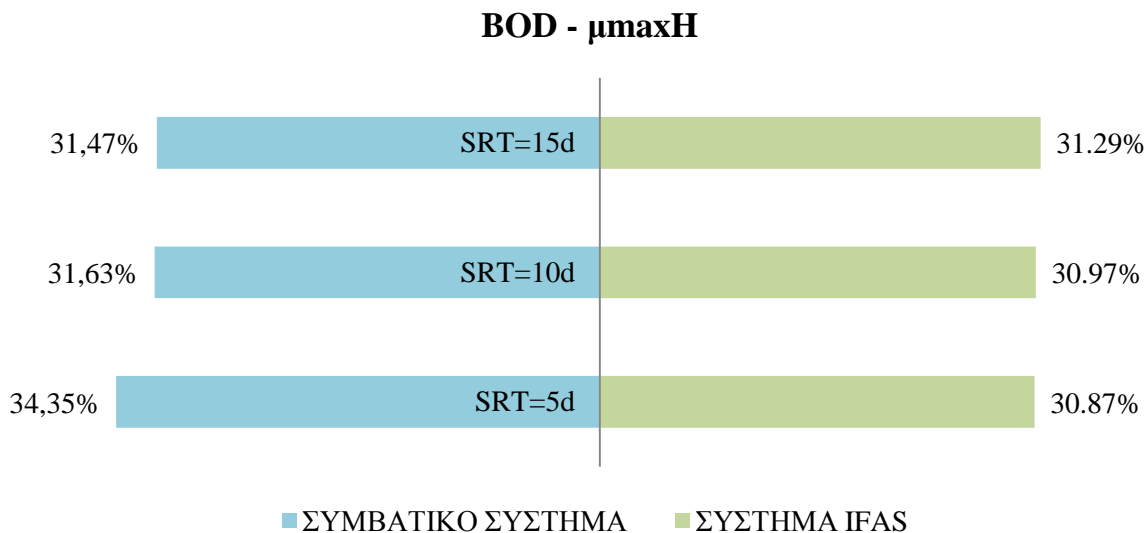
- BOD: Η συγκέντρωση του BOD της εκροής επηρεάζεται κυρίως από το χρόνο παραμονής στερεών και σε μικρότερο βαθμό, από το συντελεστή παραγωγής (σχήμα 6.53) και το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας (σχήμα 6.55). Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας προκαλεί μεταβολή της τάξεως του 18.5% (SRT = 15 ημέρες) και ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας μεταβολή περίπου 30%. Η μεταβολές αυτές είναι παρόμοιες και στα δύο συστήματα. Για τους υπόλοιπους εξεταζόμενους συντελεστές παρατηρείται ότι η επίδρασή τους είναι σχεδόν αμελητέα (σχήματα 6.54 και 6.56). Συγκρίνοντας τα δύο συστήματα, το BOD στο MBBR/IFAS είναι αυξημένο σε σχέση με το συμβατικό. Σημειώνεται ότι σε κάθε εξεταζόμενο σενάριο, η τιμή της συγκέντρωσης του ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων.



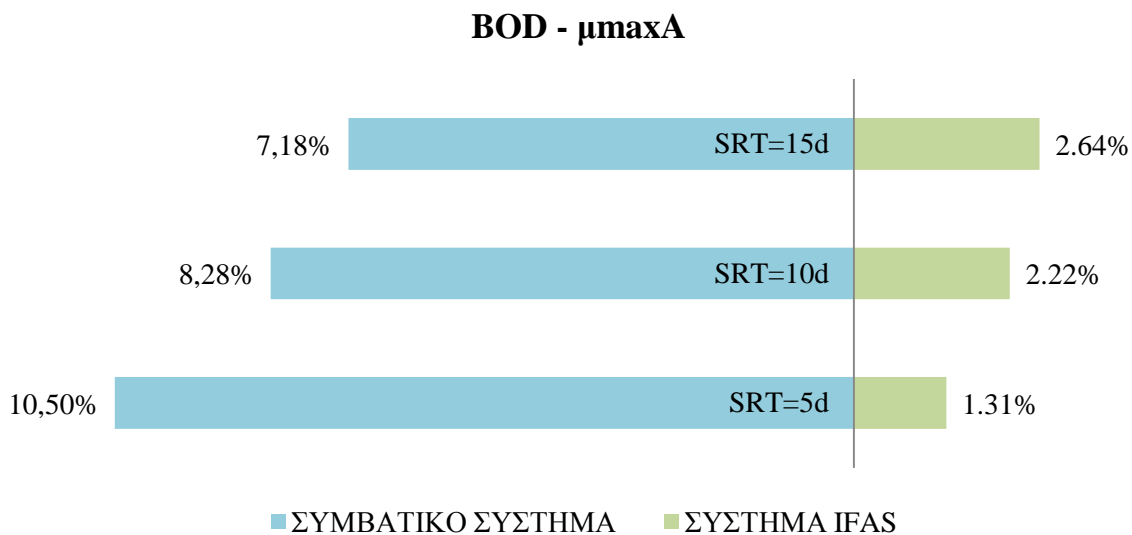
Σχήμα 6.53 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.54 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.

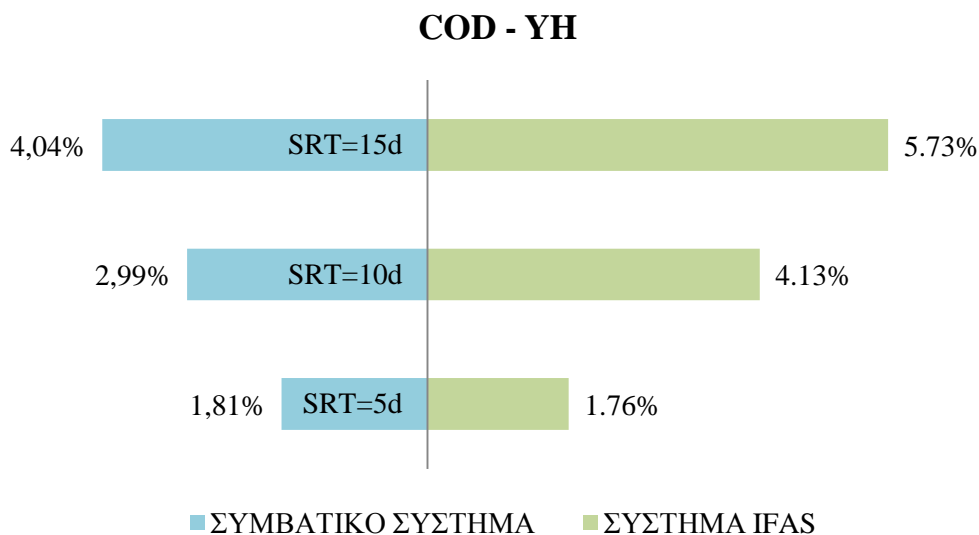


Σχήμα 6.55 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.

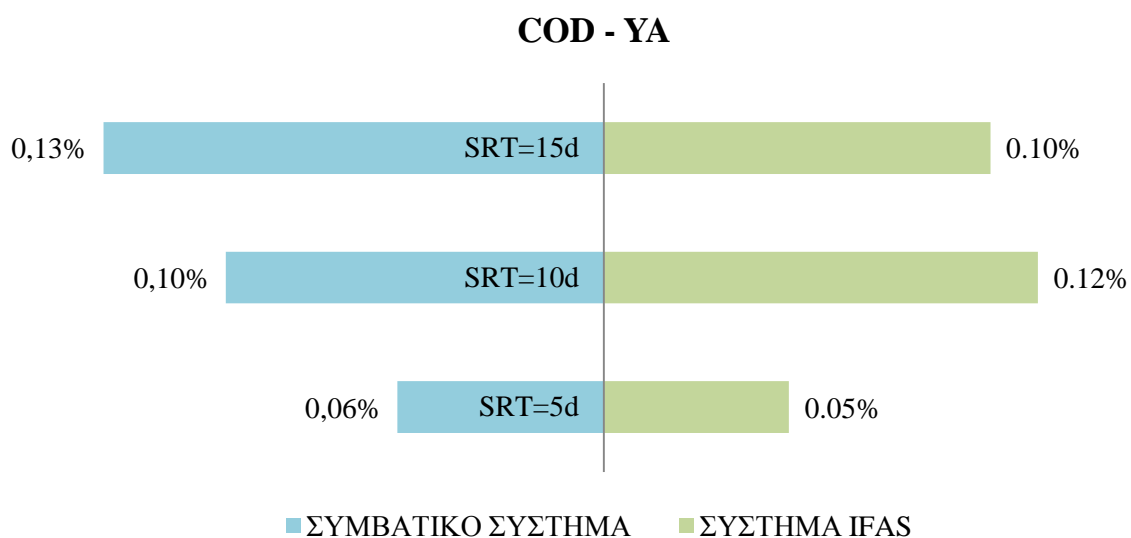


Σχήμα 6.56 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

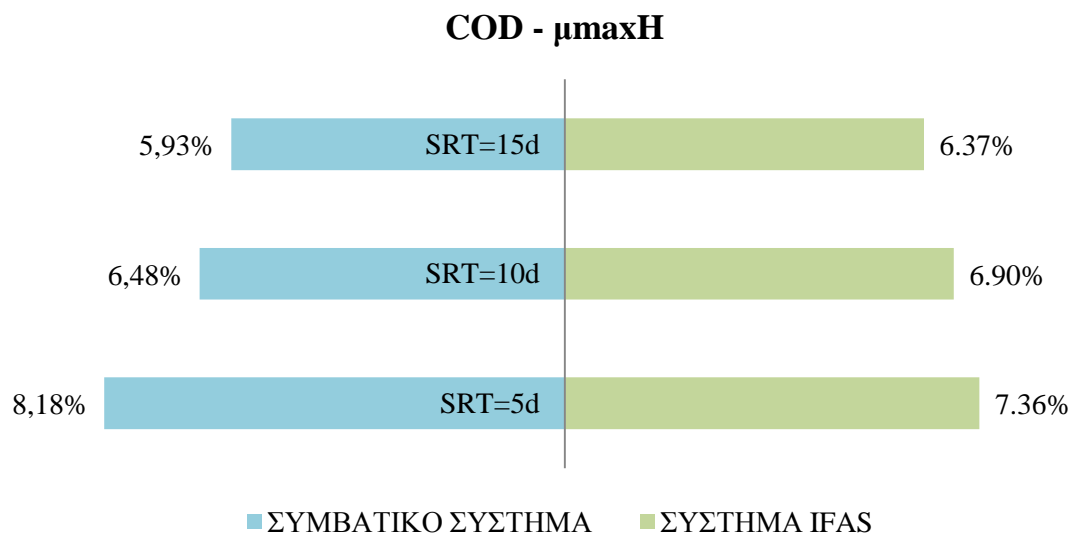
- COD: Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια η εγκατάσταση λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής οδηγίας. Η συγκέντρωση του COD στην έξοδο της εγκατάστασης εξαρτάται κυρίως από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας και σε μικρότερο βαθμό από το χρόνο παραμονής στερεών. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.59, ο συντελεστής μ_{maxH} μεταβάλλει τη συγκέντρωση του COD κατά περίπου 6.5% και στα δύο συστήματα. Όλοι οι υπόλοιποι εξεταζόμενοι συντελεστές, προκαλούν αμελητέες μεταβολές (σχήματα 6.57, 6.58 και 6.60). Ωστόσο, παρατηρήθηκε, ότι στο συμβατικό σύστημα, η συγκέντρωσή του είναι μειωμένη σε σχέση με το σύστημα MBBR/IFAS.



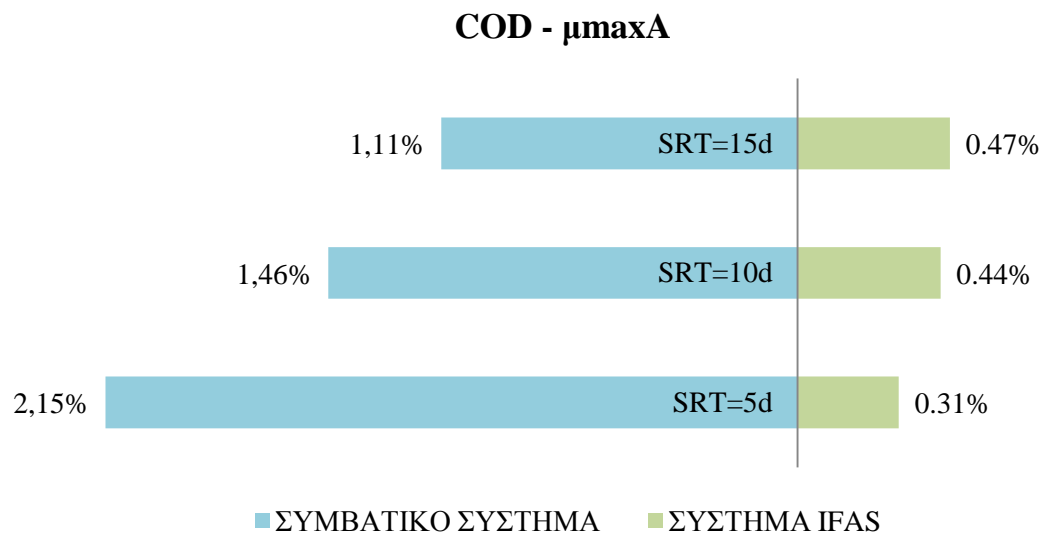
Σχήμα 6.57 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.58 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή παραγωγής της αυτοτροφικής βιομάζας.



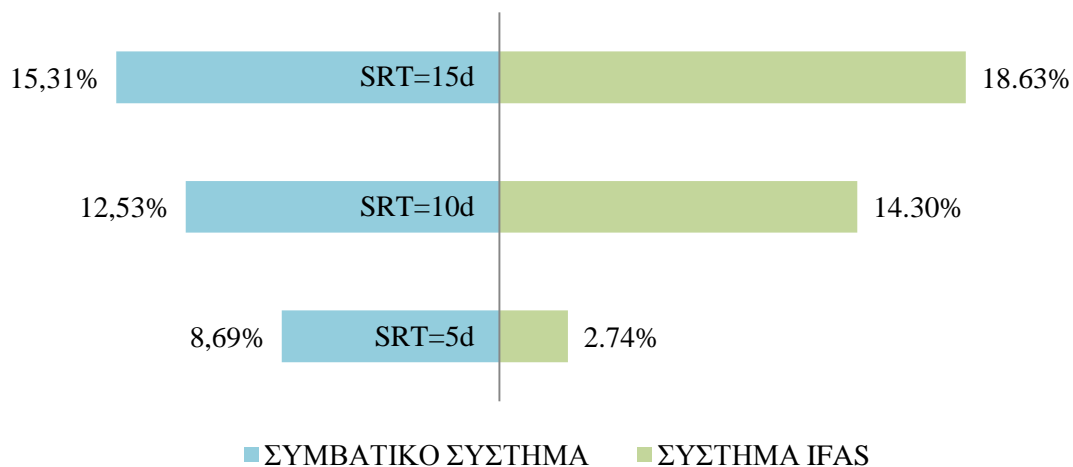
Σχήμα 6.59 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



Σχήμα 6.60 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

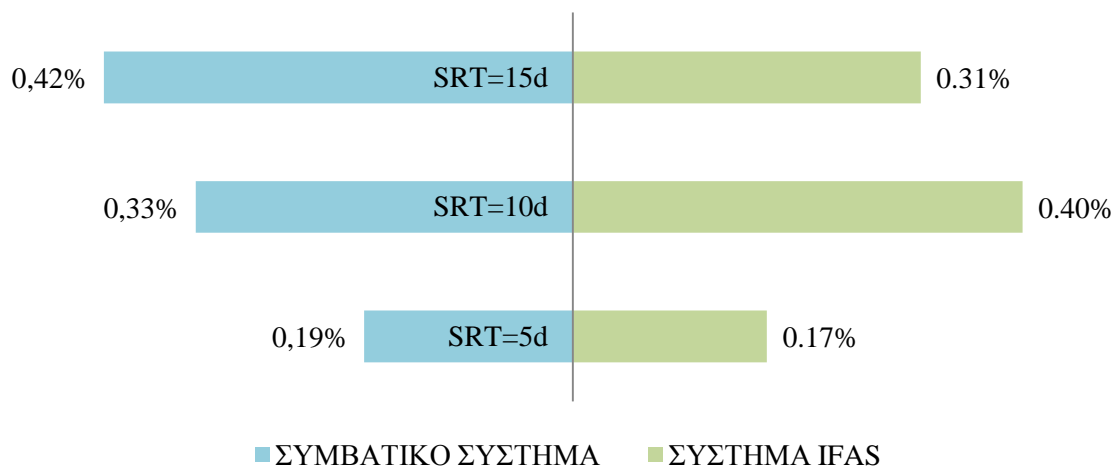
- TSS: Η εγκατάσταση πληροί τις απαιτήσεις της οδηγίας σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Από τα σχήματα 6.61, 6.62, 6.63 και 6.64, γίνεται φανερό ότι η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή δεν επηρεάζεται πρακτικά από καμία από τις μεταβλητές που εξετάστηκαν και δε μεταβάλλεται ιδιαίτερα ανάμεσα στα δύο συστήματα, με την εξαίρεση του συντελεστή ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας, ο οποίος σε μικρούς χρόνους παραμονής στερεών προκαλεί μεταβολή της τάξεως του 15%.

TSS - YH



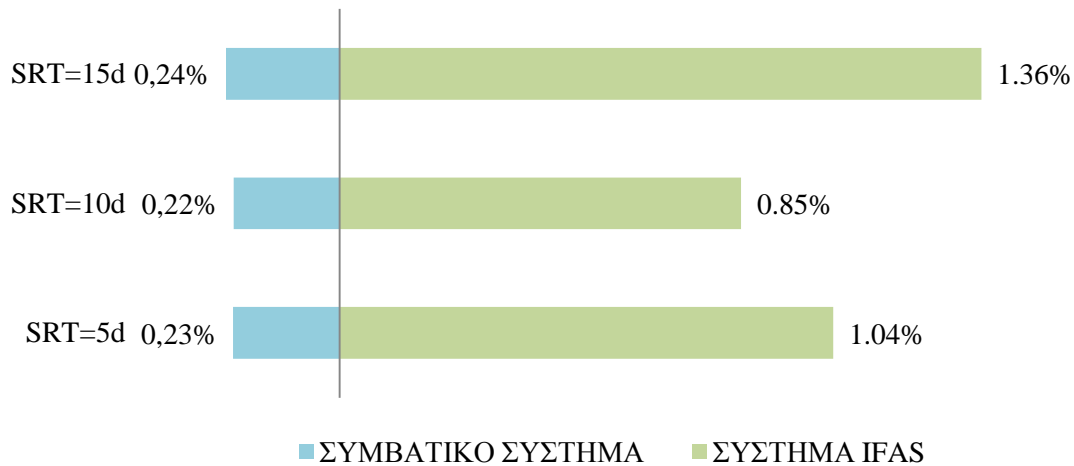
Σχήμα 6.61 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.

