



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΔΥΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Καλλιόπη Σαΐτα

Επιβλέπων: Καθηγητής Α. Ανδρεαδάκης

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΔΥΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Καλλιόπη Σαΐτα

Επιβλέπων: Καθηγητής Α. Ανδρεαδάκης

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ανδρέα Ανδρεαδάκη για την συμβολή του στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, με την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Όπως επίσης και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο για την καθοδήγηση του στα διάφορα στάδια υλοποίησης της. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γεράσιμο Φραγκισκάτο για τις συμβουλές του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Παναγιώτη Δημητριάδη και την υποψήφια διδάκτορα Θεανώ Ηλιοπούλου για την καθοδήγηση τους στο στάδιο της ανάλυσης ευαισθησίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε παγκόσμιο επίπεδο, αναγνωρίζεται η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος και απαιτούνται νέες μέθοδοι εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και προϊόντων που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Αυτή η τάση τα τελευταία χρόνια έχει σημαντική επίδραση στις μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων, καθώς κατευθύνεται από μεθόδους που αποσκοπούν στην απομάκρυνση των λυμάτων σε μεθόδους που αποσκοπούν στην εκμετάλλευση τους για παραγωγή ενέργειας. Ένα από τα συστήματα αυτά είναι το σύστημα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (HRAS) και συγκεκριμένα το στάδιο-A μιας διεργασίας A/B (προσρόφησης / βιο-οξείδωσης). Η ιδέα είναι να αφαιρεθεί η οργανική ύλη μέσω προσρόφησης προκειμένου να παραχθούν μεγάλες ποσότητες ιλύος που μπορούν να μετατραπούν σε βιοαέριο με αναερόβια χώνευση (Schulze-Rettmer and Zuckut, 1998). Σύμφωνα με τον Thomas Nogaž (2015) το μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί θα αναφέρεται ως σύστημα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (HRAS). Στη μελέτη αυτή διεξήχθη μια ολοκληρωμένη ανάλυση ευαισθησίας με βάση τη μέθοδο Monte Carlo, όπου λαμβάνοντας υπόψη την τυχαία διακύμανση των παραμέτρων του μοντέλου, πραγματοποιείται επιλογή τιμών των παραμέτρων με ψευδοτυχαίο τρόπο μέσω μιας γκαουσιανής κατανομής πιθανότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, επισημαίνονται οι σημαντικότερες στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του μοντέλου και η ευαισθησία τους στις διακυμάνσεις των παραμέτρων. Το μοντέλο δίνει αποτελέσματα για τα πειραματικά δεδομένα από τους 5 κύκλους λειτουργίας που μετρήθηκαν από το πιλοτικό στην Ψυττάλεια και γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα. Τα συμπεράσματα από την προσομοίωση είναι πως αν το μοντέλο συγκριθεί ως προς το συνολικό COD που παράγει σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, δίνει σχετικά καλά αποτελέσματα. Η σύγκριση όμως των επιμέρους κλασμάτων του COD μεταξύ του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα, δίνει κάποιες αποκλίσεις όσον αφορά το διαλυτό, σωματιδιακό και κολλοειδές υπόστρωμα.

ABSTRACT

In a worldwide level, the need for environmental protection is recognized and demands new methods to exploit the renewable energy sources and products that can be reused. This tendency in recent years has a major influence on wastewater treatment methods, as it is directed from methods aimed at removing wastewater to methods that aim to exploit them for energy production. One of these systems is the High-rate Activated Sludge system (HRAS), and specifically the A-stage of an A/B (Adsorption / Bio-oxidation) process. The idea is to remove organics through adsorption in order to produce large amounts of waste sludge that can be converted to biogas by anaerobic digestion (Schulze-Rettmer and Zuckut, 1998). According to Thomas Nogaj (2015) the mathematical model which will be used is referred to as the A-stage high-rate activated sludge (HRAS). In this study a comprehensive sensitivity analysis based on Monte Carlo method was conducted, where taking into account the random fluctuation of model's parameters, parameter values are selected in a pseudo-random way through a normal probability distribution. According to the results the most important stoichiometric and kinetic parameters that affect model's results and their sensitivity to parameter fluctuations are highlighted. The model gives the results for the experimental data from the 5 operating cycles measured by the pilot in Psyttaleia and the results of the model are compared with the experimental data. The comparison of the model's total COD in relation to the experimental data, yields relatively good results. However, comparing the individual fractions of COD between the model and the experimental data gives some differences in the soluble, particulate and colloidal substrate.

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια επικρατεί η τάση της χρήσης μεθόδων επεξεργασίας λυμάτων που αποσκοπούν είτε στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είτε στην παραγωγή ενέργειας. Αυτή η ανάγκη για ενεργειακά αυτόνομα συστήματα οδήγησε στην ανάπτυξη και βελτίωση άλλων μεθόδων επεξεργασίας των λυμάτων που έχουν ως κύριο στόχο την ανάκτηση ενέργειας από τα λύματα. Συγκεκριμένα, τα λύματα περιέχουν σημαντική ποσότητα δυνητικής ενέργειας με τη μορφή οργανικής ύλης. Έτσι λοιπόν, ο κύριος άξονας για την παραγωγή ενέργειας από τα λύματα είναι η ανακατεύθυνση του άνθρακα σε συστήματα που αποθηκεύουν και αξιοποιούν το ενεργειακό του περιεχόμενο με διάφορες μορφές όπως το βιοαέριο. Η δυνητική ενέργεια των λυμάτων που περιέχουν 500 mg/L COD αντιστοιχεί σε 1,93 kWh / m³, το οποίο καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις ενός συμβατικού συστήματος ενεργού ιλύος (Marthe S. de Graaff et al., 2016). Διατυπώνονται διάφοροι μηχανισμοί που επιτρέπουν την ανακατεύθυνση του άνθρακα και δίνεται ιδιαίτερη βάση σε κάποιους από αυτούς. Ειδικότερα, αναλύονται τα συστήματα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (HRAS) τα οποία επιτυγχάνουν ανάκτηση της ενέργειας που υπάρχει στα λύματα με μείωση της συνολικής οξειδωσης του COD και αύξηση της ποσότητας του άνθρακα που απομακρύνεται με τη λάσπη. Η πλούσια σε άνθρακα λάσπη οδηγείται στη συνέχεια σε έναν αναερόβιο χωνευτή για την συλλογή βιοαερίου που προκύπτει από την χώνευση της λάσπης. Τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος είναι ο μικρός χρόνος παραμονής στερεών (SRT ≤ 2 d), ο μικρός υδραυλικός χρόνος και ο υψηλός ειδικός ρυθμός φόρτισης ιλύος (SLR ο οποίος κυμαίνεται από 2 έως 10 g bCOD g⁻¹ VSS d⁻¹). Καθώς τα συστήματα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν πληρούν τα δευτεροβάθμια πρότυπα εκροής, είναι χρήσιμα ως πρώτο στάδιο σε μονάδες επεξεργασίας δύο σταδίων, όπου στο δεύτερο στάδιο γίνεται η απομάκρυνση του υπόλοιπου COD για την ικανοποίηση των ορίων εκροής και των άλλων ρύπων κατά τη διάρκεια δευτεροβάθμια επεξεργασίας (Francis Meerburg, 2016). Ένα σύστημα δυο σταδίων στο οποίο το πρώτο στάδιο αντιστοιχεί το σύστημα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος είναι η διεργασία A/B (προσρόφησης / βιο-οξειδωσης). Συγκεκριμένα, στο στάδιο-A, αφαιρείται η οργανική ύλη με την διαδικασία της προσρόφησης και παράγεται ιλύς πλούσια σε άνθρακα, η οποία κατευθύνεται σε αναερόβιο χωνευτή για την παραγωγή βιοαερίου. Γίνεται λοιπόν ανάλυση των χαρακτηριστικών του συστήματος ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης περιγράφονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτό καθώς και οι λειτουργικές παράμετροι του συστήματος και κατά πόσο το επηρεάζουν. Κατόπιν συγκρίνεται με άλλα συστήματα ενεργού ιλύος τα οποία είναι το συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος (CAS), το σύστημα επαφής σταθεροποίησης (CS), το συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης (HiCAS) και τέλος το σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής σταθεροποίησης (HiCS) και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει ένα σύστημα HRAS σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος. Σύμφωνα με τον Thomas Nogaj (2015) το μαθηματικό μοντέλο που βασίστηκε στο μοντέλο ASM1 της IWA και τροποποιήθηκε από αυτόν θα αναφέρεται ως σύστημα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (HRAS). Πραγματοποιείται ανάλυση των διεργασιών του μοντέλου, εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας του και γίνεται σύγκριση του μοντέλου HRAS με το μοντέλο ASM1 επισημαίνοντας τις βασικές αλλαγές που διαφοροποιούν τα δύο μοντέλα. Τα σημαντικότερα σημεία του μοντέλου είναι η εισαγωγή νέων μεταβλητών σε αυτό και συγκεκριμένα τα δύο κλάσματα του βιοδιασπάσιμου διαλυτού υποστρώματος (γρήγορο και αργό) και το κολλοειδές βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα. Επίσης, αναλύονται οι δύο προσεγγίσεις που αφορούν το διαλυτό βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα. Το μοντέλο για να εκτελεστεί γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την ευαισθησία του μοντέλου στις διάφορες παραμέτρους, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας κατόπιν της προσομοίωσης του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας που εφαρμόζεται είναι στην κατηγορία της παγκόσμιας ανάλυσης ευαισθησίας (global sensitivity analysis ή GSA) και χρησιμοποιεί την μέθοδο Monte Carlo καθώς το μαθηματικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη την τυχαία διακύμανση των παραμέτρων του μοντέλου, δημιουργώντας ένα φάσμα πιθανών τιμών για καθένα από αυτά και μια αντίστοιχη κατανομή πιθανότητας. Επομένως, η επιλογή των τιμών πραγματοποιείται με ψευδοτυχαίο τρόπο μέσω μιας γκαουσιανής κατανομής πιθανότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, επισημαίνονται οι