TSS - YA



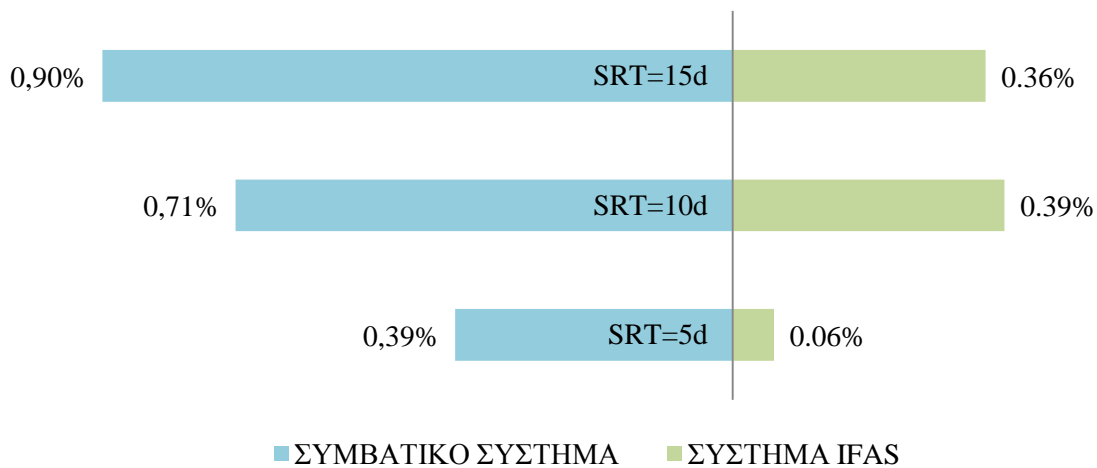
Σχήμα 6.62 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

TSS - μ_{maxH}



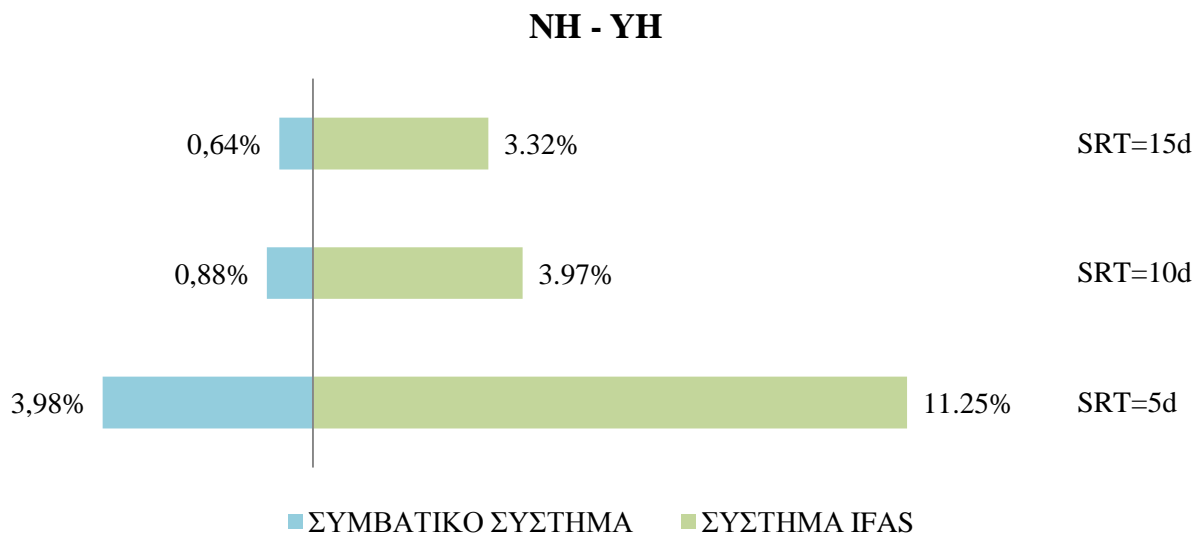
Σχήμα 6.63 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.

TSS - μ_{maxA}

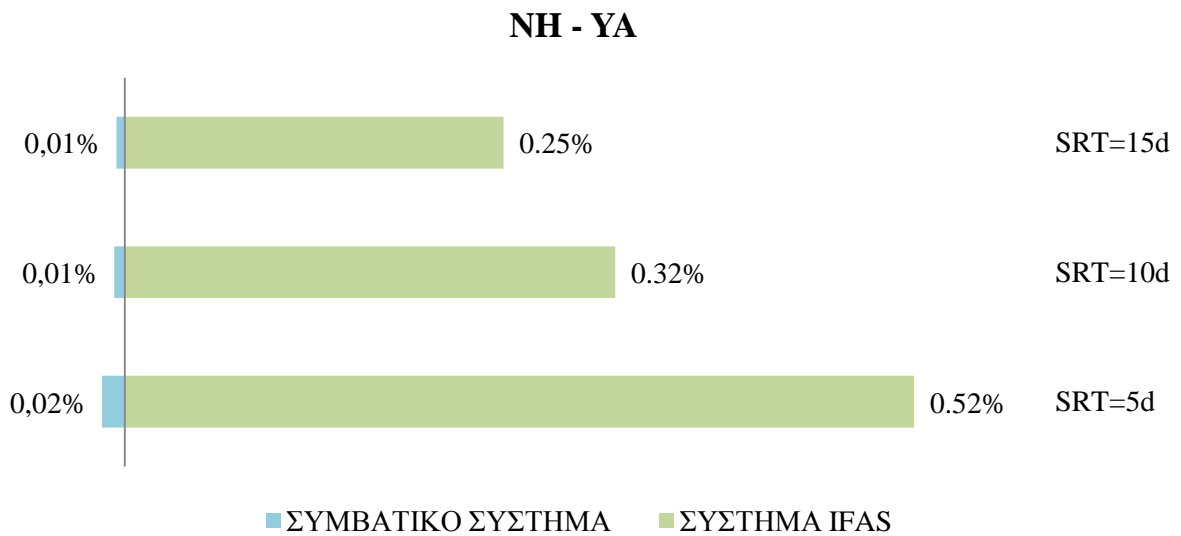


Σχήμα 6.64 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

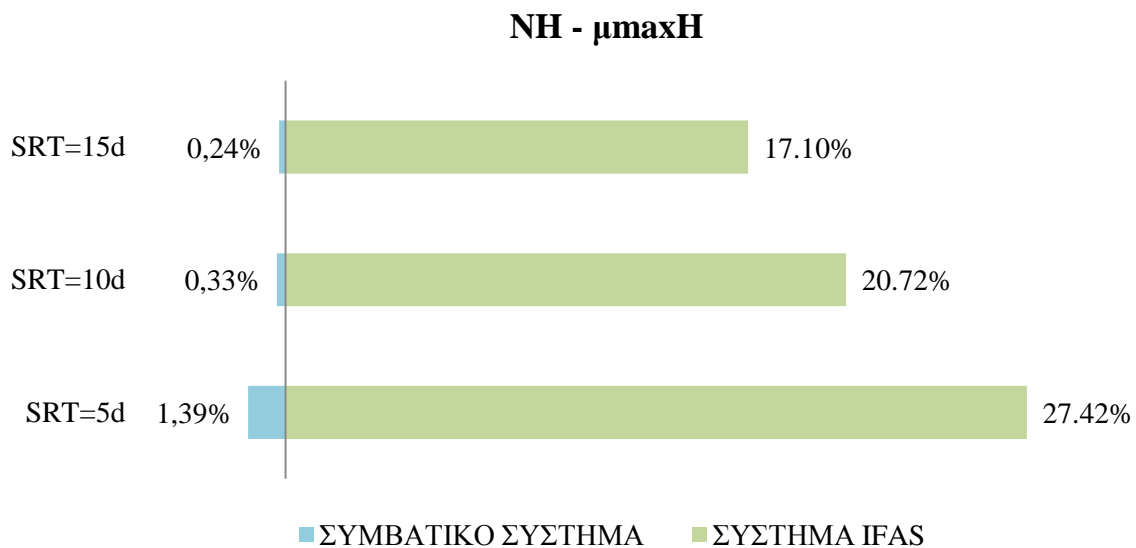
- NH₄-N: Στο συμβατικό σύστημα, στο πλαίσιο των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι για χρόνο παραμονής στερεών μέχρι και 10 ημέρες δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση και η εγκατάσταση βρίσκεται εκτός των συμβατικών ορίων. Η κατάσταση βελτιώνεται αισθητά για μεγαλύτερες τιμές του SRT και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας μ_{maxA} . Αναλυτικότερα, ο συντελεστής μ_{maxA} προκαλεί μεταβολή (μείωση) στη συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου μεγαλύτερη από 92% (σχήμα 6.68), ενώ στο σύστημα MBBR/IFAS η μεταβολή αυτή είναι μικρότερη περίπου κατά 10%. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο τελευταίο, η συγκέντρωση της αμμωνίας επηρεάζεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20% και από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας (σχήμα 6.67). Τέλος, παρατηρήθηκε ότι στο σύστημα MBBR/IFAS, για όλα σχεδόν τα σενάρια, η εγκατάσταση λειτουργεί εντός των ορίων ή οριακά.



Σχήμα 6.65 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.

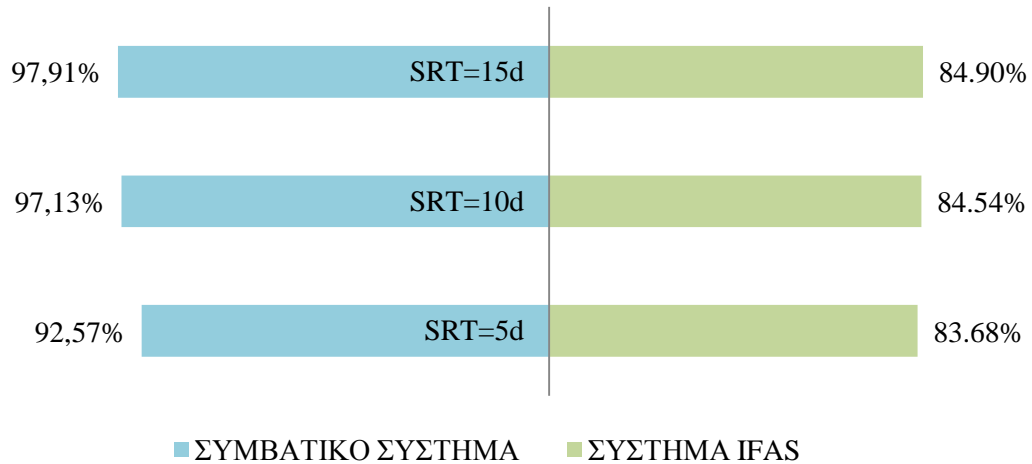


Σχήμα 6.66 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.



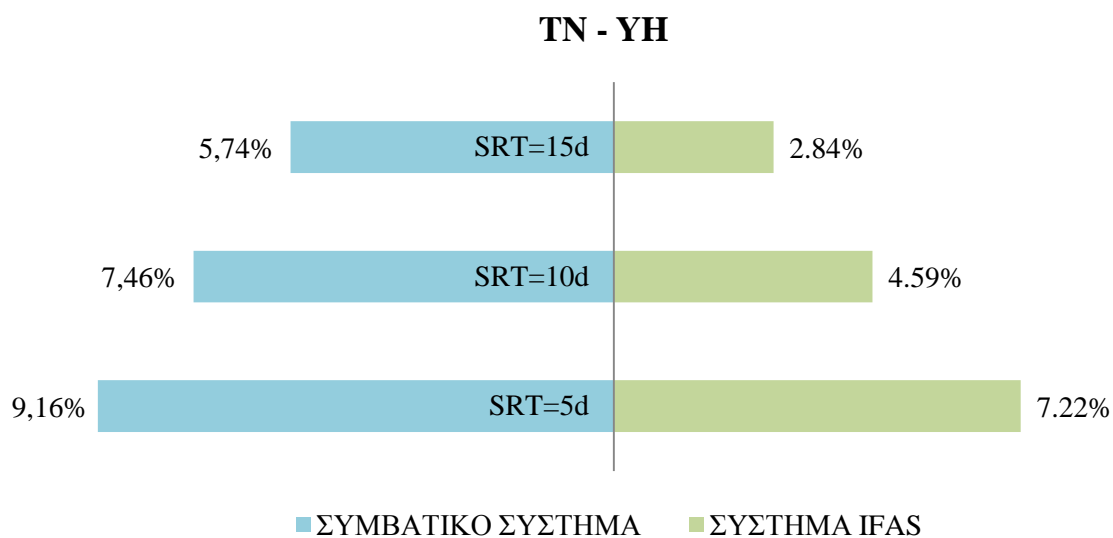
Σχήμα 6.67 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.

NH - μ_{maxA}

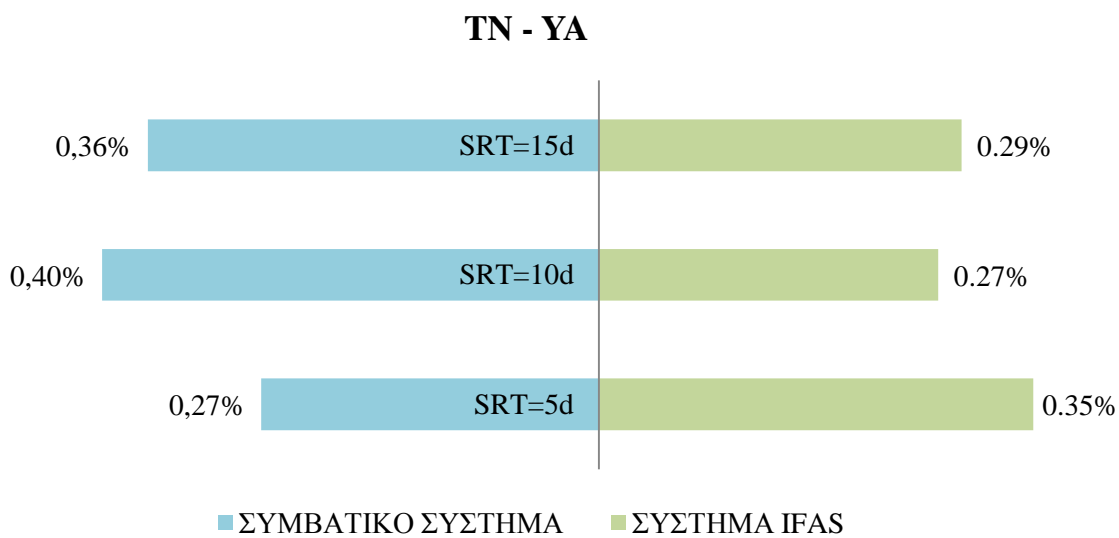


Σχήμα 6.68 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

- TN: Το ολικό άζωτο έχει παρόμοια συμπεριφορά με το αμμωνιακό, αφού και αυτό επηρεάζεται κυρίως από το χρόνο παραμονής στερεών και το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας και εμφανίζει μικρότερες συγκεντρώσεις στο σύστημα MBBR/IFAS. Στο συμβατικό σύστημα, η μεταβολή του είναι της τάξεως του 76%, ενώ στο σύστημα MBBR/IFAS είναι 26%, γεγονός που καθιστά το δεύτερο σύστημα πιο σταθερό σε σχέση με το πρώτο (σχήμα 6.72). Σημειώνεται, επίσης, ότι για μικρές τιμές του SRT και του συντελεστή μ_{maxA} , το συμβατικό σύστημα αστοχεί. Όλοι οι υπόλοιποι συντελεστές δεν προκαλούν ουσιαστικά καμία μεταβολή (σχήματα 6.69, 6.70 και 6.71).

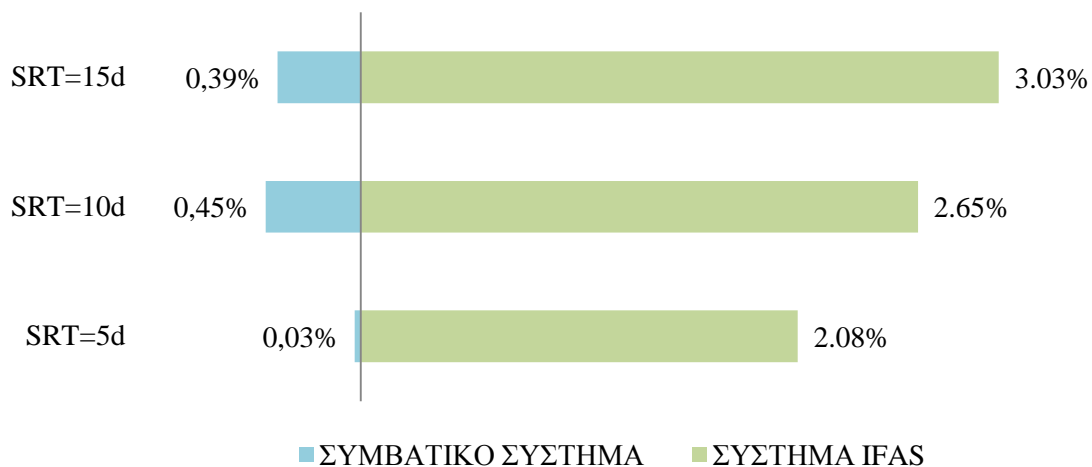


Σχήμα 6.69 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.



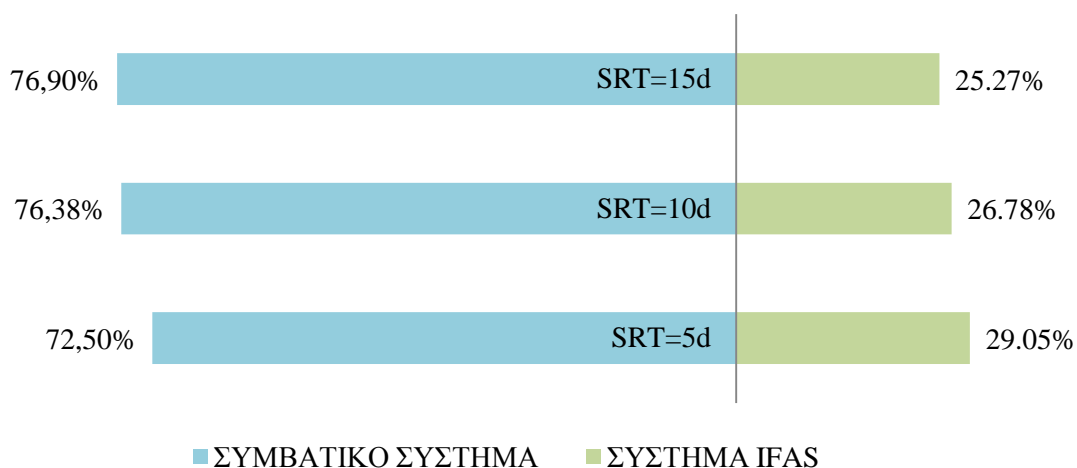
Σχήμα 6.70 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του συντελεστή ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

TN - μ_{maxH}



Σχήμα 6.71 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας.

TN - μ_{maxA}



Σχήμα 6.72 Ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του χρόνου παραμονής στερεών και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, φαίνεται ότι 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} , με την επίδρασή της να είναι μεγαλύτερη στο συμβατικό σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, επηρεάζεται η διεργασία της νιτροποίησης, όπως είναι αναμενόμενο. Η διεργασία αυτή σχετίζεται με τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών, των νιτρικών και του ολικού αζώτου στην εκροή.

7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ MBBR/IFAS

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4, ένα σύστημα MBBR/IFAS είναι ένα υβριδικό σύστημα, του οποίου η λειτουργία δεν επηρεάζεται μόνο από τα χαρακτηριστικά της αιωρούμενης βιομάζας, αλλά και από αυτά της προσκολλημένης, καθώς και από τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου βιοφορέα. Παρακάτω εξετάζονται ορισμένες τέτοιου είδους παράμετροι και περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν στην ποιότητα της εκροής. Όλες οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για $SRT = 5$ ημερών, $T = 20$ °C και $Q_{\text{εισόδου}} = 1400 \text{ m}^3/\text{d}$ (το 140% της παροχής εισόδου).

7.1 Επίδραση του solid support

Το solid support είναι μια παράμετρος που εκφράζει το ποσοστό των βιοφορέων στον αντιδραστήρα, δηλαδή το μέρος του όγκου που καταλαμβάνουν σε αυτόν. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για $\text{specific surface area} = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ και $\text{biofilm density} = 40000$.

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 7.1, η αύξηση του solid support, προκαλεί βαθμιαία, αλλά μικρή αύξηση στα MLSS (σχήμα 7.1) του αερόβιου αντιδραστήρα (περίπου 700 mg/L) και σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση των στερεών στη δεξαμενή καθίζησης (περίπου 2000 mg/L), χωρίς ωστόσο αυτή να επιβαρύνει τη λειτουργία της. Επίσης, παρατηρείται μείωση στην ποσότητα της ιλύος στην έξοδο της εγκατάστασης.