σημαντικότερες στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του μοντέλου και εντοπίζεται η πιο ευαίσθητη μεταβλητή κατάστασης στις διακυμάνσεις των παραμέτρων. Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα από 5 κύκλους λειτουργίας που μετρήθηκαν από το πιλοτικό στην Ψυττάλεια και προέκυψε πως αν το μοντέλο συγκριθεί ως προς το συνολικό COD που παράγει σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, δίνει σχετικά καλά αποτελέσματα. Η σύγκριση όμως των επιμέρους κλασμάτων του COD μεταξύ του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα, δίνει κάποιες αποκλίσεις όσον αφορά το διαλυτό, σωματιδιακό και κολλοειδές υπόστρωμα. Η ανάλυση ευαισθησίας έδωσε ως πιο ευαίσθητη μεταβλητή στις μεταβολές των παραμέτρων το γρήγορο βιοδιασπάσιμο διαλυτό υπόστρωμα, ενώ οι κινητικές παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο τη συγκεκριμένη μεταβλητή είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της βιομάζας (μ_{OHO}), η σταθερά ρυθμού ανάπτυξης σε X_{STO} (q_{STO}), ο συντελεστής μετατροπής ετερότροφων για αναερόβια ανάπτυξη X_{OHO} ($Y_{\text{OHO_AER}}$) και ο συντελεστής σχηματισμού EPS ($k_{\text{EPS_MAX}}$). Τέλος, από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως το μοντέλο δείχνει μεγαλύτερη απομάκρυνση του διαλυτού και κολλοειδούς υποστρώματος από όσο δίνουν τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ όσον αφορά το συνολικό COD, το μοντέλο δίνει πολύ κοντινές τιμές με αυτές που μετρήθηκαν στο πιλοτικό.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ABSTRACT	III
ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ	IV
Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
Κεφάλαιο 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	3
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	3
2.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	7
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ HRAS	8
2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΟΥ COD.....	9
2.4.1 EPS (Εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες)	9
2.4.2 Εσωτερική αποθήκευση (storage)	10
2.5 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ HRAS	11
2.5.1 Προσρόφηση	11
2.5.2 Βιοπροσρόφηση	11
2.5.3 Βιοκροκίδωση	11
2.5.4 Υδρόλυση	12
2.5.5 Διάχυση	13
2.5.6 Ανάπτυξη Βιομάζας	13
2.5.7 Φθορά – Ενδογενής Αναπνοή	13
2.6 ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	14
2.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	14
2.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	17
Κεφάλαιο 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	19
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	19
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ HRAS.....	20
3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	28

3.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	29
Κεφάλαιο 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ		31
4.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥΣ	31
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	33
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	35
4.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	37
Κεφάλαιο 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		42
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		46

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Διάγραμμα των διάφορων τεχνολογιών ανακατεύθυνσης άνθρακα, πηγή: Irene Sancho et al., 2019.	6
Εικόνα 2: Διαδικασία Νιτρωδοποίησης / Anammox	6
Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση της λύσης, πηγή: Thomas Nogaj, 2015.....	14
Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση των 4 συστημάτων ενεργού ιλύος, όπου OLR (ρυθμός οργανικής φόρτισης), πηγή: Francis Meerburg et al., 2015	17
Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας δόμησης μοντέλου μέχρι το στάδιο της ανάλυσης ευαισθησίας.....	19
Εικόνα 6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ πειραματικών δεδομένων και μοντέλου ASM1, πηγή: Thomas Nogaj, 2015.	21
Εικόνα 7: Διαχωρισμός επιμέρους κλασμάτων COD για το HRAS του Thomas Nogaj, 2015. ...	22
Εικόνα 8: Σχηματική απεικόνιση της ροής ηλεκτρονίων του HRAS για το διαλυτό βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα και για τις δύο προσεγγίσεις του μοντέλου (Thomas Nogaj, 2015)	24
Εικόνα 9: Σχηματική περιγραφή των κινητικών του HRAS	28
Εικόνα 10: Whiskers-Boxplots.....	33
Εικόνα 11: c.v. για κάθε μεταβλητή εξόδου	34
Εικόνα 12: c.v. για την ομάδα 25, για κάθε παράμετρο	34
Εικόνα 13: c.v. για την ομάδα 13, για κάθε παράμετρο	35

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Κινητικές και στοιχειομετρικές διεργασίες για αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών, πηγή: Thomas Nogaj, 2015.	20
Πίνακας 2: Μέσος όρος συγκεντρωτικών ποσοστών μετατροπής COD βασισμένα σε συνδυαστική στοιχειομετρία των SBf και SBs, πηγή: Thomas Nogaj et al., 2015.	25

Πίνακας 3: Παράμετροι σχεδιασμού του πιλοτικού για τους 5 κύκλους λειτουργίας, όπου Q_{in} η παροχή εισόδου, Q_{WAS} η παροχή ιλύος και V ο όγκος του αντιδραστήρα.	35
Πίνακας 4: Συγκεντρώσεις εισόδου του πιλοτικού για τους 5 κύκλους λειτουργίας.	36
Πίνακας 5: Αποτελέσματα του πιλοτικού για τους 5 κύκλους λειτουργίας.	36
Πίνακας 6: Αποτελέσματα του μοντέλου για τους 5 κύκλους λειτουργίας.	37
Πίνακας 7: Αποτελέσματα του μοντέλου για τους 5 κύκλους λειτουργίας με αλλαγή 2 παραμέτρων.	37
Πίνακας 8: Αποτελέσματα του μοντέλου για τους 5 κύκλους λειτουργίας και σύγκριση με του πιλοτικού, όπου Μ: μοντέλο και Π: πειραματικά και μονάδες (mg/L).	38
Πίνακας 9: Ποσοστά απομάκρυνσης του διαλυτού βιοδιασπάσιμου COD του μοντέλου για τους 5 κύκλους λειτουργίας.	38
Πίνακας 10: Ποσοστά των επιμέρους κλασμάτων του COD προς το συνολικό, για τους 5 κύκλους λειτουργίας και σύγκριση του μοντέλου με του πιλοτικού, όπου Μ: μοντέλο και Π: πειραματικά.	39
Πίνακας 11: Λόγος i_{CV} με μονάδες gCOD/gVSS από μετρήσεις στο πιλοτικό, για κάθε κύκλο λειτουργίας.	39
Πίνακας 12: Κινητικές εξισώσεις HRAS μοντέλου, πηγή: Thomas Nogaj, 2015	46
Πίνακας 13: Δομή HRAS μοντέλου, πηγή: Thomas Nogaj, 2015	47
Πίνακας 14: Τιμές παραμέτρων του Nogaj, πηγή: Thomas Nogaj, 2015	48
Πίνακας 15: Ονόματα παραμέτρων του Nogaj, πηγή: Thomas Nogaj, 2015	49

Βασική ορολογία:

A-στάδιο:

Η διαδικασία HRAS αποτελεί το πρώτο στάδιο ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων με δύο ή περισσότερα στάδια. Παραδοσιακά λειτουργεί σε μια διαμόρφωση HiCAS, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά.