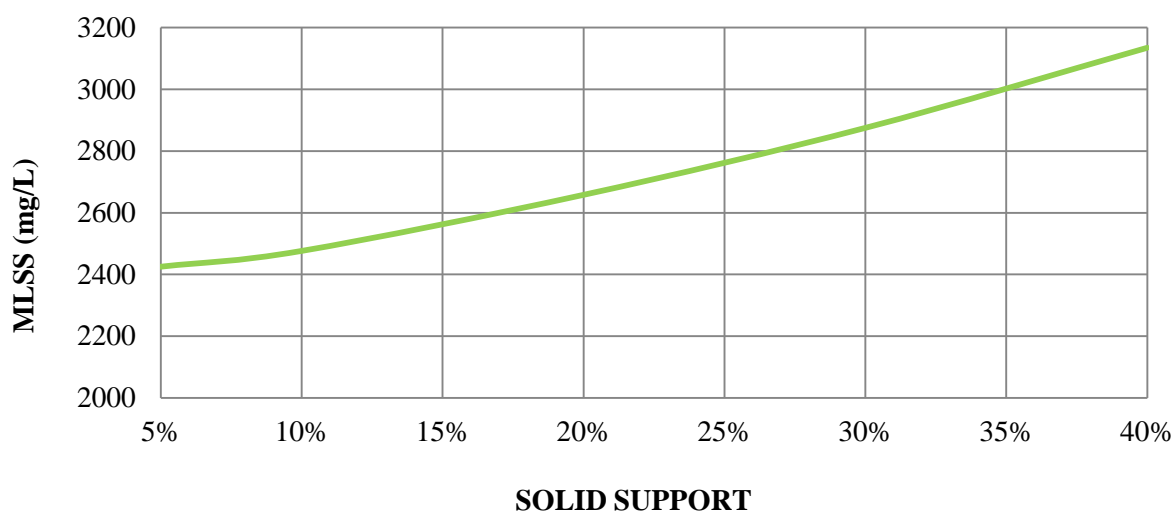
Το BOD της εκροής (σχήμα 7.3) παρουσιάζει αμελητέα αύξηση με την αύξηση της ποσότητας των βιοφορέων, η οποία πιθανότατα οφείλεται στην ύπαρξη της πλεονάζουσας βιομάζας του συστήματος. Παρόμοια συμπεριφορά έχει και το COD στην έξοδο της εγκατάστασης, σύμφωνα με το σχήμα 7.2.

Η αύξηση του solid support συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της ποιότητας της εκροής, όσον αφορά την αμμωνία (σχήμα 7.6). Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση της παρουσιάζει μείωση της τάξεως του 1 mg/L, η οποία μπορεί να είναι πολύ σημαντική για εγκαταστάσεις που δυσκολεύονται να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των θεσμοθετημένων ορίων.

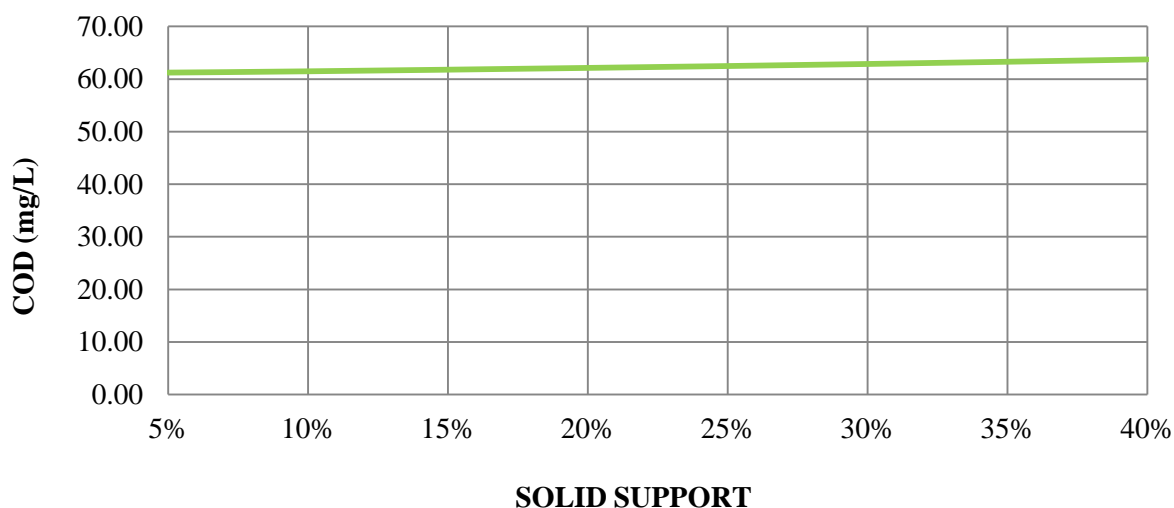
Πίνακας 7.1 Επίδραση του solid support στην εκροή του συστήματος MBBR/IFAS

solid support	TSS	TN	TKN	NO	NH	COD	BOD	MLSS	X_{Under}	Sludge Blanket Height	w
	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	m	m ³ /d
5%	13.14	8.71	4.47	4.25	2.08	61.23	8.54	2425	5659	0.25	0.13
10%	13.25	8.24	3.72	4.52	1.33	61.48	8.63	2476	5794	0.25	0.12
20%	13.58	8.34	4.31	4.04	1.87	62.12	8.82	2658	6214	0.25	0.11

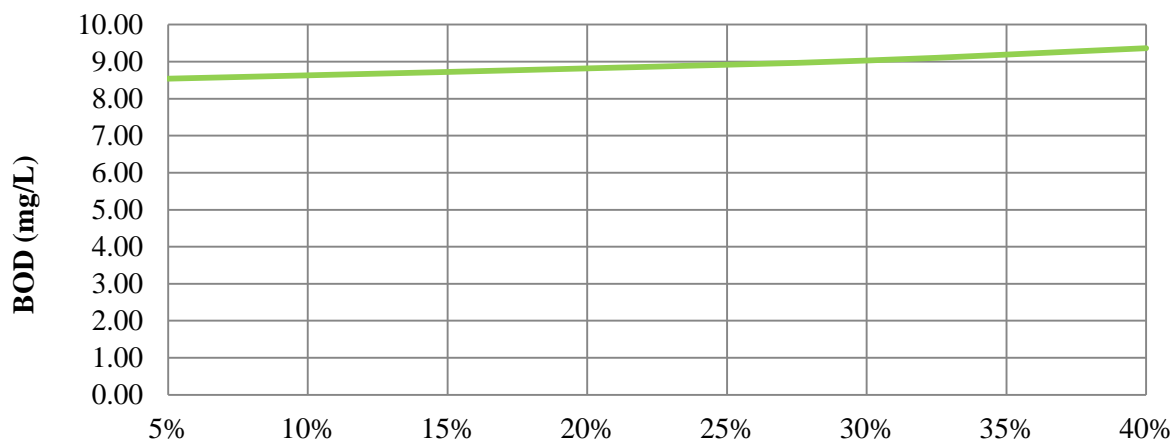
30%	13.99	8.07	3.96	4.11	1.50	62.87	9.03	2875	6734	0.25	0.10
40%	14.46	7.95	3.82	4.13	1.33	63.74	9.36	3135	7357	0.50	0.09



Σχήμα 7.1 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.

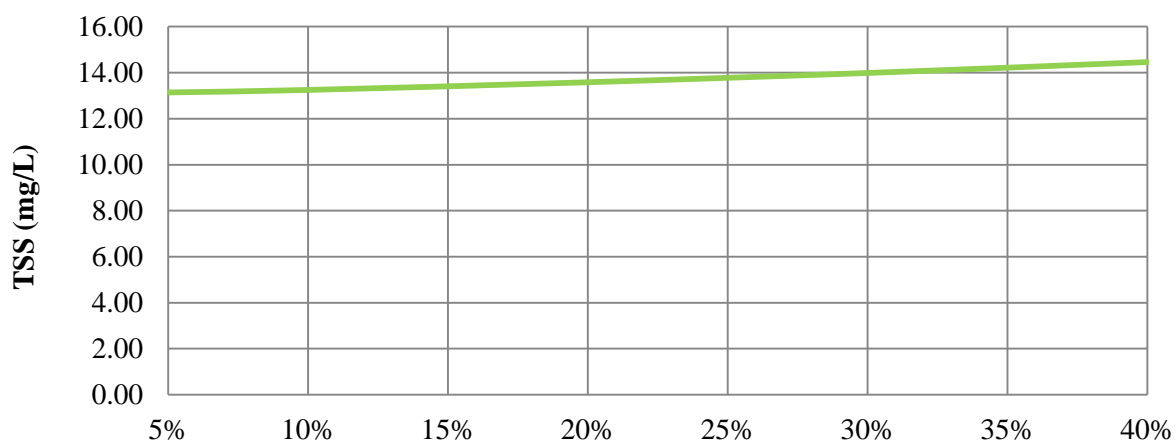


Σχήμα 7.2 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.



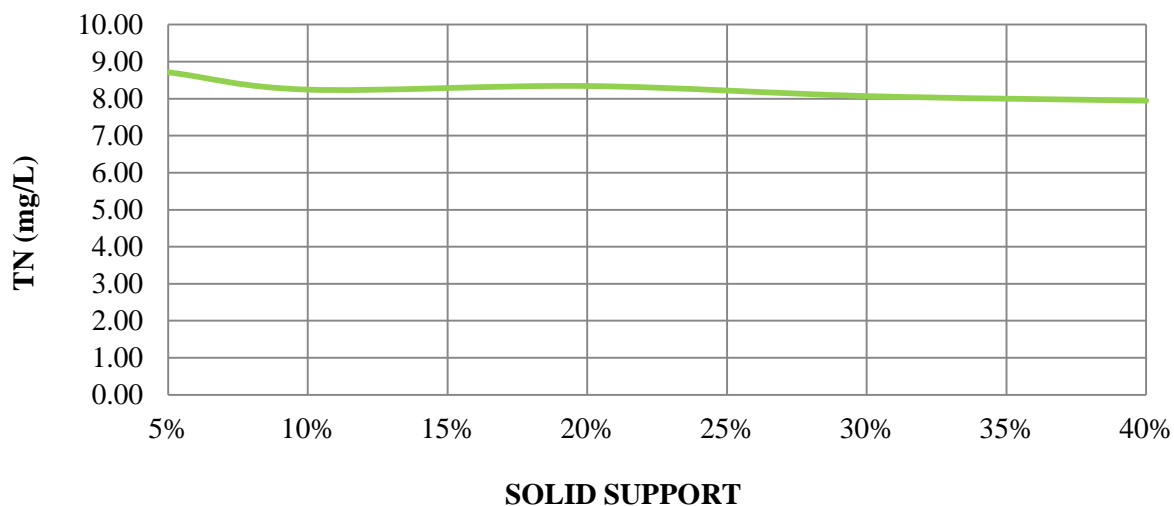
SOLID SUPPORT

Σχήμα 7.3 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.

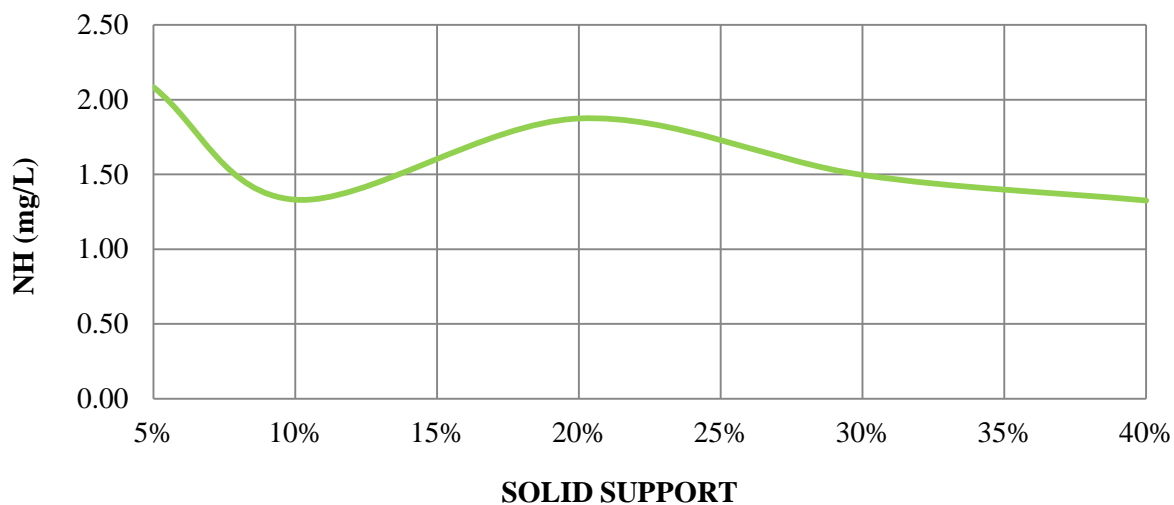


SOLID SUPPORT

Σχήμα 7.4 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.



Σχήμα 7.5 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.



Σχήμα 7.6 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει του solid support.

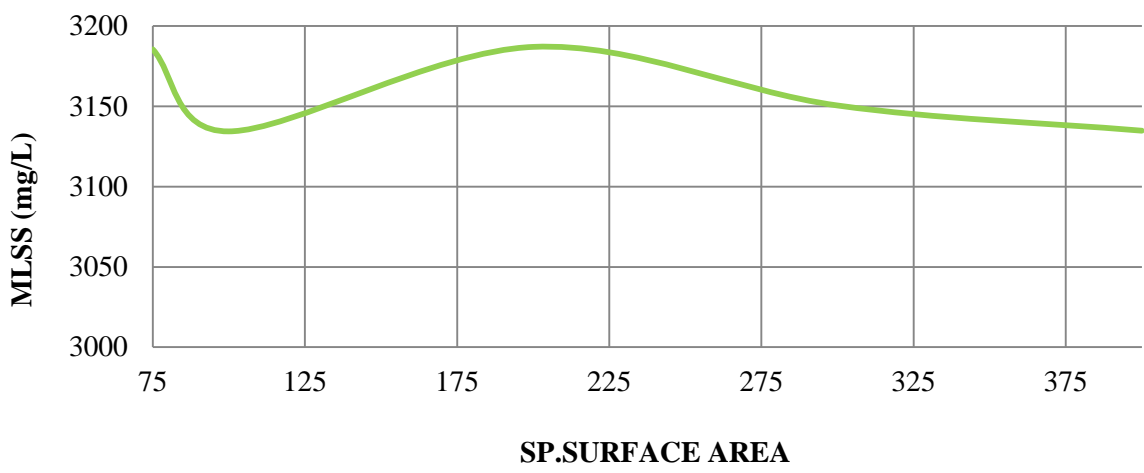
7.2 Επίδραση της ειδικής επιφάνειας (specific surface area)

Η ειδική επιφάνεια εκφράζει τη συνολική διαθέσιμη επιφάνεια που διαθέτουν οι βιοφορείς για την ανάπτυξη της βιομάζας και εκφράζεται σε m^2/m^3 ή $1/m$. Η παράμετρος αυτή πολλαπλασιάζεται με τον όγκο του αντιδραστήρα και το solid support και προκύπτει η συνολική επιφάνεια που καταλαμβάνει η προσκολλημένη βιομάζα. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για solid support = 40% και biofilm density = 40000. Θα ήταν λογικό να υποθέσει κάποιος ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια, τόσο καλύτερη θα είναι η εκροή, λόγω των επιπλέον μικροοργανισμών που έχουν αναπτυχθεί. Ωστόσο, σύμφωνα με τον πίνακα 7.2, η επίδραση της συγκεκριμένης παραμέτρου στην ποιότητα εκροής, αλλά και στη συγκέντρωση των MLSS δεν είναι η αναμενόμενη.

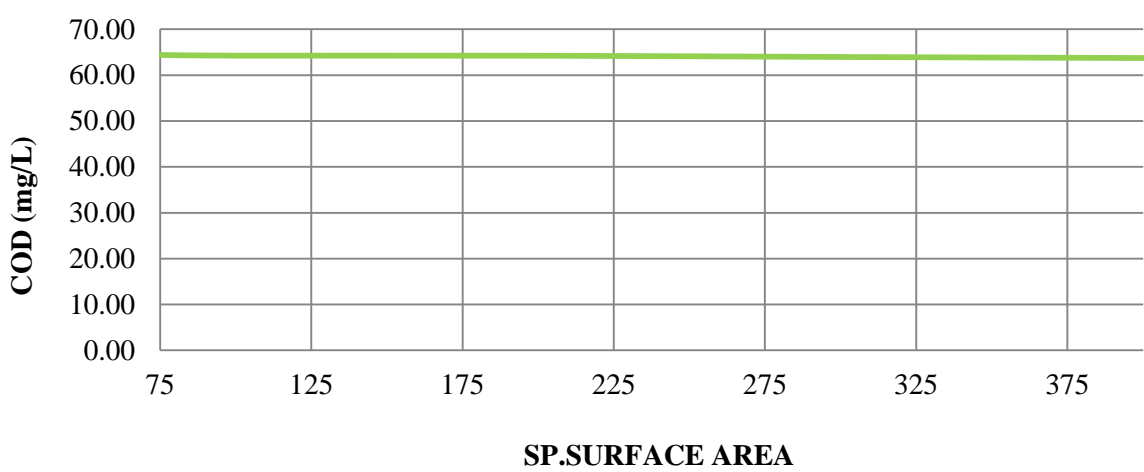
Αναλυτικότερα, η ειδική επιφάνεια των βιοφορέων φαίνεται να μην έχει καμία απολύτως επίδραση στα αιωρούμενα στερεά του αερόβιου αντιδραστήρα (σχήμα 7.7) και στη συγκέντρωση των ολικών στερεών της εκροής (σχήμα 7.10). Όλα τα υπόλοιπα εξεταζόμενα μεγέθη φαίνεται να παρουσιάζουν μια μικρή μείωση, όσο αυξάνεται η ειδική επιφάνεια, όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα.

Πίνακας 7.2 Επίδραση της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων στην εκροή του συστήματος MBBR/IFAS

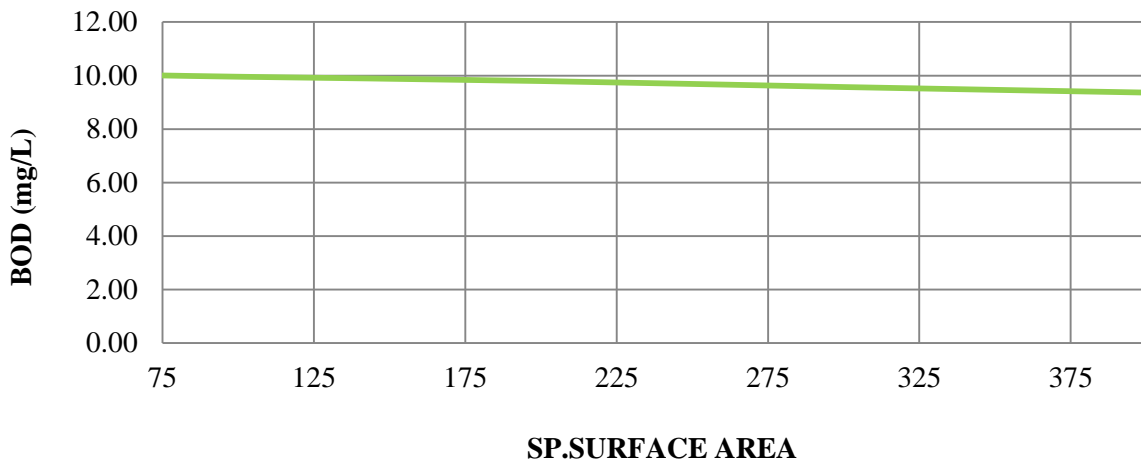
sp.surface area	TSS	TN	TKN	NO	NH	COD	BOD	MLSS	X _{Under}	Sludge Blanket Height	w
	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	m	m ³ /d
75	14.54	8.89	4.60	4.29	1.92	64.40	10.00	3186	7477	0.50	0.09
100	14.45	8.62	4.18	4.44	1.53	64.25	9.96	3134	7357	0.50	0.10
200	14.55	8.93	5.16	3.77	2.55	64.24	9.80	3187	7478	0.50	0.09
300	14.49	8.24	4.27	3.97	1.72	63.96	9.57	3151	7391	0.50	0.09
400	14.46	7.95	3.82	4.13	1.33	63.74	9.36	3135	7357	0.50	0.09



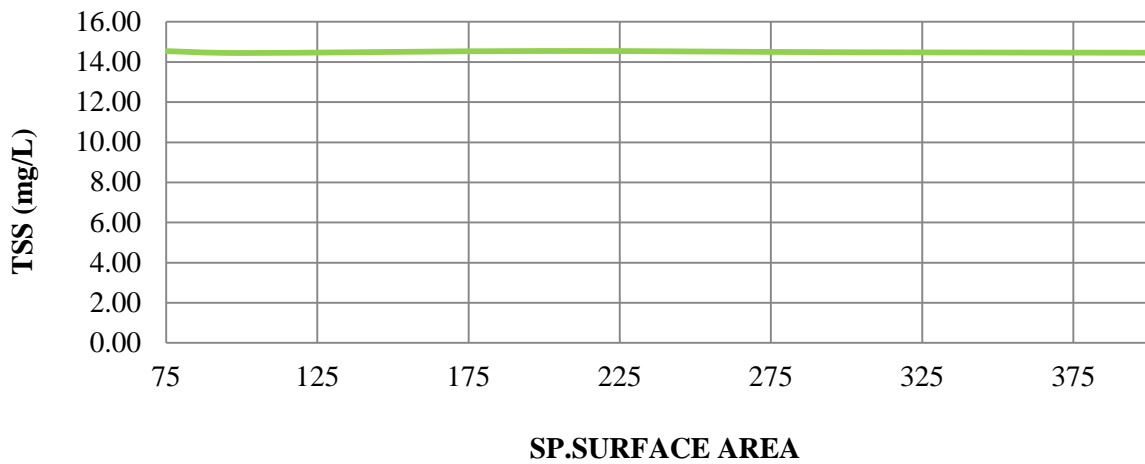
Σχήμα 7.7 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.