Συσσώρευση (Accumulation):

Ενδοκυτταρική πρόσληψη υποστρώματος χωρίς χημική τροποποίηση ή μικρή τροποποίηση σε ενδιάμεσα προϊόντα χαμηλού μοριακού βάρους.

Προσρόφηση (Adsorption):

Προσκόλληση (Πρόσφυση) σωματιδιακών, κolloειδών και διαλυτών οργανικών στην επιφάνεια των μικροβιακών κροκίδων.

B-στάδιο:

Το δεύτερο στάδιο ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων με δύο ή περισσότερα στάδια. Παραδοσιακά λειτουργούσε ως διαδικασία χαμηλής φόρτισης CAS.

Βιοκροκίδωση (Biofloculation):

Διαμεσολαβούμενος από τη βιομάζα σχηματισμός μεγαλύτερων κροκίδων από μικρότερα σωματίδια ή κolloειδή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποδηλώσει κροκίδωση βιολογικής ιλύος εν γένει ή για να υποδηλώσει την απομάκρυνση σωματιδιακών και κolloειδών υποστρωμάτων μέσω προσρόφησης και παγίδευσης στην δομή της κροκίδας.

Βιοπροσρόφηση:

Συλλογικός όρος για τις διαδικασίες μη καταστροφικής πρόσληψης υποστρώματος (δηλ. συσσώρευση, προσρόφηση και αποθήκευση).

CAS (Conventional activated sludge):

(Χαμηλού ρυθμού) συμβατική ενεργός ιλύς. Η διαμόρφωση αυτή αποτελείται από μία φάση επαφής μεταξύ εισροής και επιστρεφόμενης ιλύος, ακολουθούμενη από διαχωρισμό στερεών / υγρών. Η φάση επαφής μπορεί να υποδιαιρεθεί σε αναερόβιες, ανοξικές και αερόβιες φάσεις για να επιτρέψει απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου και μπορεί να περιλαμβάνει εσωτερική ανακύκλωση των MLSS. Μία διαδικασία χαμηλού ρυθμού ορίζεται γενικά ως έχουσα ειδικό ρυθμό φόρτισης ιλύος κάτω από $0,6 \text{ g bCOD g}^{-1} \text{ VSS d}^{-1}$ και χρόνο παραμονής στερεών πάνω από 3 ημέρες.

Πήξη (Coagulation):

Χημική αποσταθεροποίηση και σχηματισμός συσσωματωμάτων σωματιδιακής και κολλοειδούς ύλης με υπέρβαση της ηλεκτροστατικής απόθλιψης που προκαλείται από το επιφανειακό φορτίο. Συνήθως επιτυγχάνεται με την προσθήκη χημικών πηκτικών ουσιών ώστε να αλληλεπιδράσουν με την επιφάνεια των σωματιδίων.

Προσδιοριστική αλλαγή (Deterministic change):

Αλλαγή της δομής ή της λειτουργίας μίας μικροβιακής κοινότητας υπό την επίδραση εξωτερικών (π.χ. περιβαλλοντικών) παραγόντων. Η έννοια της ντετερμινιστικής αλλαγής προέρχεται από τη θεωρία της οικοθέσης (ή βιοθέσης), η οποία υποθέτει ότι κάθε μικροβιακό είδος διαθέτει μια βέλτιστη οικοθέση ανάπτυξης και μια μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών θα προκαλέσει μια ντετερμινιστική (δηλαδή προβλέψιμη) μετατόπιση στη συνάντηση των ειδών καθώς οι συνθήκες ανάπτυξης καθίστανται καταλληλότερες για είδη με μια ελαφρώς διαφορετική οικοθέση. Αντώνυμο: ουδέτερη αλλαγή.

Αναλογία F / M:

Λόγος τροφής προς μικροοργανισμούς. Ενώ η βιβλιογραφία εκφράζει συχνά την αναλογία F / M σε μονάδες $\text{g BOD g}^{-1} \text{VSS d}^{-1}$, αυτό είναι στην πραγματικότητα ένα ποσοστό και αναφέρεται ως ο ειδικός ρυθμός φόρτισης της ιλύος (SLR). Εδώ, ο λόγος F / M εννοείται ως πραγματικός λόγος σε μονάδες $\text{g BOD g}^{-1} \text{VSS}$ ή παρόμοιες μονάδες.

Γιορτή (Αφθονία) -πεινά (Feast-famine):

Λειτουργική στρατηγική όπου η ιλύς υποβάλλεται κυκλικά σε φάσεις υψηλής διαθεσιμότητας υποστρώματος (γιορτή) και χαμηλής διαθεσιμότητας υποστρώματος (πεινά). Κατ' αρχήν, μπορούν να εφαρμοστούν καθεστώτα γιορτής-πεινάς για οποιοδήποτε υπόστρωμα. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται μόνο για το συνολικό COD ως υπόστρωμα.

Κροκίδωση (Flocculation):

Φυσική προσκόλληση μικρότερων συσσωματωμάτων για το σχηματισμό μεγαλύτερων κροκίδων. Λόγω των σχετικά ασθενών δυνάμεων έλξης, αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να αντιστραφεί (αποκροκίδωση).

HiCAS (High-rate conventional activated sludge):

Υψηλής φόρτισης συμβατική ενεργός ιλύς. Η διαμόρφωση αυτή αποτελείται από μία φάση επαφής μεταξύ εισροής και επιστρεφόμενης ιλύος, ακολουθούμενη από διαχωρισμό στερεών / υγρών. Η φάση επαφής μπορεί να υποδιαιρείται σε αναερόβιες, ανοξικές και αερόβιες φάσεις.

HiCS (High-rate contact stabilization):

Υψηλής φόρτισης επαφής σταθεροποίησης. Αυτή η διαμόρφωση συνίσταται από αερόβια φάση σταθεροποίησης της επιστρεφόμενης λάσπης (λάσπη επανακυκλοφορίας), ακολουθούμενη από

μη αεριζόμενη ή χαμηλού αερισμού φάση επαφής μεταξύ εισροής και σταθεροποιημένης ιλύος και διαχωρισμό στερεού / υγρού.

HRAS (High-rate activated sludge):

Υψηλής φόρτισης ενεργός ιλύς. Μια διαδικασία υψηλής φόρτισης ορίζεται γενικά ως έχουσα ειδικό ρυθμό φόρτισης ιλύος άνω των $2 \text{ g bCOD g}^{-1} \text{ VSS d}^{-1}$ και χρόνο παραμονής στερεών κάτω των 2 ημερών.

Ουδέτερη αλλαγή (Neutral change):

Αλλαγή της δομής ή της λειτουργίας μίας μικροβιακής κοινότητας λόγω στοχαστικών διαδικασιών (δηλαδή, τυχαιότητας). Η έννοια της ουδέτερης αλλαγής προέρχεται από τη θεωρία της νησιωτικής βιογεωγραφίας, στην οποία μια «νησιωτική κοινότητα» (π.χ. η μικροβιακή κοινότητα σε βιοαντιδραστήρα) διαμορφώνεται από μια ισορροπία μεταξύ εξαφάνισης και αποικισμού, καθώς οι τυχαίες διακυμάνσεις της αφθονίας των ειδών μπορεί να προκαλέσουν μερικά να εξαφανιστούν και να αντικατασταθούν από άλλα είδη που εισέρχονται στο σύστημα. Η ουδέτερη αλλαγή είναι μη-κατευθυντική και δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια. Αντώνυμο: ντετερμινιστική αλλαγή.