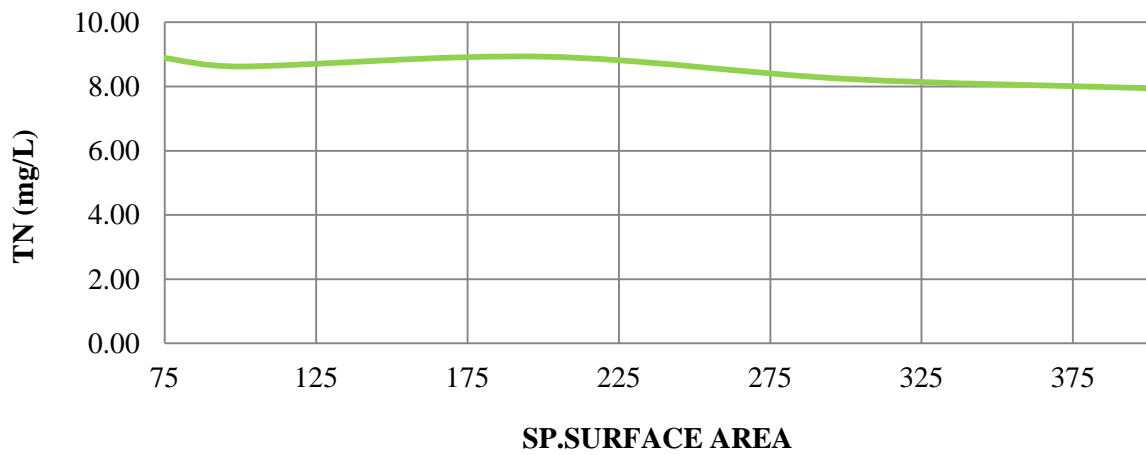
Σχήμα 7.8 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.



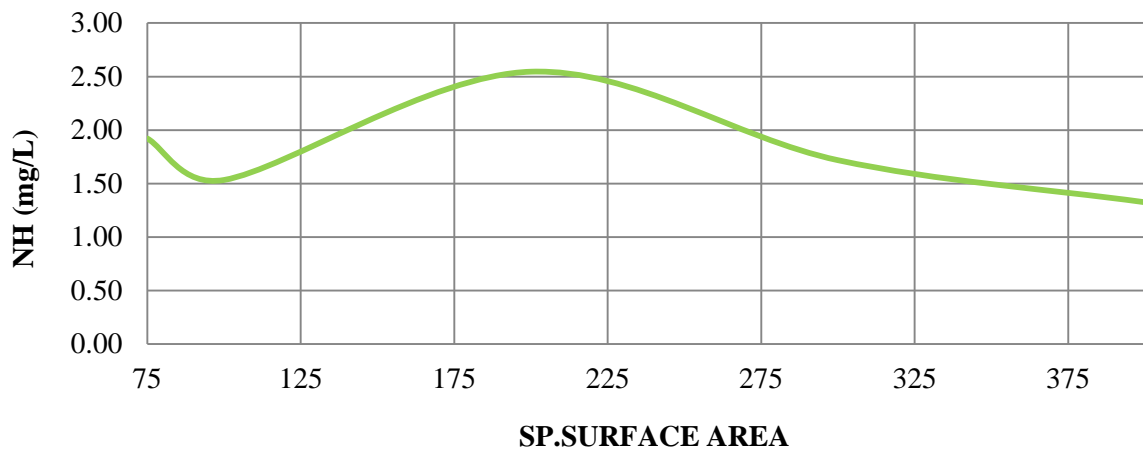
Σχήμα 7.9 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.



Σχήμα 7.10 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.



Σχήμα 7.11 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.



Σχήμα 7.12 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της ειδικής επιφάνειας των βιοφορέων.

7.3 Επίδραση της πυκνότητας του βιοφίλμ (biofilm density)

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4, βιοφίλμ αποκαλείται η προσκολλημένη βιομάζα που αναπτύσσεται στους βιοφορείς και αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους ενός συστήματος MBBR/IFAS. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για solid support = 40% και specific surface area = 200 m²/m³.

Σύμφωνα με τον πίνακα, η επίδραση του biofilm density στη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου υβριδικού βιοαντιδραστήρα (σχήμα 7.13) καθώς και στη συγκέντρωση των στερεών στη δεξαμενή καθίζησης (X_{UNDER}) είναι μηδαμινή. Ανάλογη επίδραση έχει και στα ολικά στερεά της εξόδου (TSS).

Η συγκέντρωση του COD της εξόδου μειώνεται με την αύξηση της εν λόγω παραμέτρου κατά περίπου 1mg/L (σχήμα 7.14). Αντίστοιχη μείωση παρουσιάζει και το BOD της εκροής (σχήμα 7.15).

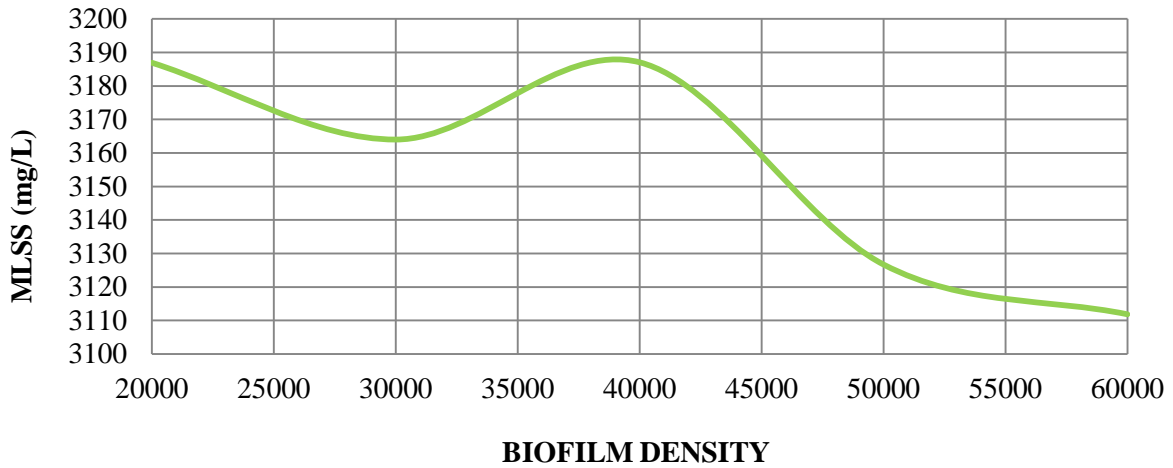
Τη μεγαλύτερη μεταβολή παρουσιάζουν τα μεγέθη της εκροής που σχετίζονται με το άζωτο. Συγκεκριμένα, το ολικό άζωτο εμφανίζει μείωση κατά 1.5 mg/L (σχήμα 7.16), ενώ το αμμωνιακό άζωτο μείωση που αγγίζει τα 2 mg/L (σχήμα 7.17). Αντίθετα, τα νιτρικά εμφανίζουν μία σχεδόν αμελητέα, αλλά προφανή μείωση.

Σημειώνεται, ότι όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη βρίσκονται εντός των ορίων που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, με την εξαίρεση του αμμωνιακού αζώτου.

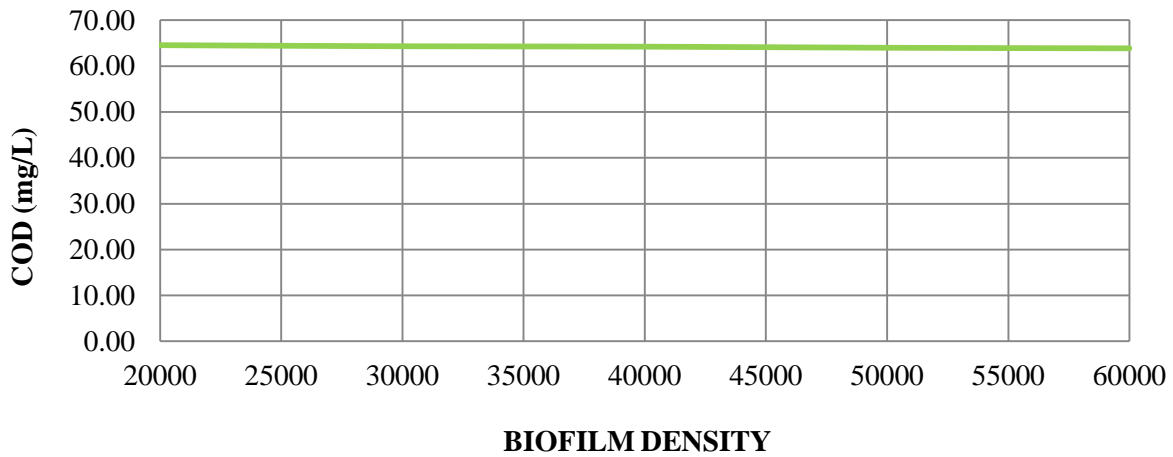
Πίνακας 7.3 Επίδραση του biofilm density στην εκροή του συστήματος MBBR/IFAS

biofilm density	TSS	TN	TKN	NO	NH	COD	BOD	MLSS	X _{Under}	Sludge Blanket Height	w
	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	g/m ³	m	m ³ /d
20000	14.54	9.97	6.48	3.49	3.81	64.56	10.14	3187	7477	0.50	0.09
30000	14.50	9.29	5.63	3.66	3.00	64.33	9.95	3164	7421	0.50	0.09
40000	14.55	8.93	5.16	3.77	2.55	64.24	9.80	3187	7478	0.50	0.09
50000	14.44	8.70	4.88	3.82	2.30	64.00	9.68	3127	7321	0.50	0.09
60000	14.41	8.55	4.69	3.86	2.13	63.87	9.58	3112	7292	0.50	0.09

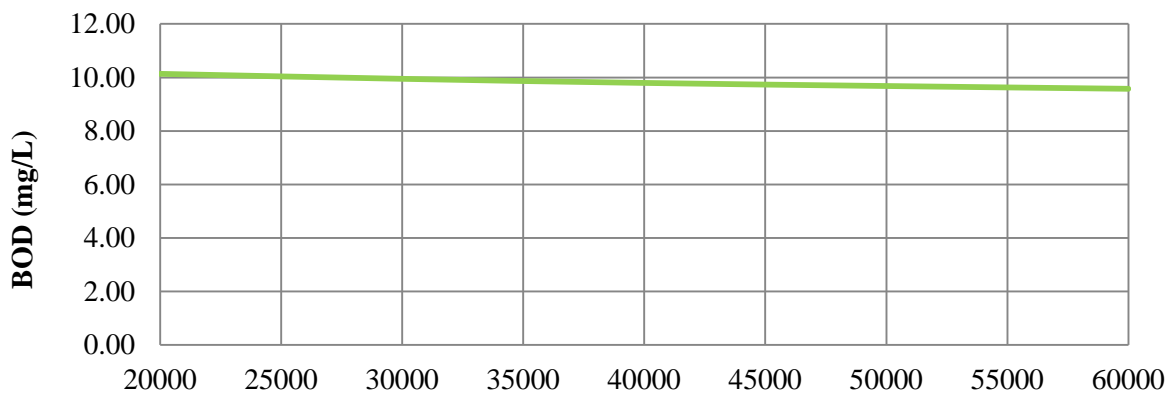
Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται στη μορφή σχημάτων στις επόμενες σελίδες.



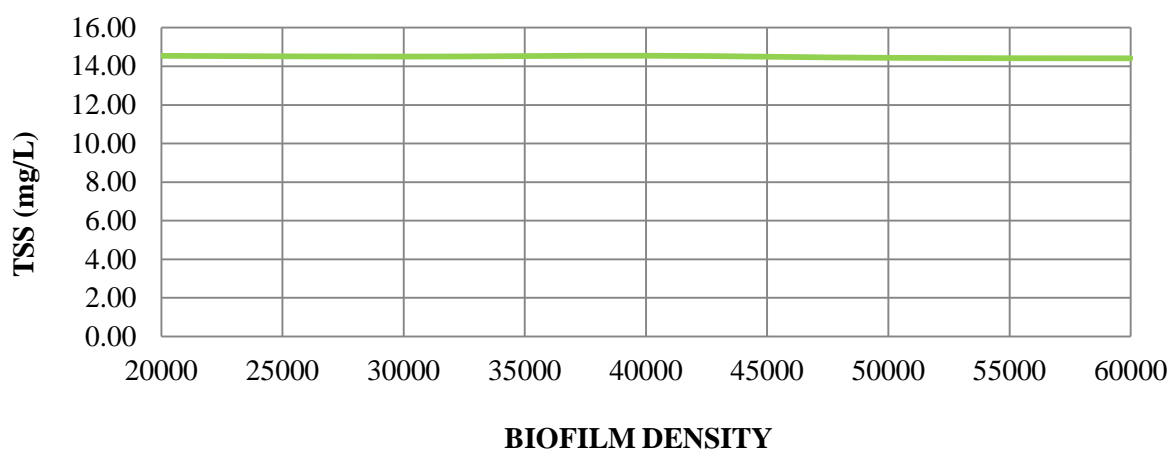
Σχήμα 7.13 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.



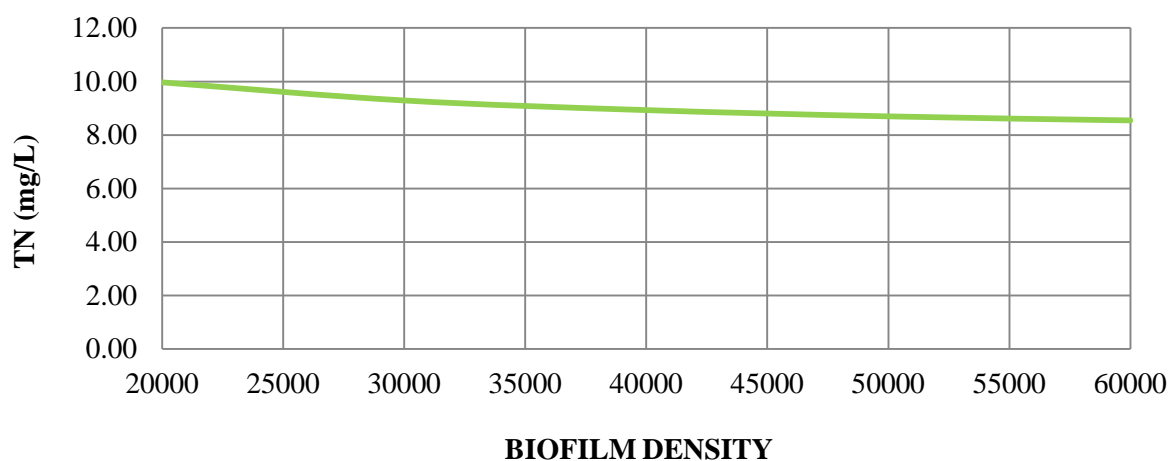
Σχήμα 7.14 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.



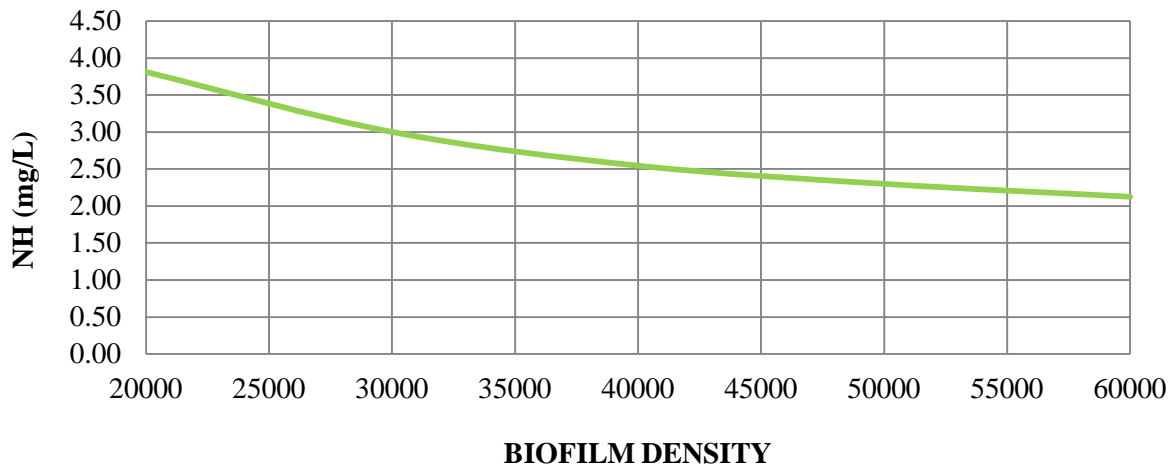
Σχήμα 7.15 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.



Σχήμα 7.16 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.



Σχήμα 7.17 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.



Σχήμα 7.18 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής του συστήματος MBBR/IFAS συναρτήσει της πυκνότητας του βιοφίλμ.

8. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στο παρόν τμήμα της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας της εγκατάστασης. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων σχεδιάζονται για μία συγκεκριμένη παροχή εισροής με δεδομένα χαρακτηριστικά λυμάτων. Ωστόσο, με το πέρασμα των ετών, τόσο η παροχή όσο και τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να μεταβληθούν, οδηγώντας σε δυσμενέστερα σενάρια φόρτισης της εγκατάστασης. Συνεπώς, 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.

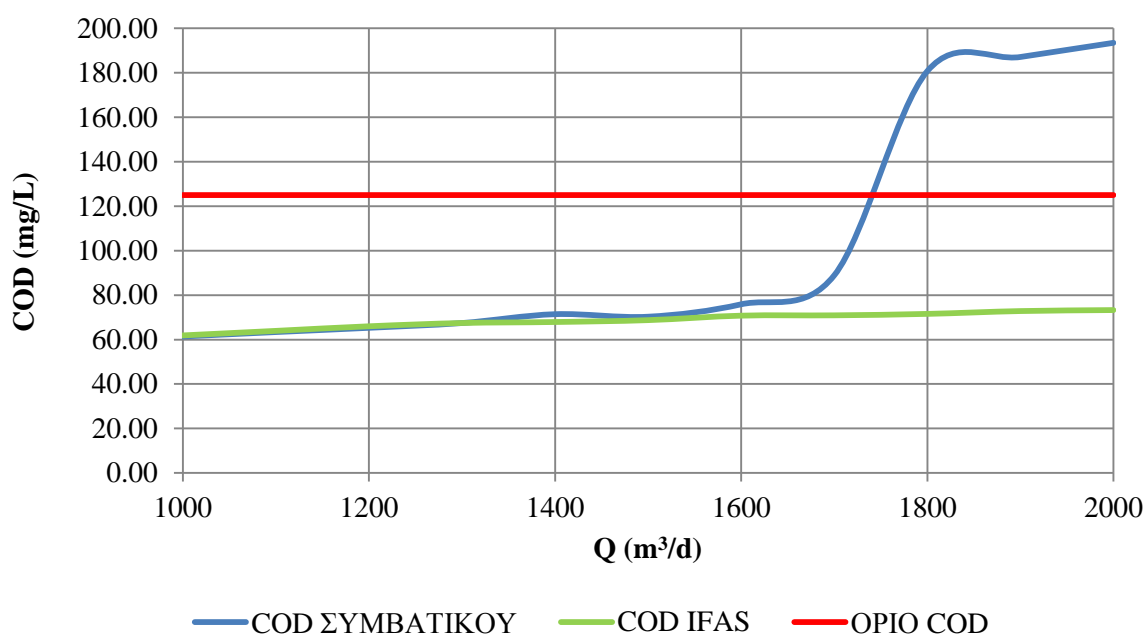
8.1 Έλεγχος επάρκειας για τα λειτουργικά δεδομένα

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας για τα λειτουργικά δεδομένα και των δύο συστημάτων, 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 τους και να βρεθούν τρόποι βελτίωσης της λειτουργίας, έτσι ώστε να αποφευχθεί η μεταβολή των διαστάσεων των επιμέρους μονάδων.

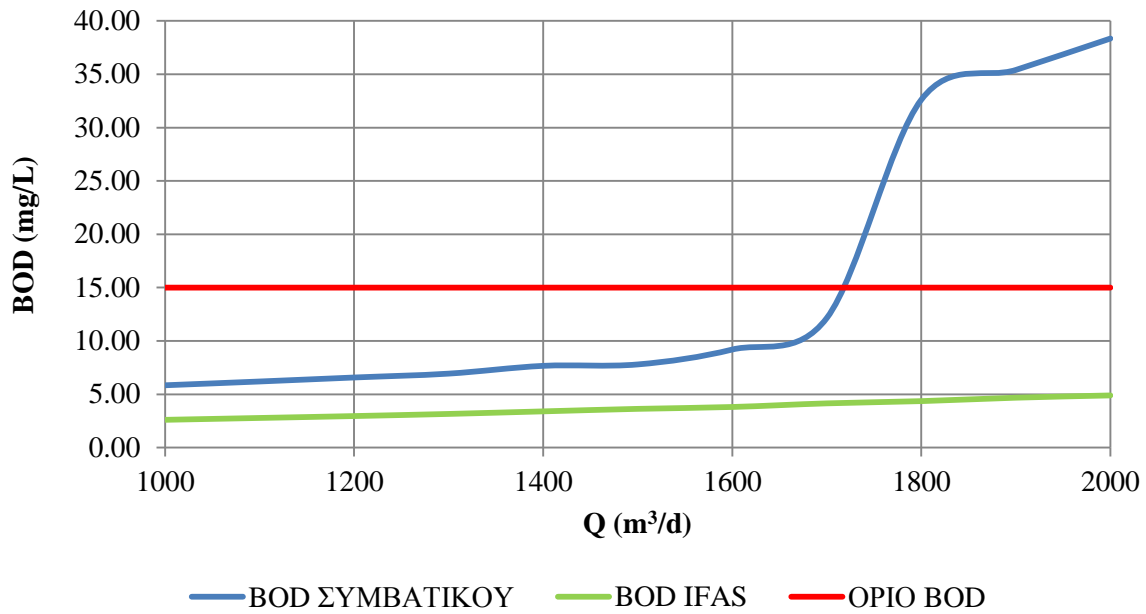
Όπως προκύπτει από τα παρακάτω σχήματα, στο συμβατικό σύστημα σχεδόν όλα τα μεγέθη παρουσιάζουν την ίδια ανοχή στην αύξηση της παροχής εισόδου. Αναλυτικότερα, η συγκέντρωση του COD στην εκροή ξεπερνάει τα θεσμοθετημένα όρια κατά 55 mg/L με 80% αύξηση της παροχής (σχήμα 8.1). Αντίστοιχη συμπεριφορά φαίνεται να έχει και το BOD που αστοχεί στην ίδια παροχή εισόδου κατά 17 mg/L (σχήμα 8.2). Όπως φαίνεται από το σχήμα 8.3, η κρίσιμη μεταβλητή του συστήματος είναι τα ολικά στερεά της εξόδου, τα οποία αστοχούν λόγω της φόρτισης στερεών στη δεξαμενή καθίζησης (σχήμα 8.6). Για 1600 m³/d, η εγκατάσταση λειτουργεί οριακά και με αύξηση αυτής κατά 10% το σύστημα αστοχεί. Θα περίμενε κανείς ότι η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην εκροή θα ξέφευγε από τα όρια της Ευρωπαϊκής οδηγίας για μικρότερη αύξηση της παροχής, αφού το άζωτο είναι συνήθως ο κρίσιμος παράγοντας για τη λειτουργία ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει, διότι ο χρόνος παραμονής στερεών είναι επαρκής για την πραγματοποίηση των διεργασιών της νιτροποίησης και απονιτροποίησης και έτσι, η αστοχία αυτή πραγματοποιείται για αύξηση της παροχής κατά 80% (σχήμα 8.4). Ο μεγάλος χρόνος παραμονής στερεών είναι υπεύθυνος και για τις ικανοποιητικές τιμές του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο (σχήμα 8.5). Συγκεκριμένα, ακόμα και για αύξηση της παροχής στο

100%, η τιμή του φτάνει τα 1.42 mg/L, η οποία θεωρείται αποδεκτή για τη λειτουργία της εγκατάστασης.

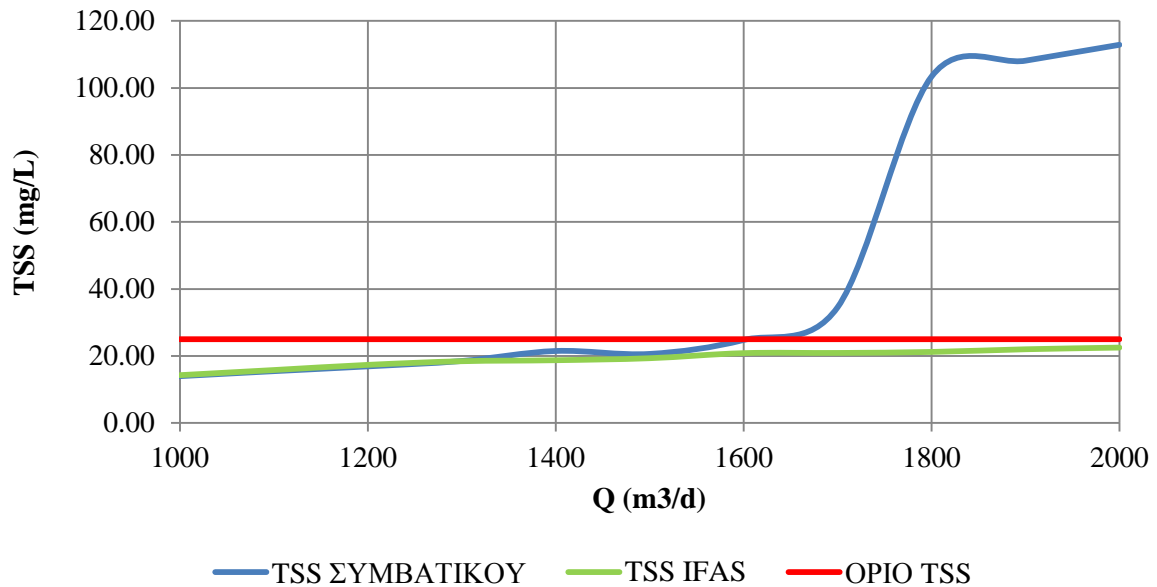
Το σύστημα MBBR/IFAS, αντίθετα, έχει τελείως διαφορετική συμπεριφορά στην αύξηση της παροχής εισόδου. Αρχικά, καμία ουσιαστικά παράμετρος του συστήματος δεν ξεπερνά τα όρια της Ευρωπαϊκής οδηγίας. Πιο αναλυτικά, η συγκέντρωση του COD κυμαίνεται μεταξύ 62 - 73 mg/L (σχήμα 8.1), ενώ το BOD, για αύξηση της παροχής κατά 100% φτάνει τα 4.89 mg/L (σχήμα 8.2)). Για το τελευταίο, αξίζει να σημειωθεί ότι για κάθε παροχή, η συγκέντρωση του είναι κατά 224% - 784% μικρότερη από την αντίστοιχη του συμβατικού. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.3, η συγκέντρωση των ολικών στερεών της εξόδου είναι σχεδόν ίδια με αυτή του συμβατικού, μέχρι τη στιγμή που το πρώτο αστοχεί. Επίσης, για το ολικό άζωτο το σύστημα MBBR/IFAS λειτουργεί επαρκώς (σχήμα 8.4). Ως κρίσιμότερη παράμετρος του συστήματος κρίνεται το αμμωνιακό άζωτο της εξόδου. Σύμφωνα με το σχήμα 8.5, από $Q = 1700 \text{ m}^3/\text{d}$, η συγκέντρωση του είναι οριακή και φτάνει τα 2 mg/L για $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{d}$. Παρόλα αυτά, το σύστημα δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει αστοχήσει.



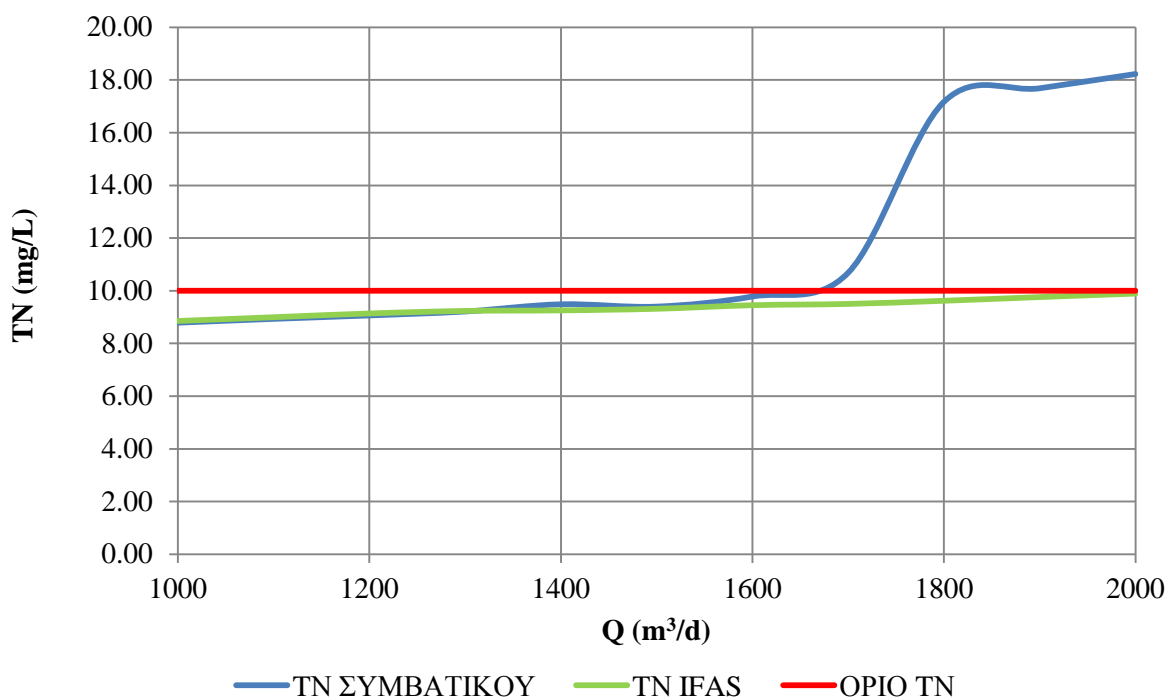
Σχήμα 8.1 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου



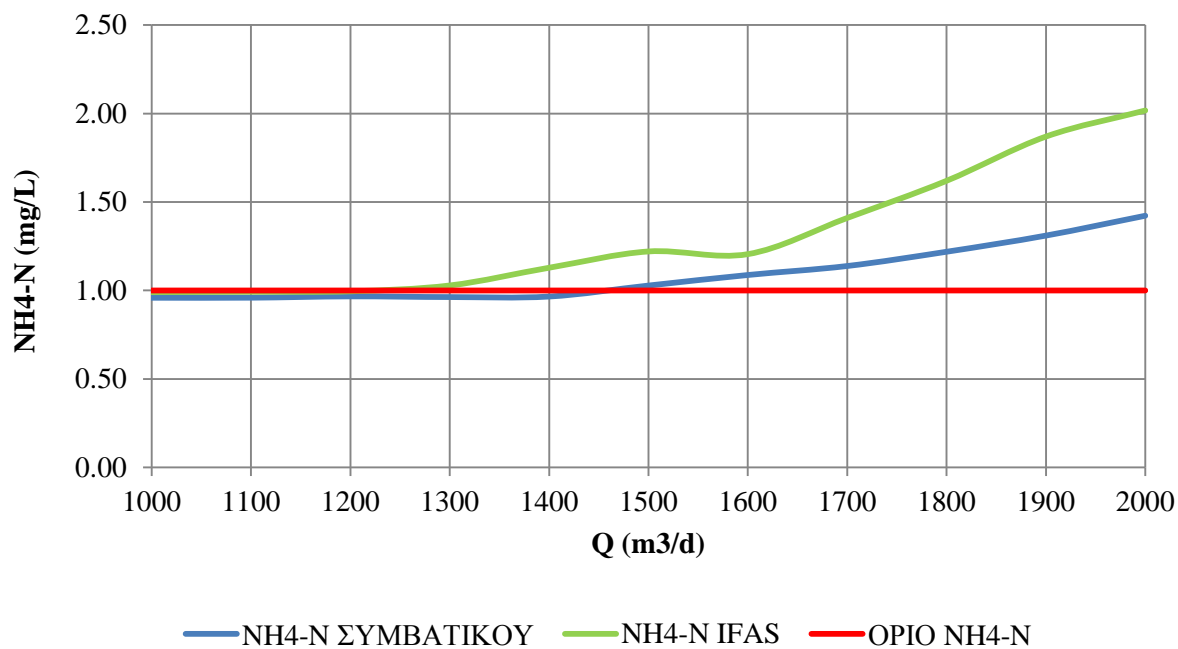
Σχήμα 8.2 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου



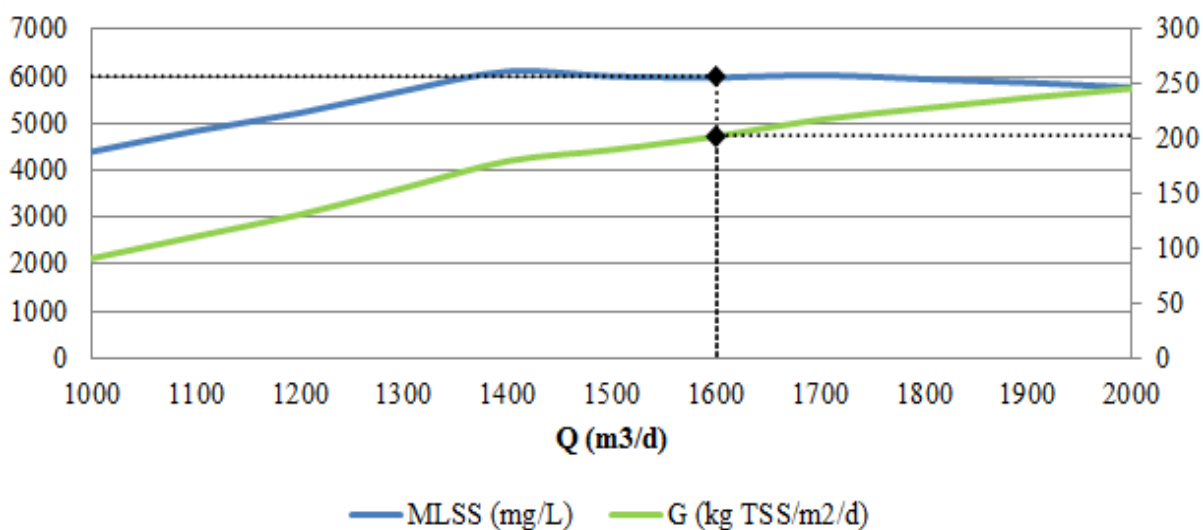
Σχήμα 8.3 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου.



Σχήμα 8.4 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου.



Σχήμα 8.5 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής συναρτήσει της παροχής εισόδου.



Σχήμα 8.6 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα του συμβατικού συστήματος και της φόρτισης στερεών στη δεξαμενή καθίζησης συναρτήσει της παροχής εισόδου.

8.2 Έλεγχος επάρκειας για χρόνο παραμονής στερεών 5 ημερών

Στο παρόν μέρος της εργασίας έγινε έλεγχος της επάρκειας της συμβατικής εγκατάστασης και του συστήματος MBBR/IFAS για διαφορετικές παροχές εισόδου και χρόνο παραμονής στερεών $SRT = 5$ ημέρες, ο οποίος είναι σημαντικά μικρότερος από το SRT σχεδιασμού, καθώς και για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Ο έλεγχος αυτός έδειξε ότι στο συμβατικό σύστημα, η κρίσιμη παράμετρος αστοχίας είναι η συγκέντρωση του ολικού και κυρίως, του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο, η συγκέντρωση του οποίου βρίσκεται εκτός των θεσμοθετημένων ορίων για κάθε εξεταζόμενο σενάριο. Πιο συγκεκριμένα, ήδη στη θερμοκρασία σχεδιασμού ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) η συγκέντρωση της αμμωνίας είναι κατά μέσο όρο 5.1 mg/L (σχήμα 8.7), αν και το ολικό άζωτο ξεπερνά ελάχιστα το όριο (σχήμα 8.6). Στους $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ οι τιμές και των δύο παραμέτρων υποδηλώνουν ότι οι αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί του συστήματος είναι ανίκανοι να πραγματοποιήσουν οποιαδήποτε διεργασία νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τη μεταβολή της παροχής εισόδου.