Αποθήκευση (Storage):

Ενδοκυτταρική πρόσληψη υποστρώματος με χημική τροποποίηση για τη δημιουργία πολυμερών αποθήκευσης.

Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σημερινή εποχή, η κοινωνία στρέφεται σε νέες μεθόδους βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων προστατεύοντας παράλληλα το περιβάλλον. Είναι παγκοσμίως αναγνωρισμένη πια η ανάγκη προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος με μεθόδους που αξιοποιούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που επαναχρησιμοποιούν ή επεξεργάζονται αναξιοποίητα προϊόντα (να μετατραπούν σε χρήσιμα υλικά) ώστε να μην επιβαρύνουν το περιβάλλον και που μειώνουν παράλληλα τη κατανάλωση των μη ανανεώσιμων πηγών. Αυτή η τάση των τελευταίων χρόνων έχει μεγάλη επιρροή και στις μεθόδους επεξεργασίας των λυμάτων, καθώς στρέφεται από μεθόδους που στόχευαν στην απομάκρυνση των λυμάτων σε μεθόδους που έχουν στόχο την αξιοποίησή τους για παραγωγή ενέργειας.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα που δείχνουν την στροφή της κοινωνίας σε εναλλακτικές λύσεις που στοχεύουν στην αξιοποίηση των αποβλήτων για παραγωγή προϊόντων που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον είναι η περίπτωση του βιοπλαστικού.

Τα λύματα περιέχουν σημαντική ποσότητα δυνητικής ενέργειας με τη μορφή οργανικής ύλης, η οποία μπορεί να συλλεχθεί μέσω αναερόβιας χώνευσης. Οι κλιματικές αλλαγές και η ανάκτηση πόρων έχουν προωθήσει την στροφή σε πιο ενεργειακά αυτόνομες λύσεις, όπως η αξιοποίηση των λυμάτων για ανάκτηση πόρων αντί για αντιμετώπιση τους ως απόβλητα. Η δυνητική ενέργεια των λυμάτων που περιέχουν 500 mg/L COD αντιστοιχεί σε 1,93 kWh / m³ που είναι μια τιμή που επιτρέπει την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας συμβατικής επεξεργασίας λυμάτων η οποία καταναλώνει περίπου 0.3–0.8 kWh/m³. Το συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος και χώνευσης ιλύος, ανακάμπτει μόνο περίπου το 33% αυτού του δυναμικού (Marthe S. de Graaff et al., 2016).

Υπάρχουν αρκετές διαδικασίες που είναι ικανές να ανακατευθύνουν οργανικό άνθρακα για πιθανή παραγωγή ενέργειας. Με άλλα λόγια χρειάζονται διάφορες στρατηγικές με στόχο τη μείωση της συνολικής οξείδωσης του COD και την αύξηση της ανακατεύθυνσης του άνθρακα στη λάσπη. Ένα τέτοιο επιτυχημένο σύστημα είναι η διαδικασία υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (Jimenez, 2013). Αναλυτικότερα, τα συστήματα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (HRAS) παράγουν περισσότερη ιλύ με καλύτερα χαρακτηριστικά χώνευσης σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα χαμηλής φόρτισης. Τα συστήματα HRAS λειτουργούν με μικρό χρόνο παραμονής στερεών (SRT ≤ 2 d) και υψηλό ειδικό ρυθμό φόρτισης ιλύος (SLR κυμαίνεται από 2 έως 10 g bCOD g⁻¹ VSS d⁻¹). Επειδή τα συστήματα HRAS συνήθως δεν αφαιρούν επαρκείς ποσότητες COD και θρεπτικών ουσιών για να επιτρέψουν την άμεση απόρριψη των εκροών (δηλαδή δεν πληρούν τα δευτεροβάθμια πρότυπα εκροής), είναι πολύτιμες ως το πρώτο στάδιο σε μονάδες επεξεργασίας δύο σταδίων, όπου στο δεύτερο στάδιο μπορεί να ολοκληρωθεί η απομάκρυνση του υπόλοιπου COD ώστε να πληρούνται τα όρια εκροής και των άλλων ρύπων από τα απόβλητα τους κατά τη διάρκεια δευτεροβάθμια επεξεργασίας. (Francis Meerburg, 2016)

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση των κεφαλαίων που θα ακολουθήσουν.

Το 2^ο κεφάλαιο ξεκινάει με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην οποία γίνεται η εισαγωγή στο σύστημα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος και γίνεται μια σύντομη περιγραφή της σκοπιμότητας του συστήματος, καθώς και μια σύντομη ιστορική αναδρομή. Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται αναλυτική περιγραφή του συστήματος υψηλής φόρτισης ως προς την χρησιμότητά του, τα χαρακτηριστικά του και περιγράφονται αναλυτικά οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτό. Στην συνέχεια γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του ρόλου που έχουν οι λειτουργικές παράμετροι στο σύστημα και κατά πόσο το επηρεάζουν. Αφού ολοκληρώνεται η θεωρητική περιγραφή του συστήματος, γίνεται η σύγκριση του με άλλα συστήματα ενεργού ιλύος τα οποία είναι το συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος (CAS), το σύστημα επαφής σταθεροποίησης (CS), το συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης (HiCAS) και τέλος το σύστημα υψηλής φόρτισης

επαφής σταθεροποίησης (HiCS). Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση αυτών των συστημάτων, περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει ένα σύστημα HRAS σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα ενεργού υλός.

Με το κλείσιμο του δεύτερου κεφαλαίου ολοκληρώνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση των συστημάτων HRAS και ξεκινάει το 3^ο κεφάλαιο με την περιγραφή του μοντέλου του συγκεκριμένου συστήματος που βασίστηκε στο μοντέλο ASM1 της IWA και τροποποιήθηκε από τον Thomas Nogaj, 2015. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται η δομή του μοντέλου, αναλύονται οι διεργασίες που περιγράφουν το μοντέλο και εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας του. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση του μοντέλου HRAS με το μοντέλο ASM1 και παρουσιάζονται οι βασικές αλλαγές που διαφοροποιούν τα δύο μοντέλα, όπως η προσθήκη στο μοντέλο HRAS νέων μεταβλητών και συγκεκριμένα τα δύο κλάσματα του βιοδιασπάσιμου διαλυτού υποστρώματος (γρήγορο και αργό) και το κολλοειδές βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα. Επίσης, εξηγούνται οι δύο προσεγγίσεις που αφορούν το διαλυτό βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα και αναλύονται. Να αναφερθεί ότι το μοντέλο γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Μετά την περιγραφή του μοντέλου, γίνεται η εισαγωγή στην ανάλυση ευαισθησίας που ακολούθησε μετά την προσομοίωση του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας που εφαρμόζεται είναι στην κατηγορία της παγκόσμιας ανάλυσης ευαισθησίας (global sensitivity analysis ή GSA) και χρησιμοποιεί την μέθοδο Monte Carlo καθώς το μαθηματικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη την τυχαία διακύμανση των παραμέτρων του μοντέλου, δημιουργώντας ένα φάσμα πιθανών τιμών για καθένα από αυτά και μια αντίστοιχη κατανομή πιθανότητας. Επομένως, η επιλογή των τιμών πραγματοποιείται με ψευδοτυχαίο τρόπο μέσω μιας γκαουσιανής κατανομής πιθανότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, επισημαίνονται οι σημαντικότερες στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του μοντέλου και εντοπίζεται η πιο ευαίσθητη μεταβλητή κατάσταση στις διακυμάνσεις των παραμέτρων. Και έτσι κλείνει το κεφάλαιο 2.

Στο 4^ο κεφάλαιο, γίνεται επεξήγηση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα λύματα της Ψυττάλειας. Κατόπιν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου που έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές από τα δεδομένα του πιλοτικού και χρησιμοποιώντας τις βαθμονομημένες παραμέτρους που χρησιμοποίησε στο μοντέλο του ο Thomas Nogaj, 2015. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των μεταβλητών της εξόδου που υπολόγισε το μοντέλο με τις εξόδους που έχουμε από το πιλοτικό. Να αναφερθεί πως υπάρχουν 5 κύκλοι λειτουργίας από τα πειραματικά δεδομένα και πως δεν μπορούσαν να μετρηθούν όλες οι συγκεντρώσεις που εισάγονται και εξάγονται από το σύστημα (μεταβλητές κατάστασης) με αποτέλεσμα να γίνουν κάποιες επιπλέον παραδοχές και να προκύψουν κάποια ακόμα συμπεράσματα. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας και χρησιμοποιήθηκαν κάποια διαγράμματα και whiskers-boxplots για να είναι πιο εύκολη η κατανόηση και η εξαγωγή των συμπερασμάτων.