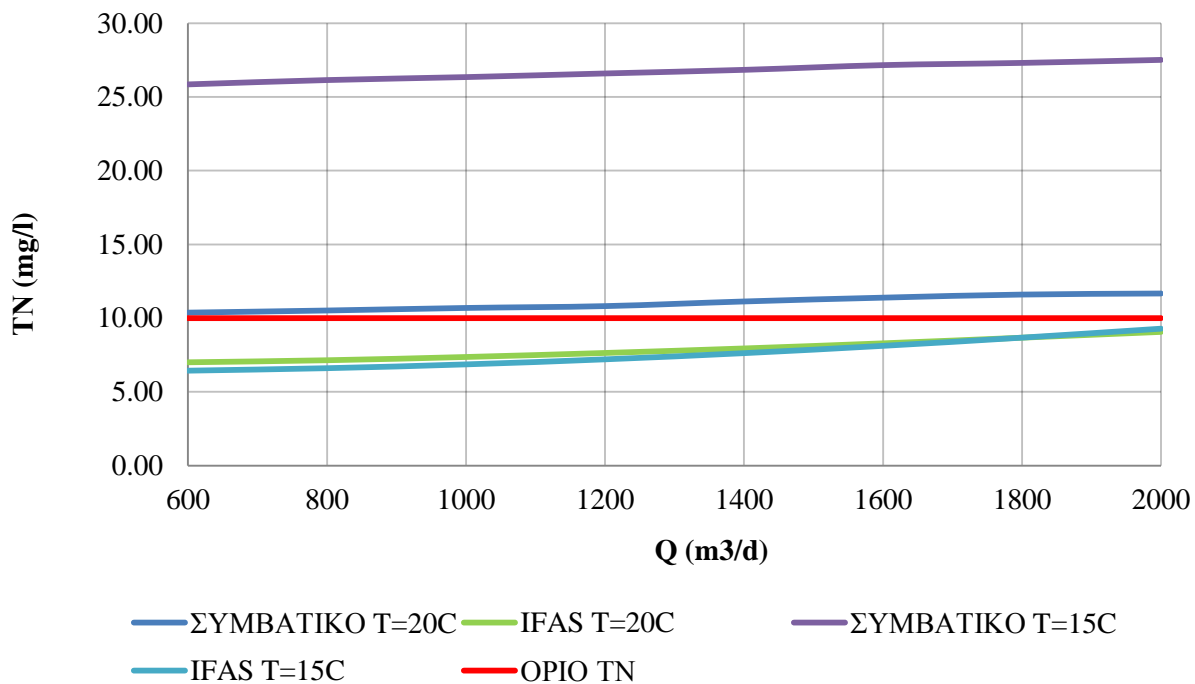
Αντίθετα, το σύστημα MBBR/IFAS έχει τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Όπως φαίνεται από το σχήμα 8.6, η συγκέντρωση του ολικού αζώτου παραμένει εντός των θεσμοθετημένων ορίων και παρουσιάζει παράλληλη αύξηση με την αύξηση της παροχής εισόδου. Αντίστοιχα αποτελέσματα εξάγονται και για το αμμωνιακό άζωτο. Αναλυτικότερα, η συγκέντρωσή του

ξεπερνά περίπου κατά 1mg/L την Ευρωπαϊκή οδηγία όταν η παροχή εισόδου αυξηθεί κατά 100%, ενώ σε σύγκριση με το συμβατικό είναι μειωμένη κατά 3.5 mg/L και κατά 22 mg/L για τους 20 °C και για τους 15 °C αντίστοιχα. Γενικά συμπεραίνεται ότι, και για τις δύο θερμοκρασίες, το σύστημα MBBR/IFAS λειτουργεί οριακά από $Q = 1400 - 1700 \text{ m}^3/\text{d}$ και από εκεί και έπειτα αστοχεί λόγω αμμωνιακού αζώτου (σχήμα 8.7). Η καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος MBBR/IFAS σε μικρούς χρόνους παραμονής στερεών και χαμηλές θερμοκρασίες οφείλεται στους αυτοτροφικούς μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται στους βιοφορείς, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια.

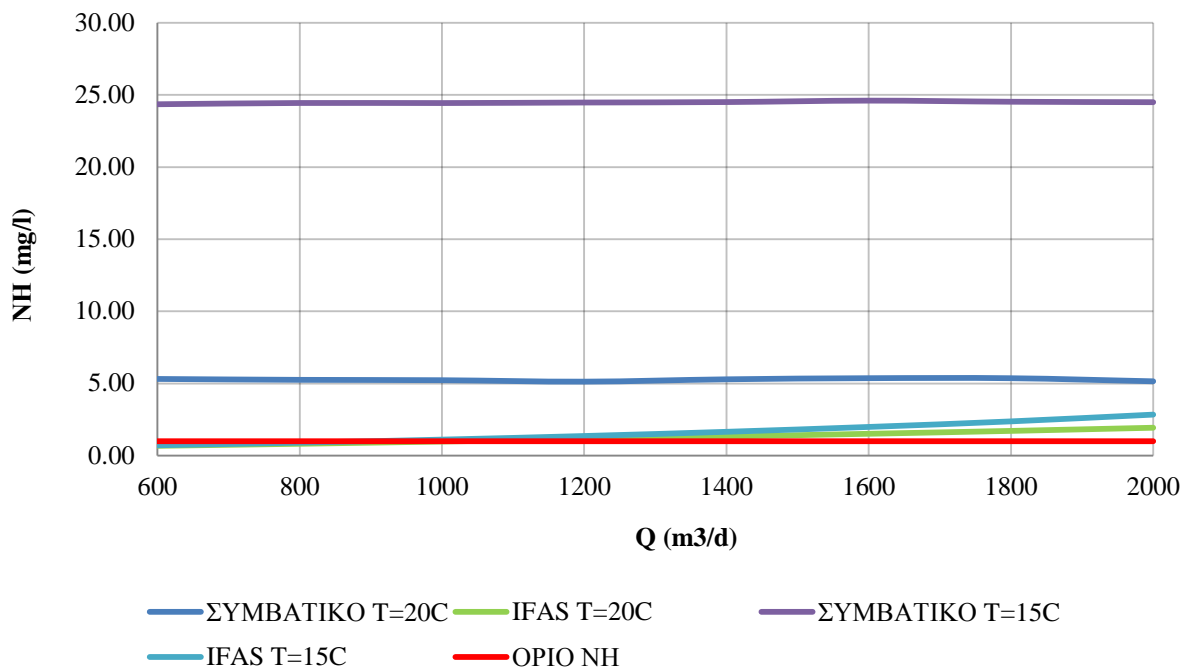
Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, όλα τα υπόλοιπα μεγέθη αυξάνονται με την αύξηση της παροχής και τη μείωση της θερμοκρασίας, αλλά παραμένουν εντός των θεσμοθετημένων ορίων. Το COD (σχήμα 8.9) παρουσιάζει μικρή διακύμανση λόγω συστήματος (είναι ελάχιστα αυξημένο στο MBBR/IFAS) και θερμοκρασίας, αλλά αυξάνεται σημαντικά (κατά 25 mg/L) για μεταβολή της παροχής κατά $1400 \text{ m}^3/\text{d}$. Το BOD της εκροής (σχήμα 8.10) έχει παρόμοια συμπεριφορά.

Τα ολικά στερεά της εξόδου (σχήμα 8.11) αυξάνονται και στα δύο συστήματα με τη μείωση της θερμοκρασίας, καθώς οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί επιτελούν καλύτερα τις διεργασίες τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, γίνεται φανερό ότι η συγκέντρωσή τους αυξάνεται και εξαιτίας των δύο συστημάτων. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και για τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στον αερόβιο αντιδραστήρα (σχήμα 8.8).

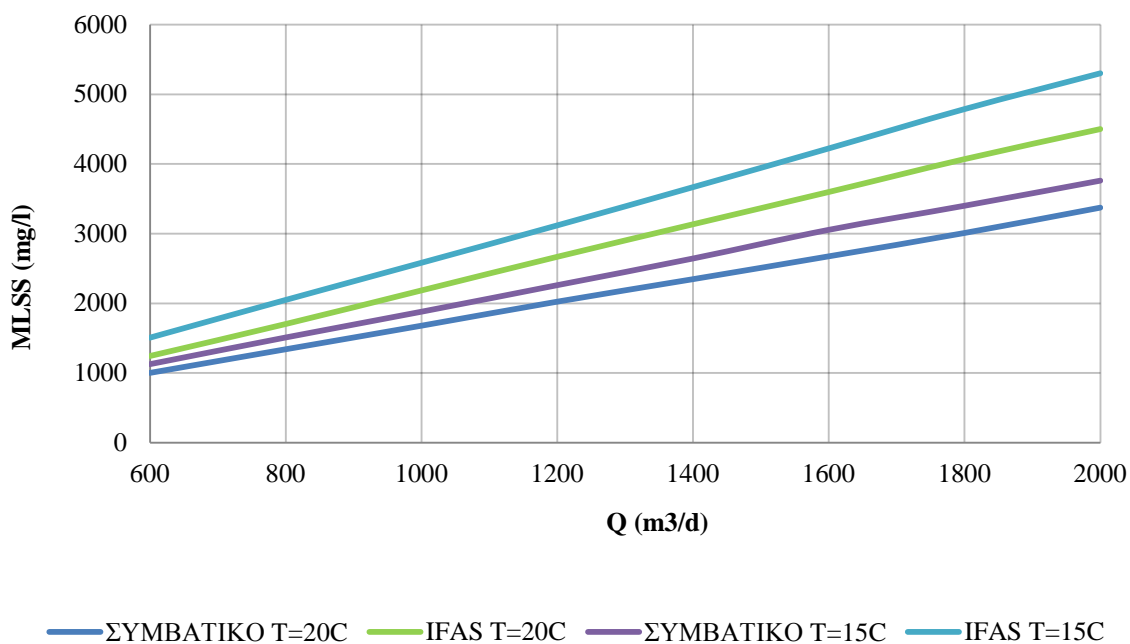
Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τη βελτίωση των διεργασιών της νιτροποίησης και απονιτροποίησης, το σύστημα MBBR/IFAS παράγει μικρότερη ποσότητα ιλύος (σχήμα 8.13).



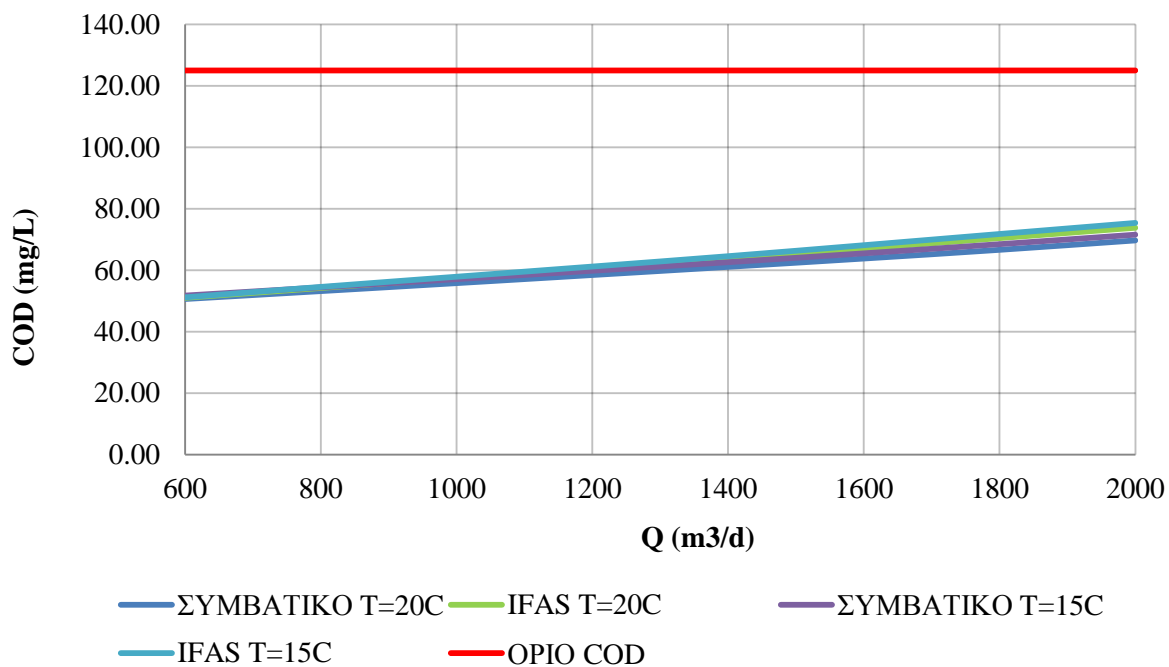
Σχήμα 8.7 Διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.



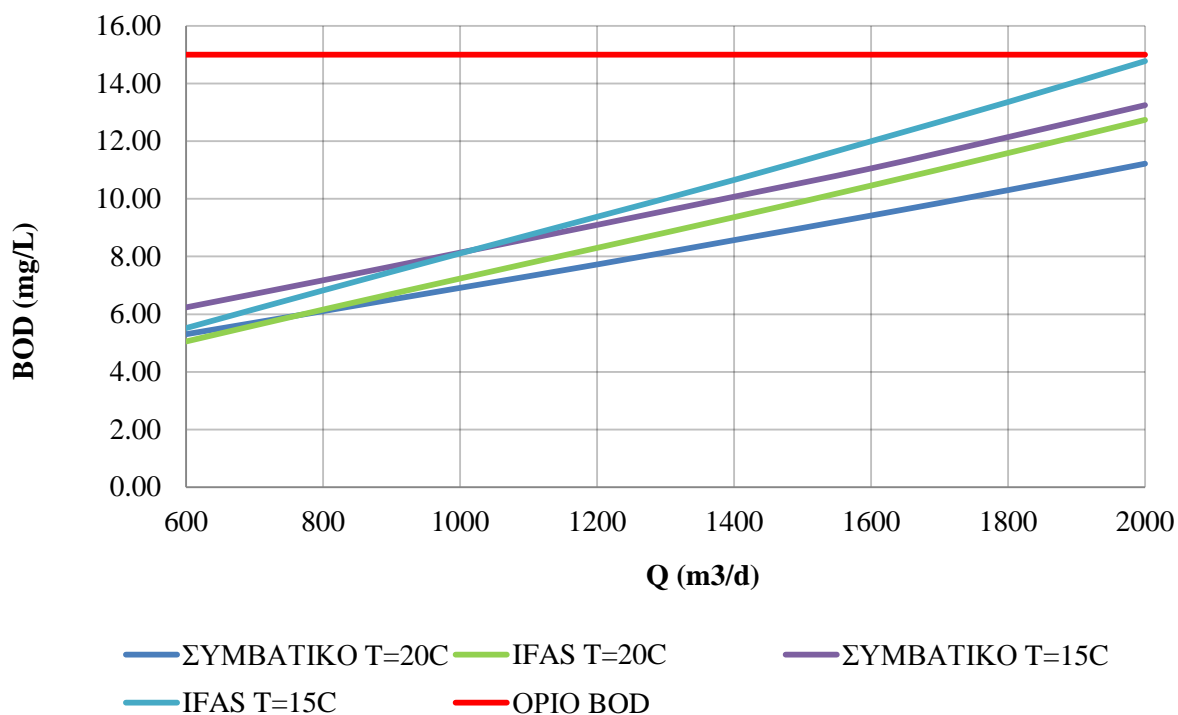
Σχήμα 8.8 Διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.



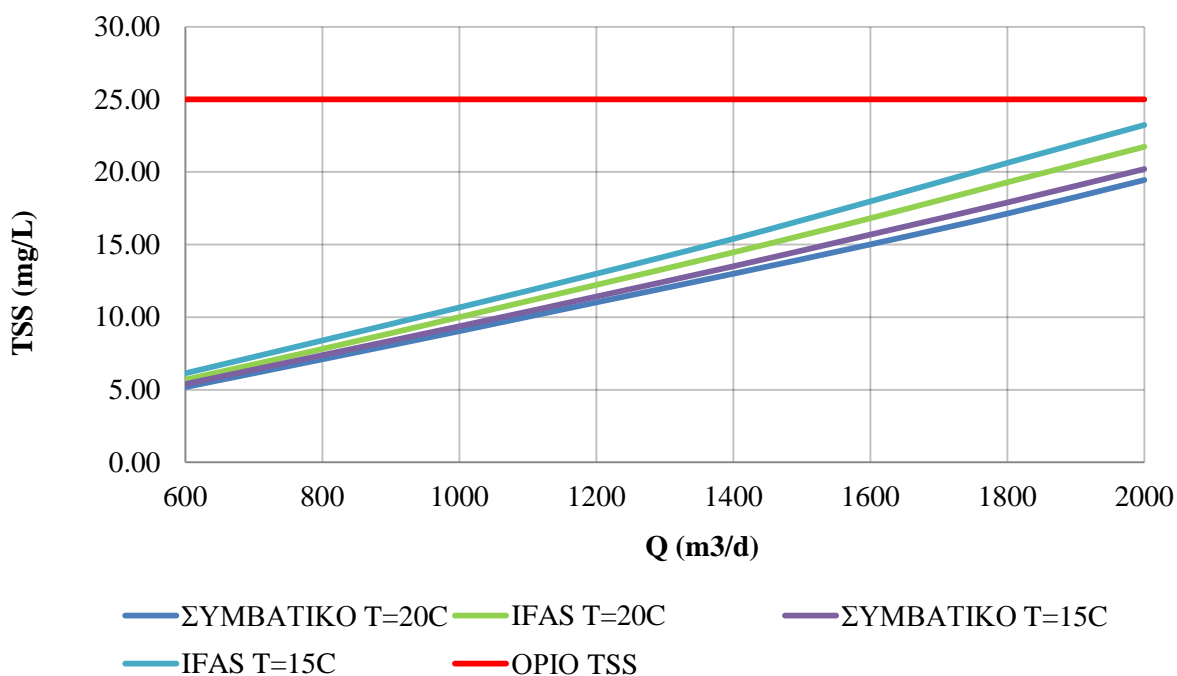
Σχήμα 8.9 Διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου αντιδραστήρα συναρτήσει της θερμοκρασίας, της παροχής εισόδου και του συστήματος.



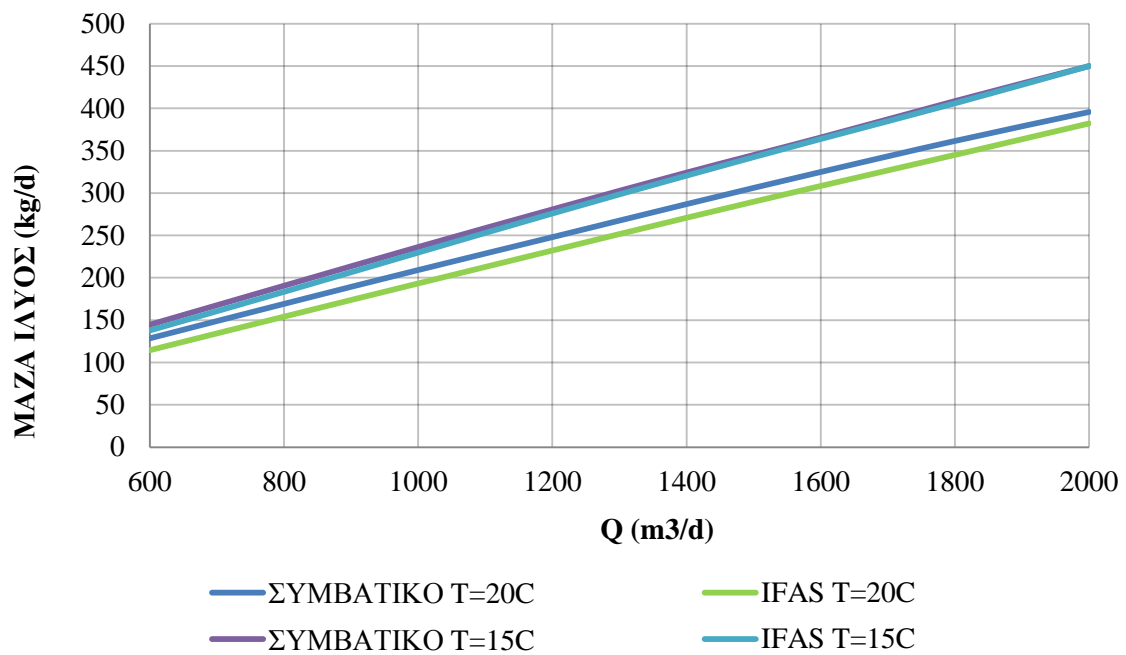
Σχήμα 8.10 Διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.



Σχήμα 8.11 Διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.



Σχήμα 8.12 Διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.



Σχήμα 8.13 Διακύμανση της μάζας της ιλύος στην έξοδο της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου.

9. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Σε αυτό το σκέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται έλεγχος απόκρισης ενός συμβατικού συστήματος και ενός συστήματος MBBR/IFAS σε δυναμική φόρτιση της παροχής εισόδου, αφού σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, τα λύματα εισέρχονται στις εγκαταστάσεις με μεταβαλλόμενη παροχή, η οποία επηρεάζεται από την ώρα της ημέρας.

Οι παρακάτω προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για $SRT = 5$ ημερών, $T = 25$ °C και μέση ημερήσια παροχή (παροχή αναφοράς) $Q = 1200$ m³/d. Στο σύστημα MBBR/IFAS, η προσομοίωση έγινε για solid support = 40%, specific surface area = 400 m²/m³ και biofilm density = 40000. Στον πίνακα 9.1 παρουσιάζονται οι ωριαίες διακυμάνσεις της παροχής εισόδου. Οι συγκεντρώσεις του οργανικού φορτίου παραμένουν σταθερές καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Πίνακας 9.1 Δεδομένα εισόδου για τη δυναμική φόρτιση.