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν σύμφωνα με αυτά. Αναλυτικότερα, γίνεται ένας διαχωρισμός των συμπερασμάτων σε αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας, στα γενικά συμπεράσματα του μοντέλου που αφορούν και διάφορες παραδοχές που έγιναν και στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Τέλος γίνεται μια αναφορά σε προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και ολοκληρώνεται η διπλωματική με την Βιβλιογραφία και τα Παραρτήματα.

Κεφάλαιο 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Στόχο της διαδικασίας υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (HRAS) αποτελεί τόσο η απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα των λυμάτων, όσο και η ανάκτηση ενέργειας από αυτόν. Η συλλογή ενέργειας από τα λύματα γίνεται εφικτή όταν αποφεύγεται η οξείδωση του άνθρακα και απομακρύνεται με την περίσσεια ιλύς του συστήματος. Η περίσσεια αυτή ιλύς που είναι πλούσια σε οργανικές ουσίες, μπορεί στην συνέχεια να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της διαδικασίας είναι ο διαχωρισμός του υποστρώματος σε τρεις μορφές - σωματιδιακά, κολλοειδή και διαλυτά. Τα σωματιδιακά και τα κολλοειδή υποστρώματα απομακρύνονται αποτελεσματικά από το υγρό με βιολογική κροκίδωση ενώ το διαλυτό κλάσμα μπορεί να απομακρυνθεί με ενδοκυτταρική αποθήκευση, βιοσύνθεση ή βιολογική οξείδωση. (Jose Jimenez et al., 2013)

Τα συστήματα HRAS χαρακτηρίζονται από μικρούς όγκους αντιδραστήρων και κατά συνέπεια το κόστος της εγκατάστασης μειώνεται. Αυτό το σύστημα αξιοποιεί με αυτά τα χαρακτηριστικά τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ενεργού ιλύος δηλαδή το υψηλό ποσοστό κατανάλωσης των βακτηρίων για την απομάκρυνση του άνθρακα από τα λύματα (Jose Jimenez et al., 2013).

Ο λόγος που στραφήκανε στην κατασκευή εγκαταστάσεων που να είναι ενεργειακά αυτοδύναμες (net-zero energy) ή ακόμα καλύτερα να αποδίδουν ενέργεια (net-positive energy) εφόσον καλύπτουν τις ενεργειακές τους απαιτήσεις, είναι το γεγονός ότι η ενέργεια που παράγεται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι βιώσιμη. Οι αυξανόμενες και όλο και περισσότερο ευμετάβλητες δαπάνες που προέρχονται από την κατανάλωση ενέργειας από διάφορες πηγές όπως η ηλεκτρική και η ενέργεια που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα, επιβαρύνει και το περιβάλλον και δημιουργεί και ένα πιο έντονο πνεύμα κινδύνου, καθώς είναι άμεσα εξαρτημένες από αυτές τις πηγές. Στη περίπτωση που ένας δήμος είναι καθαρός παραγωγός ενέργειας, θα μπορεί να διαχειριστεί καλύτερα τα οικονομικά προβλήματα που προκαλούνται από διακυμάνσεις του κόστους ενέργειας και από αυξήσεις, καθώς αν προκληθούν για παράδειγμα διακοπές ρεύματος ή διαλείπουσα τροφοδοσία, υπάρχει ανεξάρτητη πηγή ενέργειας (όπως τα λύματα), που μπορεί να καλύψει την έλλειψη ενέργειας. Συμπεραίνοντας, η ενεργειακή αυτάρκεια προσφέρει πολλά οφέλη τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο (Tim Constantine et al., 2012).

Ενεργειακή αυτάρκεια:

Έχοντας στόχο την δημιουργία εγκαταστάσεων/συστημάτων με κύριο χαρακτηριστικό την επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας, προέκυψαν συστήματα που επικεντρώνονται σε διαδικασίες ανάκτησης ενέργειας. Ένας τρόπος ανάκτησης ενέργειας είναι η αναερόβια χώνευση, από την οποία γίνεται η παραγωγή βιοαερίου.

Είναι σύνηθες η διαδικασία με την οποία επεξεργάζονται τα αστικά λύματα να είναι η ενεργός ιλύς. Η διαδικασία ενεργού ιλύος οξειδώνει μεγάλο μέρος του οργανικού άνθρακα με αποτέλεσμα να μην μένει μεγάλο ενεργειακό απόθεμα στα αστικά λύματα. Ας ληφθεί υπόψη ότι ο οργανικός άνθρακας στα αστικά λύματα αντιπροσωπεύει συνήθως χημική ενεργειακή με περιεκτικότητα περίπου 1,9 kWh ανά m³ (Heidrich et al., 2011, McCarty et al., 2011). Αυτή η κατάσταση σε συνδυασμό με το γεγονός ότι για την αερόβια βιολογική διαδικασία απαιτείται σημαντική ποσότητα ενέργειας, καθιστά το σύστημα ενεργού ιλύος ως μη ενεργειακά ωφέλιμο. Επιπλέον, καθώς ο οργανικός άνθρακας είναι απαραίτητος για την απομάκρυνση των βιολογικών θρεπτικών ουσιών (BNR), ένα μέρος του πρέπει να διανεμηθεί για να ικανοποιηθούν τα κριτήρια ποιότητας αποβλήτων, ιδιαίτερα το άζωτο και ο φώσφορος (Jose Jimenez et al., 2015).

εφαρμοστεί επιτυχώς στην προσέγγιση της καθαρής ενεργειακά ουδέτερης επεξεργασίας λυμάτων στο Strass της Αυστρίας (Huseyin Guven et al., 2019).

Τα συστήματα HRAS μπορούν να σχεδιαστούν και να λειτουργήσουν είτε για να ικανοποιήσουν τα δευτερεύοντα πρότυπα εκροής (π.χ. 30 mg / L BOD5 και 30 mg / L TSS) είτε ως διεργασίες προσρόφησης άνθρακα όταν χρησιμοποιούνται ως πρώτο βήμα σε μια διεργασία δύο σταδίων (π.χ. προσρόφηση / Βιο-οξείδωση, μέθοδος A / B) (Jose Jimenez et al., 2015).

Συνοπτικά, ένα σύστημα HRAS μπορεί να λειτουργήσει στις εξής περιπτώσεις:

- Ως πρώτο βήμα σε διεργασία δύο σταδίων
- Ως κύριο σύστημα ικανοποιώντας τα δευτερεύοντα πρότυπα εκροής

Η διαδικασία που ακολουθείται σε ένα σύστημα ενεργού ιλύος είναι η οξείδωση των οργανικών ενώσεων σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό από τους ζωντανούς μικροοργανισμούς που βρίσκονται στη λάσπη. Στη συνέχεια, η εκροή καταλήγει είτε σε μια δεξαμενή καθίζησης είτε σε έναν βιοαντιδραστήρα μεμβράνης (MBR) όπου γίνεται ο διαχωρισμός της ενεργού ιλύος από το επεξεργασμένο νερό στη πρώτη περίπτωση με καθίζηση ενώ στην δεύτερη με διήθηση μεμβράνης. Από τον διαχωρισμό στερεών-υγρών, ένα μέρος των στερεών καταλήγει σε άλλη έξοδο, η οποία μπορεί να είναι αναερόβιος χωνευτής για την συλλογή βιοαερίου, ενώ το υπόλοιπο οδηγείται στην είσοδο της αεριζόμενης δεξαμενής (επανακυκλοφορία) (Oskar Modin et al., 2016).