Ωρα	Q (m ³ /h)	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	TSS (mg/L)	TN (mg/L)
0 έως 2η	50	650	280	300	43
3η έως 7η	35	650	280	300	43
8η έως 14η	50	650	280	300	43
15η έως 16η	80	650	280	300	43
17η έως 24η	50	650	280	300	43

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για δύο συστήματα ενεργού ιλύος, ένα συμβατικό και ένα MBBR/IFAS. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων μόνο του υβριδικού συστήματος, καθώς τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόκριση και των δύο συστημάτων δεν παρουσιάζει ουσιαστικές διαφορές (σχήμα 9.8).

Το σχήμα 9.1 δείχνει ότι η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου βιοαντιδραστήρα MBBR/IFAS παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, αφού στο διάστημα μιας ημέρας η μεταβολή της είναι περίπου 50 mg/L, αμελητέα σε σχέση με τη μέση τιμή της. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται και για τη ζήτηση σε οξυγόνο, του οποίου η μεταβολή είναι μικρότερη από 15 1/d (σχήμα 9.2).

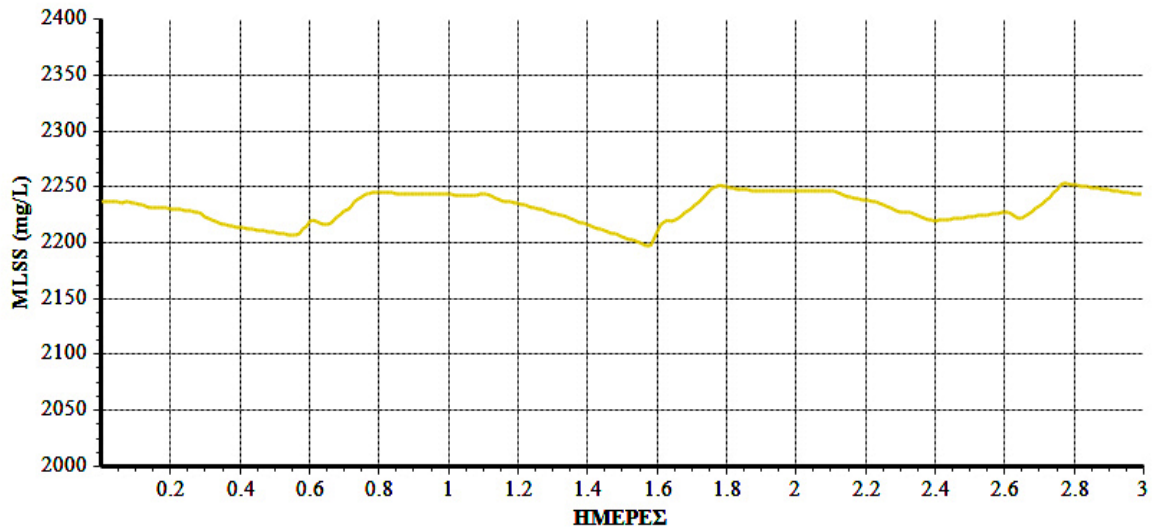
Αντιθέτως, η συγκέντρωση του COD της εκροής (σχήμα 9.3) παρουσιάζει σημαντική διακύμανση εξαιτίας της μεταβολής της παροχής εισόδου. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει ελάχιστο στα 56 mg/L και μέγιστο στα 67 mg/L. Μικρότερου μεγέθους μεταβολή εμφανίζει η συγκέντρωση του BOD (σχήμα 9.4), το οποίο κυμαίνεται από 6.3 mg/L έως 9.3 mg/L.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των δύο προαναφερθέντων συστατικών εμφανίζουν την ίδια μορφή.

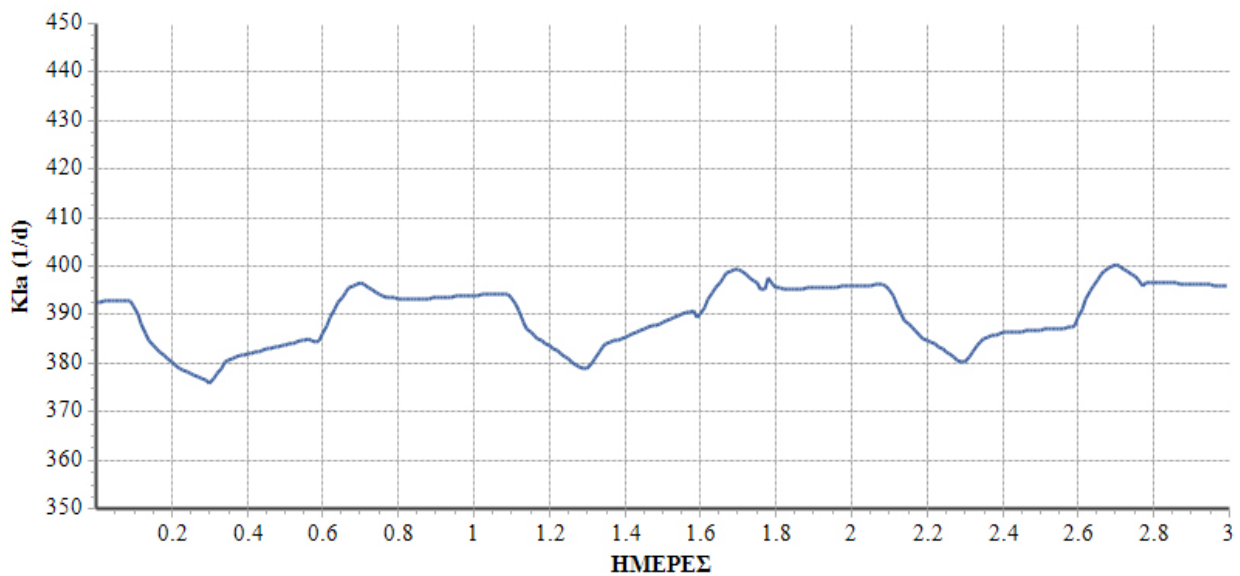
Παρόμοια μορφή με τα παραπάνω εμφανίζουν, επίσης, και τα ολικά στερεά της εξόδου, όπως φαίνεται και από το σχήμα 9.5. Η διακύμανση αυτού του συστατικού μπορεί να χαρακτηριστεί ως σημαντική, αφού το ελάχιστό του βρίσκεται περίπου στα 8.5 mg/L, ενώ το μέγιστό του στα 16.5 mg/L.

Η συγκέντρωση του ολικού αζώτου (σχήμα 9.6) εμφανίζει πιθανότατα τη μικρότερη διακύμανση από όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη, καθώς κυμαίνεται από τα 7.7 mg/L έως τα 8.7 mg/L περίπου. Αντίθετα, το αμμωνιακό άζωτο της εκροής (σχήμα 9.7) παρουσιάζει διακύμανση της τάξεως των 2 mg/L, με το μέγιστό του να ξεπερνά τα θεσμοθετημένα όρια, παρά το γεγονός ότι το σύστημα λειτουργεί κάτω από ευνοϊκές συνθήκες (όσον αφορά τη θερμοκρασία των λυμάτων) και το γεγονός ότι υπάρχει πλεονάζουσα βιομάζα πάνω στους βιοφορείς.

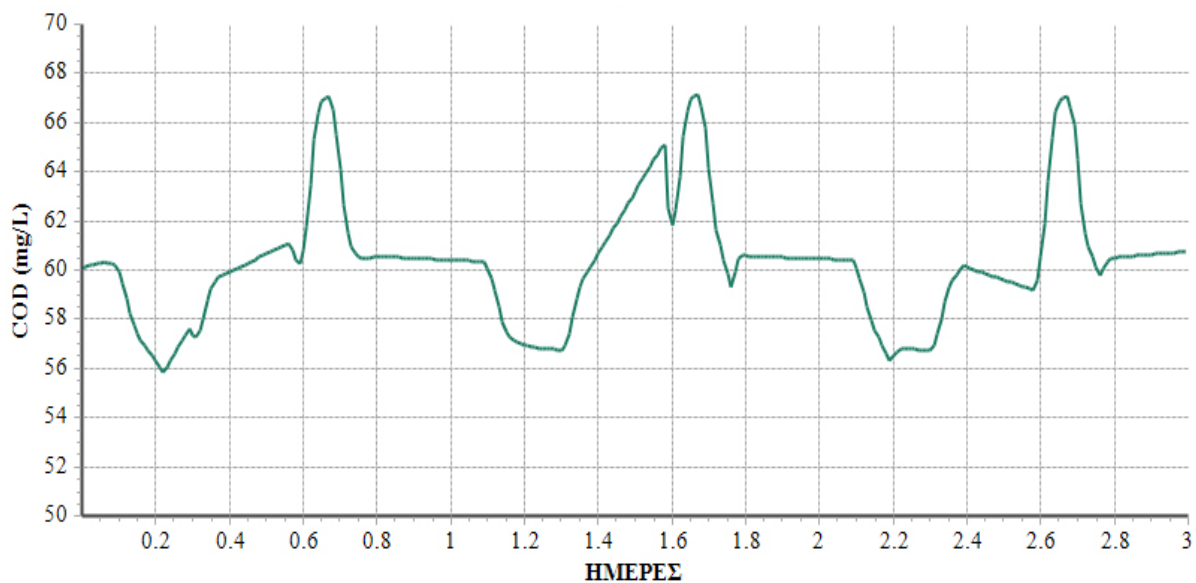
Σημειώνεται ότι όλες οι συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων μεγεθών, εκτός των εξαιρέσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω, βρίσκονται εντός των θεσμοθετημένων ορίων που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για τη διάθεση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων σε ευαίσθητους αποδέκτες.



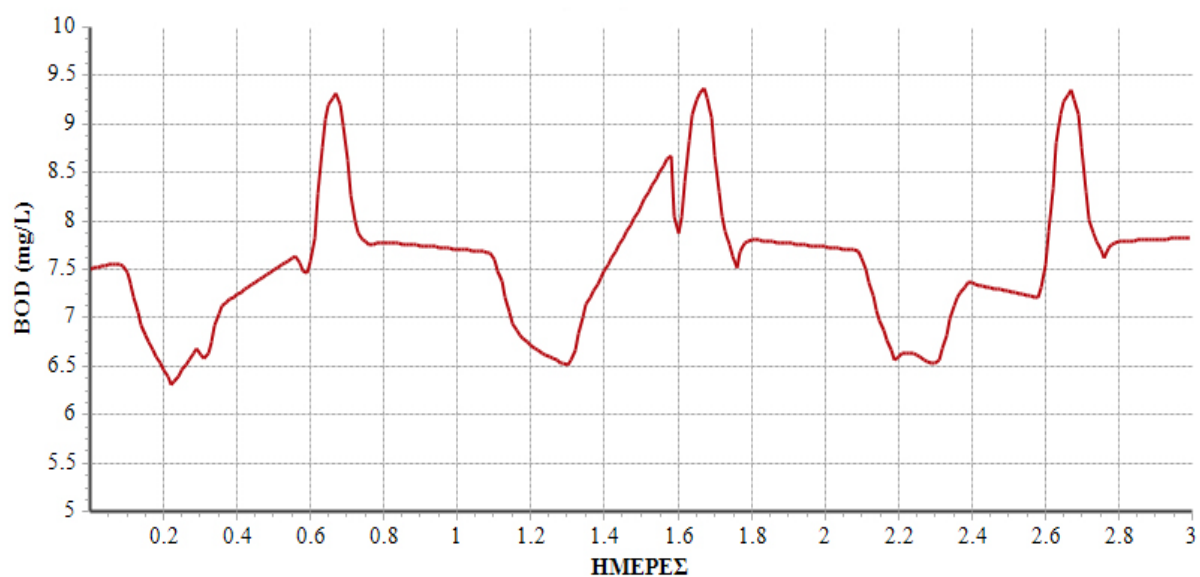
Σχήμα 9.1 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.



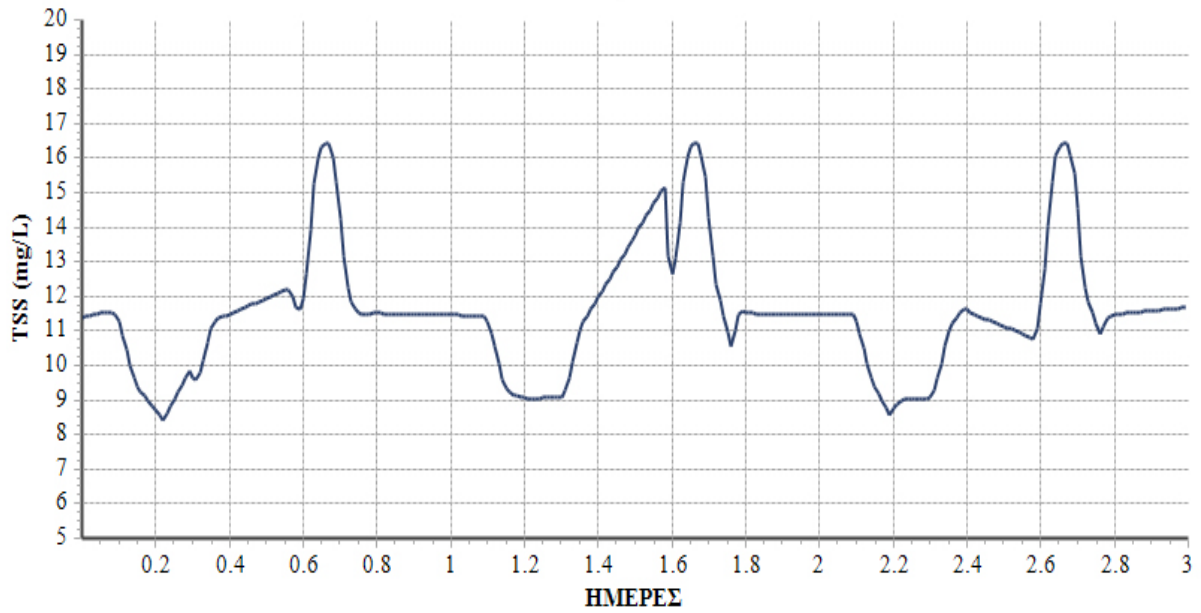
Σχήμα 9.2 Ωριαία διακύμανση της ζήτησης σε οξυγόνο στο βιολογικό αντιδραστήρα ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.



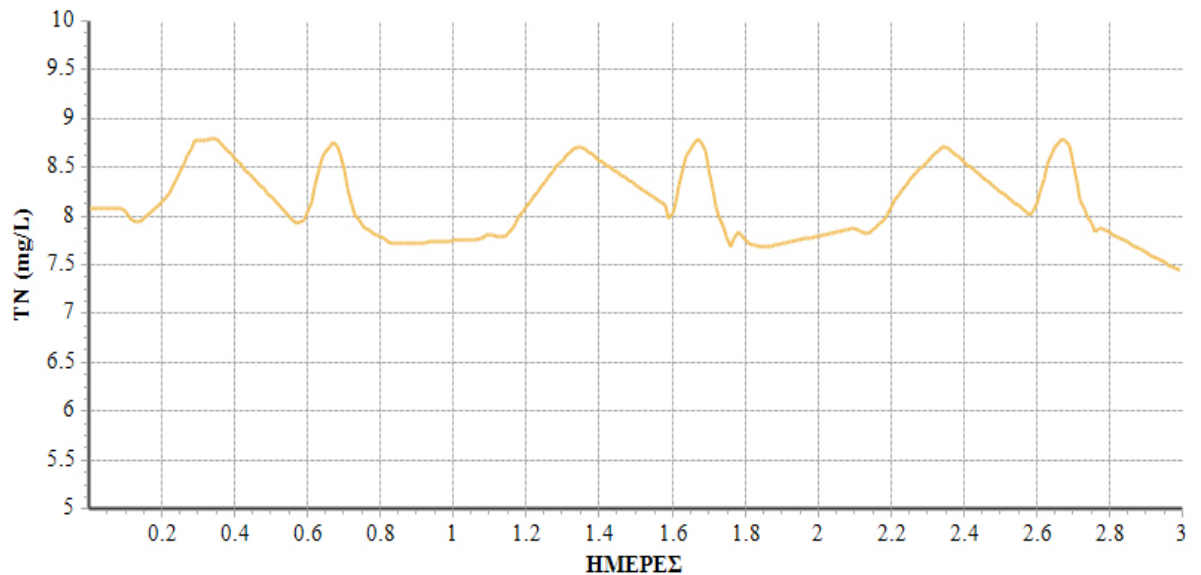
Σχήμα 9.3 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του COD της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.



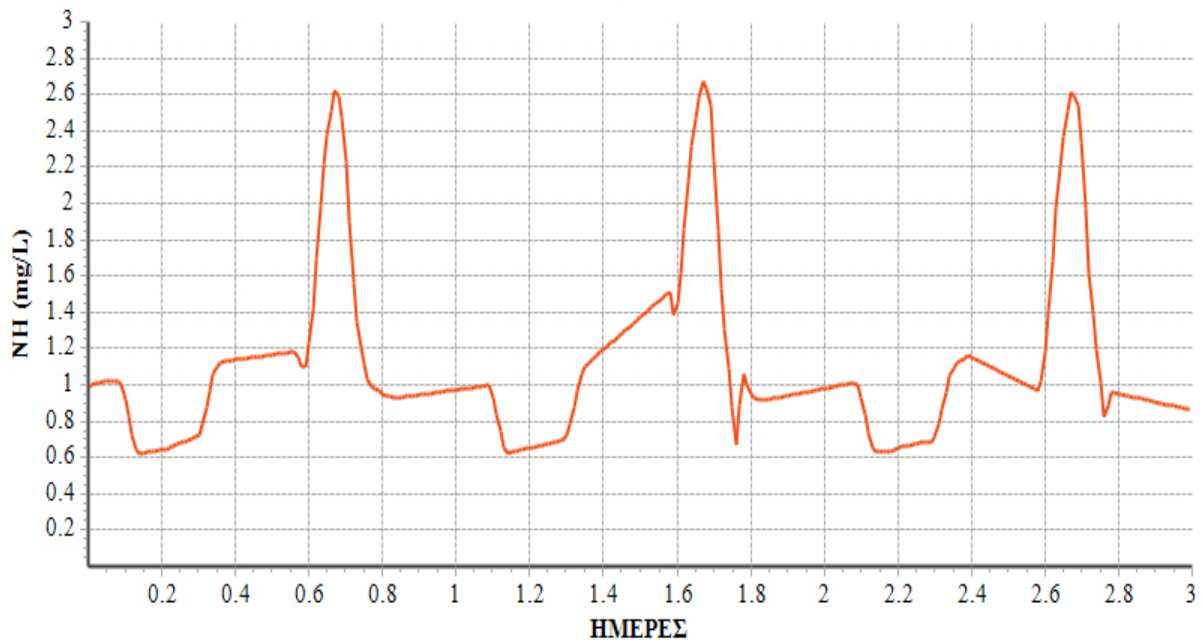
Σχήμα 9.4 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του BOD της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.



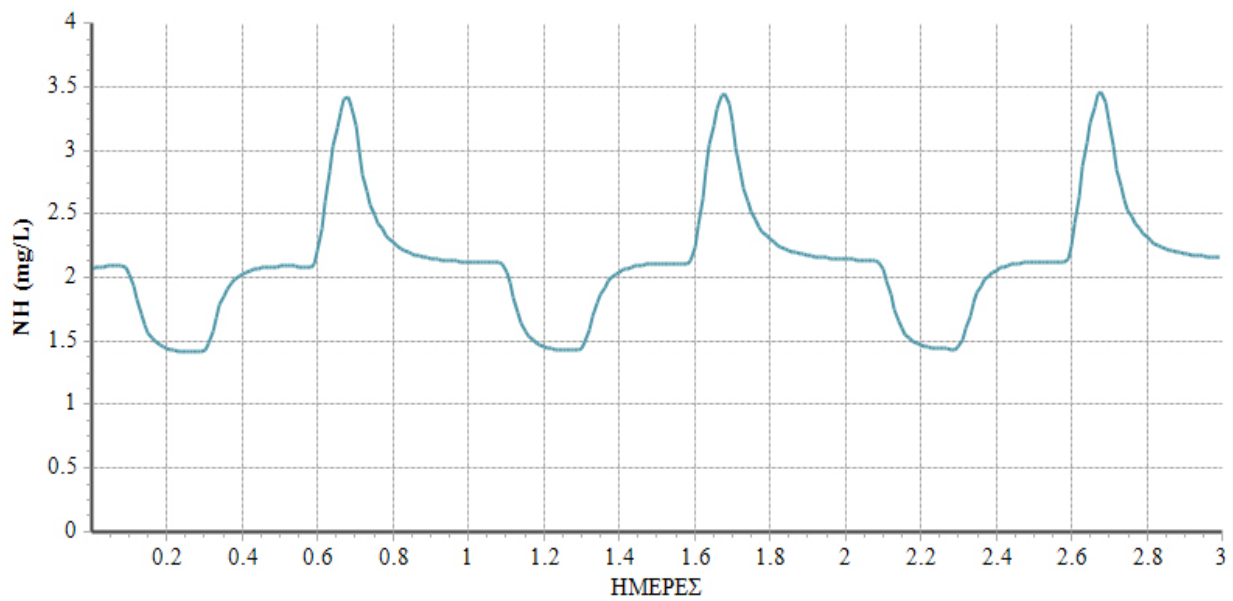
Σχήμα 9.5 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών στερεών της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.



Σχήμα 9.6 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.



Σχήμα 9.7 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής ενός συστήματος MBBR/IFAS σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.



Σχήμα 9.8 Ωριαία διακύμανση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου της εκροής ενός συμβατικού συστήματος σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παροχής εισόδου.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μπορούν να χωριστούν σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος, περιγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που αφορούν την ανάλυση ευαισθησίας δύο εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, μιας συμβατικής και μιας υβριδικής, στην οποία ο αερόβιος βιολογικός αντιδραστήρας έχει πληρωθεί ως ένα ποσοστό με βιοφορείς (σύστημα MBBR/IFAS). Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η απόκριση των συστημάτων για ένα εύρος τιμών του χρόνου παραμονής στερεών (SRT), μεταβάλλοντας κάποιες στοιχειομετρικές και κινητικές μεταβλητές. Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν και στα δύο συστήματα 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), ενώ στο σύστημα MBBR/IFAS ελέγχθηκε επιπλέον η επίδραση του solid support, του specific surface area και του biofilm density. Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν σε κάθε ένα από τα σενάρια ήταν η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα (MLSS), η συγκέντρωση των COD και BOD στην έξοδο, η συγκέντρωση των ολικών στερεών στην εκροή (TSS) και οι συγκεντρώσεις αζώτου στην εκροή τόσο του ολικού (TN) όσο και του αμμωνιακού (NH_4-N). Τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσης εργασίας αναπτύσσονται στις επόμενες σελίδες.

Καταρχάς, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι το WEST είναι ένα λογισμικό με πολλές δυνατότητες, το οποίο λειτουργεί ικανοποιητικά στην προσομοίωση συμβατικών μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων. Ωστόσο, σε πιο περίπλοκες μαθηματικές προσομοιώσεις αδυνατούσε να ανταπεξέλθει πλήρως στις απαιτήσεις του χρήστη, όπως στην προσομοίωση των συστημάτων MBBR/IFAS για μεγάλες παροχές και συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωσή του για να μπορέσει να φτάσει το μέγιστο των δυνατοτήτων του.

Με βάση τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας για τις προαναφερθείσες στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους, αυτή που επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, μ_{maxA} . Πιο συγκεκριμένα, επηρεάζεται η διεργασία της νιτροποίησης, όπως είναι αναμενόμενο. Η διεργασία αυτή σχετίζεται με τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών, των νιτρικών και του ολικού αζώτου στην εκροή.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι παράμετροι του συστήματος MBBR/IFAS, solid support και biofilm density, επιδρούν θετικά κυρίως στις διεργασίες που αναφέρονται στο άζωτο των λυμάτων.

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

- **MLSS:** Η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στο βιολογικό αντιδραστήρα εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής στερεών και το συντελεστή παραγωγής ετεροτροφικής βιομάζας. Είναι ανάλογη αυτών των μεταβλητών και πρακτικά ανεξάρτητη από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης τόσο της ετεροτροφικής όσο και της αυτοτροφικής βιομάζας. Παρατηρείται ότι όλοι οι εξεταζόμενοι συντελεστές έχουν την ίδια επίδραση στη συγκέντρωση των MLSS και στα δύο συστήματα. Επίσης, στο σύστημα MBBR/IFAS, σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση παρατηρήθηκε αυξημένη συγκέντρωση των MLSS της τάξεως των 1000 mg/L σε σχέση με το συμβατικό, γεγονός που οφείλεται στην αποκόλληση τμήματος της βιομάζας που αναπτύσσεται στους βιοφορείς. Τέλος, σε όλα σχεδόν τα σενάρια που εξετάστηκαν, η συγκέντρωση τους είναι εντός των συμβατικών ορίων για την ομαλή και οικονομική λειτουργία του αερισμού ($2000 < \text{MLSS} < 5000$). Σημειώνεται ότι το σύστημα MBBR/IFAS έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε αερισμό.
- **BOD:** Η συγκέντρωση του BOD της εκροής επηρεάζεται κυρίως από το χρόνο παραμονής στερεών και σε μικρότερο βαθμό, από το συντελεστή παραγωγής και το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής παραγωγής της ετεροτροφικής βιομάζας προκαλεί μεταβολή της τάξεως του 18.5% ($\text{SRT} = 15$ ημέρες) και ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας μεταβολή περίπου 30%. Η μεταβολές αυτές είναι παρόμοιες και στα δύο συστήματα. Για τους υπόλοιπους εξεταζόμενους συντελεστές παρατηρείται ότι η επίδρασή τους είναι σχεδόν αμελητέα. Συγκρίνοντας τα δύο συστήματα, το BOD στο MBBR/IFAS είναι αυξημένο σε σχέση με το συμβατικό. Σημειώνεται ότι σε κάθε εξεταζόμενο σενάριο, η τιμή της συγκέντρωσης του ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων.
- **COD:** Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια η εγκατάσταση λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής οδηγίας. Η συγκέντρωση του COD στην έξοδο της εγκατάστασης εξαρτάται κυρίως από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας και σε μικρότερο βαθμό από το χρόνο παραμονής στερεών. Επίσης, ο

συντελεστής $\mu_{\max H}$ μεταβάλλει τη συγκέντρωση του COD κατά περίπου 6.5% και στα δύο συστήματα. Όλοι οι υπόλοιποι εξεταζόμενοι συντελεστές, προκαλούν αμελητέες μεταβολές. Ωστόσο, παρατηρήθηκε, ότι στο συμβατικό σύστημα, η συγκέντρωσή του είναι μειωμένη σε σχέση με το σύστημα MBBR/IFAS.

- TSS: Η εγκατάσταση πληροί τις απαιτήσεις της οδηγίας σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, ενώ η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών στην εκροή δεν επηρεάζεται πρακτικά από καμία από τις μεταβλητές που εξετάστηκαν και δε μεταβάλλεται ιδιαίτερα ανάμεσα στα δύο συστήματα, με την εξαίρεση του συντελεστή ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας, ο οποίος σε μικρούς χρόνους παραμονής στερεών προκαλεί μεταβολή της τάξεως του 15%.
- TN: Το ολικό άζωτο έχει παρόμοια συμπεριφορά με το αμμωνιακό, αφού και αυτό επηρεάζεται κυρίως από το χρόνο παραμονής στερεών και το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας και εμφανίζει μικρότερες συγκεντρώσεις στο σύστημα MBBR/IFAS. Στο συμβατικό σύστημα, η μεταβολή του είναι της τάξεως του 76%, ενώ στο σύστημα MBBR/IFAS είναι 26%, γεγονός που καθιστά το δεύτερο σύστημα πιο σταθερό σε σχέση με το πρώτο. Σημειώνεται, επίσης, ότι για μικρές τιμές του SRT και του συντελεστή $\mu_{\max A}$, το συμβατικό σύστημα αστοχεί. Όλοι οι υπόλοιποι συντελεστές δεν προκαλούν ουσιαστικά καμία μεταβολή.
- $\text{NH}_4\text{-N}$: Στο συμβατικό σύστημα, στο πλαίσιο των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι για χρόνο παραμονής στερεών μέχρι και 10 ημέρες δεν πραγματοποιείται νιτροποίηση και η εγκατάσταση βρίσκεται εκτός των συμβατικών ορίων. Η κατάσταση βελτιώνεται αισθητά για μεγαλύτερες τιμές του SRT και του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης της αυτοτροφικής βιομάζας $\mu_{\max A}$. Αναλυτικότερα, ο συντελεστής $\mu_{\max A}$ προκαλεί μεταβολή (μείωση) στη συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου μεγαλύτερη από 92%, ενώ στο σύστημα MBBR/IFAS η μεταβολή αυτή είναι μικρότερη περίπου κατά 10%. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο τελευταίο, η συγκέντρωση της αμμωνίας επηρεάζεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20% και από το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι στο σύστημα MBBR/IFAS, για όλα σχεδόν τα σενάρια, η εγκατάσταση λειτουργεί εντός των ορίων ή οριακά.

Το δεύτερο μέρος των εφαρμογών αφορούσε τη σύγκριση ενός συστήματος MBBR/IFAS και ενός συμβατικού, μέσω του ελέγχου της επάρκειας τους. Η προσομοίωση έγινε για δύο

συστήματα, ένα παρατεταμένου αερισμού και ένα συμβατικό. Πραγματοποιήθηκαν δύο έλεγχοι, όπου ο ένας αφορούσε τη λειτουργία των εγκαταστάσεων για τα μεγέθη σχεδιασμού και ο άλλος έλεγχε την ικανότητα τους να ανταπεξέλθουν σε δυσμενή χρόνο παραμονής στερεών και χαμηλές θερμοκρασίες. Οι έλεγχοι αυτοί έδειξαν ότι οι κρισιμότεροι παράγοντες αστοχίας είναι η φόρτιση στερεών στη δεξαμενή καθίζησης και το άζωτο της εκροής. Αναλυτικότερα, στην πρώτη περίπτωση το συμβατικό σύστημα αστόχησε εξαιτίας της αύξησης της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών της εκροής για παροχή εισόδου $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{d}$, η οποία με τη σειρά της προκλήθηκε από υπερβολική φόρτιση της δεξαμενής καθίζησης με στερεά.

Στη δεύτερη περίπτωση, φάνηκε η αδυναμία του συστήματος να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε διεργασία σχετική με τους αυτοτροφικούς μικροοργανισμούς. Παρατηρήθηκε, λοιπόν, ότι οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού και του ολικού αζώτου είχαν ξεπεράσει τα όρια για ευαίσθητους αποδέκτες ακόμα και κατά 23 mg/L . Αντίθετα, το σύστημα MBBR/IFAS δεν αστόχησε σχεδόν σε κανένα σενάριο. Αποδείχτηκε ότι μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά δεχόμενο το διπλάσιο υδραυλικό φορτίο σχεδιασμού και ότι η πρόσθετη βιομάζα των βιοφορέων συνεισφέρει ουσιαστικά στην πραγματοποίηση των βιολογικών διεργασιών απομάκρυνσης του αζώτου.

Στο τρίτο μέρος των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε έλεγχος απόκρισης της εγκατάστασης σε δυναμική φόρτιση, κατά τον οποίο ελέγχθηκε η ημερήσια διακύμανση των μεταβλητών της εκροής, των αιωρούμενων στερεών του αερόβιου βιοαντιδραστήρα και της ζήτησης σε οξυγόνο για ωριαία μεταβολή της παροχής εισόδου. Παρατηρήθηκε ότι τα δύο εξεταζόμενα συστήματα δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές ούτε στο μέγεθος της διακύμανσης, αλλά ούτε και στη μορφή της. Επίσης, φάνηκε ότι οι μεγαλύτερες διαφορές στο χρονικό διάστημα της μιας ημέρας παρουσιάζονται στις συγκεντρώσεις των ολικών στερεών (TSS), του COD και κυρίως, του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4\text{-N}$ ή NH) της εκροής, το οποίο στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας βρίσκεται εκτός των θεσμοθετημένων ορίων. Τη μικρότερη διακύμανση παρουσίασε το ολικό άζωτο της εξόδου (1 mg/L).

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα υβριδικά συστήματα MBBR/IFAS παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος. Ένα από τα σπουδαιότερα είναι η δυνατότητα να λειτουργούν ικανοποιητικά σε μικρούς χρόνους παραμονής στερεών και χαμηλές θερμοκρασίες, χωρίς να επηρεάζονται ιδιαίτερα οι

διεργασίες που αφορούν το άζωτο των λυμάτων. Ένα άλλο πλεονέκτημα σε σχέση με τα συμβατικά είναι η ικανότητα να δέχονται το διπλάσιο υδραυλικό φορτίο χωρίς να αστοχούν. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι παράγουν μικρότερες ποσότητες ιλύος, γεγονός που τα καθιστά οικονομικά συμφέροντα.

11. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1) Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ. . (n.d.). *Περιγραφή Μοντέλου IAWQ*.
- 2) Ανδρεαδάκης Ανδρέας. (1986). *Εγκαταστάσεις επεξεργασίας και διάθεσης αστικών αποβλήτων*. Αθήνα.
- 3) Ανδρεαδάκης Ανδρέας. (2009). *Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και ιλύων*. Αθήνα.
- 4) Alexander, W.V., Ekama, G.A., Marais, G.v.R. (1980). The activated sludge process Part 2 – Application of the general kinetic model to the contact stabilization process. *Wat. Res.*, 14, 1737-1747.
- 5) Barker, P.S., Dold, P.L. (1997). General model for biological nutrient removal activated sludge systems: Model presentation. *Wat. Environ. Res.*, 69, 969-984.
- 6) Calderón, K., Martín-Pascual, J., Poyatos, J.M., Belén Rodelas, B., Alejandro González-Martínez, A., González-López, J., 2012. Comparative analysis of the bacterial diversity in a lab-scale moving bed biofilm reactor (MBBR) applied to treat urban wastewater under different operational conditions, *Bioresource Technology*, (121), pp. 119-126.
- 7) Casey, T.G., Ekama, G.A., Wentzel, M.C., Marais, G.v.R. (1994). An hypothesis for the causes and control of F/M filamentous organism bulking in nitrogen (N) and nutrient (N & P) removal activated sludge systems. *Wat. Sci. Tech.*, 29(7), 203-2012.
- 8) DHI, WEST Tutorial, 2012.
- 9) Dold, P.L., Ekama, G.A., Marais, G.v.R. (1980). A general model for the activated sludge process. *Prog. Wat. Tech.*, 12(6), 47-77.
- 10) Dold, P.L., Wentzel, M.C., Billing, A.E., Ekama, G.A., Marais, G.v.R. (1991). *Activated sludge simulation programs: Nitrification and nitrification/denitrification systems* (version 1.0). Water Research Commission, PO Box 824, Pretoria 0001, South Africa. TT 52/91, ISBN 0 947.
- 11) Gabb, G.M.D., Still, D.A., Ekama, G.A., Jenkins, D., Marais, G.v.R. (1991). The selector effect on filamentous bulking in long sludge age activated sludge system. *Wat. Sci. Tech.*, 23, 867-877.

- 12) Gujer, W., Larsen, T.A. (1995). The implementation of biokinetics and conservation principles in ASIM. *Wat. Sci. Tech.*, 31(2), 257-266.
- 13) Gernaey, K.V., Van Loosdrecht, M.C.M., Mogens Henze M., Jorgensen, S.B. (2004). Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art. *Env. Modelling & Software*, 19, 763-783.
- 14) Gujer, W., Henze, M. (1991). Activated sludge modelling and simulation. *Wat. Sci. Tech.*, 23, 1011-1023.
- 15) Gujer, W., Henze, M., Mino, T., van Loosdrecht, M.C.M. (1999). Activated Sludge Model No. 3. *Wat. Sci. Tech.*, 39(1), 183-193.
- 16) Henze, M., Grady, C.P.L. Jr., Gujer, W., Marais, G.v.R., Matsuo, T. (1987). *Activated Sludge Model No. 1*. IAWQ Scientific and Technical Report No. 1, London, UK.
- 17) Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C.M., Marais, G.v.R. (1995). *Activated Sludge Model No. 2*. IAWQ Scientific and Technical Report No. 3, London, UK.
- 18) Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C.M., Marais, G.v.R., van Loosdrecht, M.C.M. (1999). *Activated Sludge Model No. 2d. ASM2D*. *Wat. Sci. Technol.*, 39(1), 165-182.
- 19) Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., van Loosdrecht, M.C.M. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. ASM2D*. IAWQ Scientific and Technical Report No. 9, London, UK.
- 20) Hu, Z., Wentzel, M.C., Ekama, G.A. (2007a). A general model for biological nutrient removal activated sludge systems – Model development. *Biotech. Bioeng.*, 98(6), 1242-1258.
- 21) Hulsbeek, J.J.W., Kruit, J., Poelevelde, P.J., van Loosdrecht, M.C.M. (2002). A practical protocol for dynamic modelling of activated sludge systems. *Wat. Sci. Tech.*, 45(6), 127-136.
- 22) IWA. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA.

- 23) Manninaa, G., Trapania, D.D., Viviania, G., Ødegaardb, H., 2011. Modelling and dynamic simulation of hybrid moving bed biofilm reactors: Model concepts and application to a pilot plant, *Biochemical Engineering Journal*, (56), pp. 23-36.
- 24) Jeppsson Ulf. (n.d.). A General Description of the IAWQ Activated Sludge Model No. 1.
- 25) Rieger, L., Koch, G., Kuhni, M., Gujer, W., Siegrist, H. (2001). The EAWAG bio-P module for activated sludge model No. 3. *Wat. Sci. Tech.*, 35, 3387-3903.
- 26) Rosso, D., Lothman, S.E., Matthew K. Jeung, M.K., Pitt, P., Gellner, W.J., Stone, A.J., Howard, D., 2011. Oxygen transfer and uptake, nutrient removal, and energy footprint of parallel full-scale MBBR/IFAS and activated sludge processes, *Water Research*, (45), pp. 5987-5996.
- 27) Shore, J.L., M'Coy, W.S., Gunsch, C.K., Deshusses, M.A., 2012. Application of a moving bed biofilm reactor for tertiary ammonia treatment in high temperature industrial wastewater, *Bioresource Technology*, (112), pp. 51-60.
- 28) Smolders, G.L.F., van der Meij, J., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J. (1994). Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process. *Biotech. Bioeng.*, 44, 837-848.
- 29) Smolders, G.L.F. (1995). A metabolic model of the biological phosphorus removal: stoichiometry, kinetics and dynamic behavior. PhD Thesis. Delft University of Technology.
- 30) van Haandel, A.C., Ekama, G.A., Marais, G.v.R. (1981). The activated sludge process Part 3 – Single sludge denitrification. *Wat. Sci. Tech.*, 15(10), 1135-1152.
- 31) Wang, X.J., Xia, S.Q., Chen, L., Zhao, J.F., Renault, N.J., Chovelon, J.M., 2006. Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor, *Process Biochemistry*, (41), pp. 824-828.
- 32) Warner, A.P.C., Ekama, G.A., Marais, G.v.R. (1986). The activated sludge process Part 4 – Application of the general kinetic model to anoxic- aerobic digestion of waste activated sludge. *Wat. Sci. Tech.*, 20(8), 943-958.

- 33) Wentzel, M.C., Loewenthal, R.E., Ekama, G.A., Marais, G.v.R. (1988). Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems-Part 1: Enhanced culture development. *Water SA*, 14(2), 81-92.
- 34) Wentzel, M.C., Ekama, G.A., Loewenthal, R.E., Dold, P.L., Marais, G.v.R. (1989a). Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems-Part II: Experimental behaviour. *Water SA*, 15(2), 71-88.
- 35) Wentzel, M.C., Dold, P.L., Ekama, G.A., Marais, G.v.R. (1989a). Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems-Part III: Kinetic model. *Water SA*, 15(2), 89-102.
- 36) Wild, D., Schulthess, R.V., Gujer, W. (1994). Synthesis of denitrification enzymes in activated sludge; modelling with structured biomass. *Wat. Sci. Tech.*, 30(6), 113-122.