Παρόλο που το σύστημα ενεργού ιλύος δίνει τα επιθυμητά πρότυπα εκροής, είναι ασύμφορη ως προς την λειτουργία καθώς η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ μεγάλη. Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια δόθηκε ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε τεχνολογίες που έχουν ως πρωτεύων στόχο την ανάκτηση ενέργειας από τα λύματα (Arifur Rahman et al., 2017). Αυτό έγινε εφικτό κυρίως με τον σχεδιασμό συστημάτων που εντάσσουν έναν αναερόβιο χωνευτή με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου. Η απόδοση όμως του αναερόβιου χωνευτή είναι συναρτημένη του ποσού του οργανικού περιεχομένου στη λάσπη. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση οργανικών ενώσεων στη λάσπη, τόσο περισσότερο βιοαέριο θα προκύψει. Αυτό συμβαίνει όταν δεν έχει γίνει οξείδωση των οργανικών (μετατροπή τους σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό) αλλά βρίσκονται σε περιορισμένη μορφή στην ιλύ που στέλνεται στον αναερόβιο χωνευτή (Oskar Modin et al., 2016). Όταν αυτή η ιλύς που είναι πλούσια σε άνθρακα, εισαχθεί στον αναερόβιο χωνευτή, μπορεί να ολοκληρώσει την οξείδωση της με την βοήθεια των μεθανογενών μικροοργανισμών και κατά συνέπεια να παραχθεί βιοαέριο.

Συνθήκες κατά τις οποίες επιτυγχάνεται η προσρόφηση του οργανικού άνθρακα πάνω στις κροκίδες ενεργού ιλύος βοηθώντας έτσι την κατακράτηση του άνθρακα στην ενεργό ιλύ χωρίς την απομάκρυνση του με οξείδωση, είναι το μικρό SRT και HRT. Ένα τέτοιο σύστημα, που παράγει πλούσια σε άνθρακα ιλύς, ελαχιστοποιεί τις απαιτήσεις αερισμού, μεγιστοποιεί την απομάκρυνση των οργανικών μέσω της προσρόφησης και επιτρέπει την αξιοποίηση της παραγόμενης ιλύος μέσω της παραγωγής μεθανίου, έχει αναγνωριστεί ως ένας πιθανός τρόπος για πιο αποδοτικό από πλευράς πόρων σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (Verstraete et al., 2009, Batstone και Virdis, 2014).

Άλλοι τρόποι με τους οποίους γίνεται η επίτευξη ενός ενεργειακά συμφέροντος συστήματος είναι η εφαρμογή των παρακάτω μεθόδων:

- Παραγωγή βιοαερίου

- Χαμηλότερες απαιτήσεις αερισμού και κατά συνέπεια μείωση της κατανάλωσης ενέργειας
- Χρήση άλλων χημικών προϊόντων που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα με σαφή περιβαλλοντικά οφέλη
- Βελτιστοποίηση της λειτουργίας των μονάδων με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας
- Μείωση κόστους ενέργειας με αποκομιδή κερδών από παραγωγή προϊόντων υψηλής αξία όπως το βιοντίζελ που παράγεται από την ιλύ λυμάτων (Kargbo, 2010)
- Η μικροβιακή μετατροπή των διαλυτών οργανικών ενώσεων σε ενδοκυτταρικά πολυμερή όπως τα πολυδροξυαλκανοϊκά (PHA) (Chua και Yu, 1999) και τα τριακυλγλυκερίδια (TAG). Τα PHA συγκεκριμένα μπορούν ενδεχομένως να αντικαταστήσουν συμβατικά πλαστικά και να αποτελέσουν ένα προϊόν υψηλής αξίας που θα μπορούσε να παραχθεί από τα λύματα. Επίσης θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως πρόδρομοι για την παραγωγή βιοντίζελ (Oskar Modin et al., 2016).

Μηχανισμοί που απομακρύνουν τον άνθρακα αποφεύγοντας την οξείδωση διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας τους, οι οποίες είναι φυσικές, χημικές και βιολογικές διαδικασίες και αναλύονται παρακάτω.

Φυσικές διεργασίες:

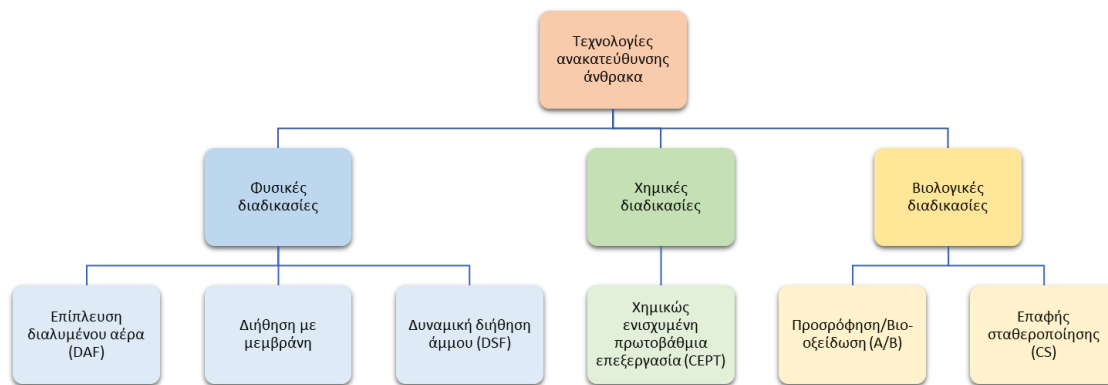
Η επίπλευση διαλυμένου αέρα (dissolved air flotation, DAF) λειτουργεί απομακρύνοντας τα αιωρούμενα στερεά. Συγκεκριμένα, η μονάδα DAF χωρίζεται σε δύο ζώνες: τη ζώνη επαφής, όπου εισάγονται μικροφουσαλίδες αέρα (10-100 μm) στην εισροή και συσσωματώνονται με τα αιωρούμενα στερεά και τη ζώνη διαχωρισμού, όπου τα συσσωματώματα αέρα-κροκίδας διαχωρίζονται με επίπλευση (Irene Sancho et al., 2019).

Η δυναμική διήθηση άμμου (DSF) συγκρατεί την πλειονότητα των αιωρούμενων στερεών και για αυτό αποτελεί μια ικανοποιητική λύση για την απομάκρυνση στερεών στην προεπεξεργασία των λυμάτων) (Irene Sancho et al., 2019). Το νερό ρέει μέσα από την ενεργή κλίνη άμμου στην οποία γίνεται συγκράτηση των στερεών και το διηθημένο νερό απομακρύνεται ενώ η βρόμικη άμμος (άμμος με τα συγκρατημένα στερεά) μεταφέρεται διαρκώς σε ένα θάλαμο πλύσης και στην συνέχεια επιστρέφεται στην αρχική του θέση.

Τα συστήματα διήθησης με μεμβράνη αποτελούν ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες για τη συλλογή οργανικών ουσιών τόσο από τα οικιακά λύματα, όσο και από ιλύς που προκύπτει από συστήματα ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης και από δευτεροβάθμια επεξεργασία (Ime Akanyeti et al., 2010).

Χημικές διεργασίες όπως η χημικώς ενισχυμένη πρωτοβάθμια επεξεργασία (CEPT) κατά την οποία γίνεται προσθήκη χημικών ουσιών στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης ώστε να γίνει συσσωμάτωση των μικρότερων σωματιδίων σε μεγαλύτερα και να βελτιωθούν οι ιδιότητες της καθίζησης. Η ποσότητα της ιλύς που παράγεται όμως είναι 45% περισσότερη από την παραγόμενη ιλύς συμβατικού συστήματος ενεργού ιλύος, καθώς η ποσότητα των πηκτικών προστίθεται σε αυτή της ιλύος (Irene Sancho et al., 2019).

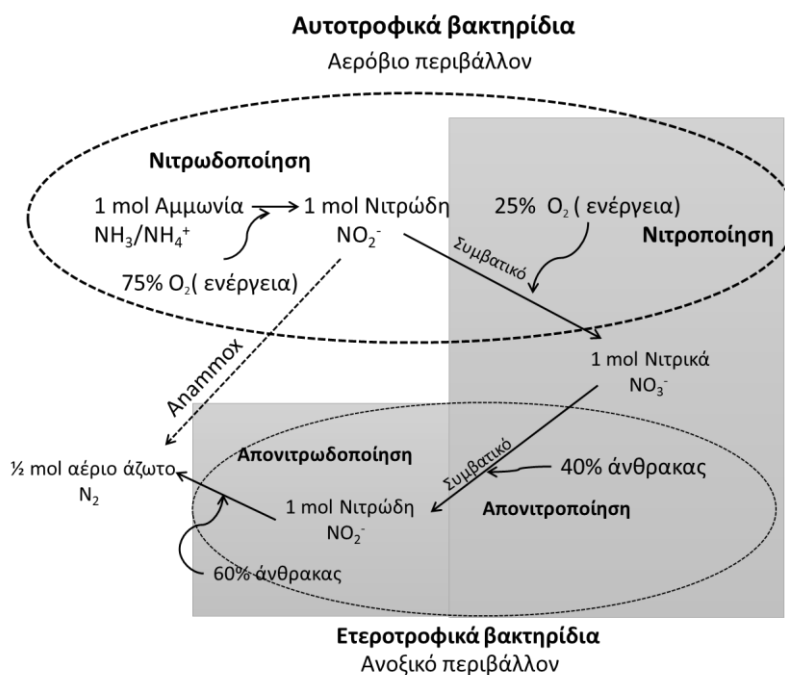
Βιολογικές διεργασίες που χρησιμοποιούν τη προσρόφηση όπως οι διεργασίες Προσρόφησης/Bio-οξείδωσης (A/B) και επαφής σταθεροποίησης. Οι δύο αυτές διεργασίες θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια.



Εικόνα 1: Διάγραμμα των διάφορων τεχνολογιών ανακατεύθυνσης άνθρακα, πηγή: Irene Sancho et al., 2019.

Σημαντικό ρόλο παίζει η ποιότητα της παραγόμενης ιλύος στην καθίζηση, καθώς κακές ιδιότητες καθίζησης δεν επιτρέπουν το καλό διαχωρισμό στερεών-υγρών και κατά συνέπεια μειώνεται η απόδοση του συστήματος. Εναλλακτικά της καθίζησης, μια ικανοποιητική επιλογή είναι η χρήση μεμβρανών, ώστε να πληρούνται τα επιθυμητά όρια εκροής, ενώ παράλληλα η απόδοση του συστήματος είναι ανεξάρτητη της ποιότητας της ιλύος όσον αφορά την ικανότητα της να καθιζάνει (Oskar Modin et al., 2016).

Όπως έχει προαναφερθεί, ένα σύστημα A/B περιλαμβάνει το HRAS στο A-στάδιο και στο B-στάδιο γίνεται απομάκρυνση αζώτου. Πρέπει λοιπόν να ληφθεί υπόψη πως αν η συγκέντρωση του άνθρακα στην έξοδο του A-σταδίου είναι μικρή και δεν ικανοποιεί την απαιτούμενη ποσότητα για απονιτροποίηση, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλοι τρόποι ώστε να ολοκληρώνεται η απομάκρυνση του αζώτου. Συγκεκριμένα, μια μέθοδος είναι η ανάπτυξη διαδικασιών που χρησιμοποιούν αναπνοο μικροοργανισμούς. Τα αναπνοο βακτήρια μετατρέπουν τα νιτρικά σε αέριο άζωτο χωρίς την ανάγκη οξειδωσης οργανικού άνθρακα μέσω της απονιτροποίησης (Oskar Modin et al., 2016). Άλλες μέθοδοι για την βελτίωση της απομάκρυνσης αζώτου στο σύστημα A/B είναι το A-stage Bypass, B-stage Effluent Recycle και Mixed Liquor Transfer (Mark W. Miller, 2015).



Εικόνα 2: Διαδικασία Νιτρωδοποίησης / Αναπνοο

Η διάκριση μεταξύ διαλυτού, σωματιδιακού και κολλοειδούς COD και η εστίαση στην παραγωγή ενέργειας από οργανικό άνθρακα μεταβάλλουν πλήρως τα ενεργειακά επιχειρήματα που έχουν γίνει πριν και τα οποία αγνόησαν αυτή τη διάκριση και συνεπώς το υψηλότερο ενεργειακό δυναμικό στο κλάσμα οργανικού άνθρακα. Επιπλέον, το EPS που παράγεται από τα βακτήρια θα μπορούσε να είναι ένα βασικό ρυθμιστικός παράγοντας κατά του οξειδοαναγωγικού κύκλου του άνθρακα που συλλέγει κολλοειδή και σωματιδιακά τα οποία αργότερα μπορούν να διαχωριστούν από το υγρό με καθίζηση. Ως εκ τούτου, η βιοκροκίδωση είναι το βασικό στοιχείο για τη μέγιστη ανάκτηση ενέργειας. Εκτός από τη βιολογική βιοκροκίδωση, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν χημικές ουσίες (όπως ο σίδηρος) για να αυξηθεί η ικανότητα βιοκροκίδωσης και να ελαχιστοποιηθεί η οξείδωση των οργανικών ουσιών. Ωστόσο, για να εξισορροπηθεί η μέγιστη βιοκροκίδωση με την επιθυμητή ποιότητα εκροής, απαιτείται καλύτερη κατανόηση των μεταβολικών ροών μέσα στο σύνθετο σύστημα. Αυτό θα επιτρέψει την άμεση διαχείριση του άνθρακα αντί της έμμεσης διαχείρισης του άνθρακα, η οποία είναι η κοινή πρακτική αυτή τη στιγμή. Παρά τη δυνατότητα εφαρμογής των διαδικασιών HRAS, ελάχιστες προσπάθειες καταβλήθηκαν για τη βελτίωση της λειτουργίας και της απόδοσης της διαδικασίας HRAS, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας ενώ παράλληλα να αυξηθεί το δυναμικό παραγωγής ενέργειας μέσω ελαχιστοποίησης της οξείδωσης COD για εκτροπή του προς αναερόβια χώνευση (Jose Jimenez et al., 2015).

Η κύρια πηγή δυνητικής ενέργειας στη διαδικασία υψηλής φόρτισης είναι το μεθάνιο, ένα παραπροϊόν που προκύπτει από την αναερόβια χώνευση λάσπης, αξιοποιώντας το COD των λυμάτων (Jose Jimenez et al., 2015).

Στις συνθήκες με υψηλό SRT, το μεγαλύτερο μέρος του COD χάνεται μέσω της οξείδωσης, με αποτέλεσμα ένα μικρό κλάσμα του COD να μεταφέρεται στην ιλύ αποβλήτων, παράγοντας κατ'επέκταση λιγότερο μεθάνιο. Σε αντίθεση, το σύντομο SRT στη διαδικασία υψηλής φόρτισης ωφελεί περισσότερο την μεταφορά του COD στη λάσπη και τελικά την μετατροπή του σε μεθάνιο μέσω της αναερόβιας χώνευσης λάσπης (Jose Jimenez et al., 2015).

2.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η διαδικασία της ενεργούς ιλύος (AS) αναπτύχθηκε περισσότερο από 100 χρόνια πριν και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση των βιοδιασπώσιμων οργανικών υλών καθώς διαφορετικά θα προκαλούσαν μείωση του οξυγόνου στα ύδατα εάν εκφορτώνονταν τα λύματα της μονάδας επεξεργασίας σε αυτά (Oskar Modin et al., 2016). Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά πειράματα στο Σταθμό Πειράματος Lawrence (Μασαχουσέτη, ΗΠΑ), από τα οποία οι Arden και Lockett (1914) θέλοντας να επεξεργαστούν τα αστικά λύματα, ανέπτυξαν τη διαδικασία ενεργού ιλύος (AS). Αρχικά χρησιμοποίησαν το συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος για να πετύχουν υψηλό βαθμό επεξεργασίας (όπως νιτροποίηση) καθώς πίστευαν πως οι κύριοι ρύποι που προκαλούν τα λύματα, οφείλονται στην αμμωνία και όχι στην οργανική ύλη. Αφού συνειδητοποίησαν πως τα οργανικά αιωρούμενα στερεά (TSS) και η διαλυμένη οργανική ύλη είναι αυτά που ρυπαίνουν, προέκυψε ότι μπορούσαν να αυξήσουν τη φόρτιση των οργανικών και μειώσουν τον όγκο αερισμού ώστε να απομακρύνονται μόνο τα αιωρούμενα στερεά και η διαλυτή οργανική ύλη, χωρίς δηλαδή την διαδικασία της νιτροποίησης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία του συστήματος υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (HRAS) (Mark W. Miller, 2015).

Την δεκαετία του '70 αναπτύχθηκε ένα σύστημα υψηλής φόρτισης και έγινε γνωστό, αλλά παρόλα αυτά δεν χρησιμοποιήθηκε τις επόμενες δεκαετίες καθώς ο στόχος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων εκείνη την εποχή ήταν η απομάκρυνση του ολικού αζώτου ώστε να πληρούνται τα τότε όρια εκροής (Jeremy Smitshuijzen et al., 2016). Σύμφωνα βέβαια με την Marthe S. de Graaff et al. (2016), την δεκαετία του '80 κατασκευάστηκαν μονάδες επεξεργασίας

λυμάτων δύο σταδίων που ήταν της μορφής A/B, σε χώρες όπως Γερμανία και Κάτω Χώρες και ολοκληρώθηκαν περίπου 50 μονάδες πλήρους κλίμακας που αφορούσαν και αστικά και βιομηχανικά απόβλητα.

2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ HRAS

Την δεκαετία του 1970 και του 1980 αναπτύχθηκε από τον Dr. Botho Böhnke και άλλους στο πανεπιστήμιο του Aachen της Γερμανίας η διαδικασία A/B, η οποία ανήκει στην κατηγορία συστημάτων ενεργού ιλύος και αποτελείται από δύο στάδια. Συγκεκριμένα, η ονομασία έχει προκύψει από τις γερμανικές λέξεις «Adsorptions - Belebungsanlagen» που σημαίνει «Προσρόφηση – Εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος» και μερικές φορές αναφέρεται ως «Προσρόφηση / Βιο-οξειδωση» (Boehnke et al., 1997). Η ορολογία περιγράφει τα δύο στάδια, καθώς το στάδιο-A αντιστοιχεί σε σύστημα ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης με μικρό SRT ώστε να γίνεται προσρόφηση του άνθρακα (μέσω της βιοσυσσωμάτωσης) πριν χαθεί (οξειδωθεί) και κατά συνέπεια την διάθεση του σε έναν αναερόβιο χωνευτή για συλλογή βιοαερίου. Ενώ το στάδιο-B που ακολουθεί το A, έχει στόχο την τελική απομάκρυνση άνθρακα, νιτροποίηση και απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου (Tim Constantine et al., 2012) και πιο συγκεκριμένα την βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών (BNR) ή αλλιώς βιο-οξειδωση (Jose Jimenez et al., 2013).

Ειδικότερα, το στάδιο A επιτυγχάνει υψηλή απόδοση απομάκρυνσης (τυπικά το 70-80% του συνολικού COD και το 80-95% των αιωρούμενων στερεών) (Jeremy Smitshuijzen et al., 2016) καθώς η υψηλή του ταχύτητα (π.χ. <1 ημέρα SRT, ~ 30 λεπτά HRT, <1 mgO₂ / L DO) οδηγεί στη συγκέντρωση του διογκωμένου σωματιδιακού, κολλοειδούς και διαλυτού COD (πλεονάζουσα ιλύς) με την κατανάλωση μικρού ποσού ενέργειας (Jose Jimenez et al., 2015). Επιπλέον, η πλεονάζουσα ιλύς μπορεί εναλλακτικά τις αναερόβιας χώνευσης, να ανακτήσει ενέργεια από τα λύματα με αποτέφρωση. Με την μέθοδο όμως της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να παράγει 0,5 κιλά μεθάνιο / κιλό COD απομακρυνόμενο σύμφωνα με το στάδιο A στο Rotterdam WRRF της Ολλανδίας (Jetten et al., 1997), ενώ παράλληλα αυξάνεται η απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου με αφομοίωση (Jetten et al., 1997). Επίσης, λόγω του μικρού SRT η πλεονάζουσα λάσπη που παράγεται από ένα στάδιο A έχει καλύτερα χαρακτηριστικά χώνευσης συγκριτικά με την λάσπη ενός τυπικού συστήματος ενεργού ιλύος (Jose Jimenez et al., 2015).

Η στροφή λοιπόν σε πιο ενεργειακά μικρό αποτύπωμα οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνολογιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που βασίζονται στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία τους ενώ παράλληλα γίνεται απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών. Η διαδικασία που αναπτύχθηκε για τον παραπάνω σκοπό είναι το HRAS (Thomas Nogaj, 2015).

Ένα σύστημα HRAS μπορεί είτε να συμμετέχει σε μια διαδικασία A/B ως το στάδιο-A με σκοπό την μεγιστοποίηση της απομάκρυνσης των οργανικών μέσω της προσρόφησης του άνθρακα (αντί οξειδωσης) για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ιλύος για την μετατροπή της σε βιοαέριο με αναερόβια χώνευση, είτε να λειτουργεί ως σύστημα οξειδωσης του άνθρακα με στόχο την πλήρωση των προτύπων εκροής (Jose Jimenez et al., 2013). Μια τυπική διαδικασία HRAS μπορεί να οριστεί με ένα SRT 1-3 ημερών, ένα HRT από 1.5 έως 3 ώρες και ένα DO ίσο με 2 mg / L (Thomas Nogaj, 2015).

Σε επίπεδο διεργασιών στο σύστημα HRAS, αναπτύσσονται ετεροτροφικά βακτηρίδια τα οποία καταναλώνουν το βιοδιασπασίμο COD, ένα μέρος του οποίου διασπάται σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και νερό, ένα άλλο κλάσμα αποθηκεύεται ως ενδοκυτταρικά βιοπολυμερή για

μεταγενέστερη χρήση και το υπόλοιπο χρησιμοποιείται για σύνθεση βιομάζας, αυξάνοντας την ποσότητα των μικροοργανισμών (Jeremy Smitshuijzen et al., 2016).

Για την διαδικασία HRAS ήταν απαραίτητο να γίνει η κλασματοποίηση του COD σε 3 κλάσματα: διαλυτό, κολλοειδές και σωματιδιακό. Τα σωματιδιακά και τα κολλοειδή υποστρώματα απομακρύνονται αποτελεσματικά από το διάλυμα με βιολογική κροκίδωση (προσρόφηση στη βιολογική κροκίδα) και μετέπειτα διαχωρισμό στερεών-υγρών. Το διαλυτό κλάσμα μπορεί να απομακρυνθεί με ενδοκυτταρική αποθήκευση, βιοσύνθεση ή βιολογική οξείδωση (Jose Jimenez et al., 2015). Στα περισσότερα συστήματα ενεργού ιλύους με μεγάλους χρόνους HRT και SRT δεν γίνεται η διαφοροποίηση σε κολλοειδές και σωματιδιακό και αντιμετωπίζεται όλο σαν σωματιδιακό. Αυτό συμβαίνει καθώς υπάρχει αρκετός χρόνος τόσο για το κολλοειδές όσο και για το σωματιδιακό ώστε να κροκιδωθεί και να διασπαστεί. Αντιθέτως, το σύστημα HRAS (χαμηλοί χρόνοι HRT και SRT) δεν έχει αρκετό χρόνο ώστε να απομακρυνθεί και το κολλοειδές και το σωματιδιακό COD για αυτό και είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη και τα δύο κλάσματα καθώς μεταβάλλονται με διαφορετικούς ρυθμούς. Επίσης, από τα παραπάνω στα συστήματα HRAS αναμένεται υψηλότερη τιμή COD στην έξοδο από τα κλασικά συστήματα ενεργού ιλύος (Thomas Nogaj et al., 2013).

Ειδικότερα ο τρόπος ορισμού των κλασμάτων COD για το συγκεκριμένο σύστημα προέκυψε ως εξής: Το σωματιδιακό COD (pCOD) ορίστηκε ως η διαφορά μεταξύ του συνολικού COD και του φιλτραρισμένου COD που πέρασε ένα φίλτρο 1,5 micron. Το κλάσμα του κολλοειδούς COD (cCOD) ορίστηκε ως η διαφορά COD μεταξύ του σωματιδιακού COD και των διαλυτών συγκεντρώσεων COD. Το διαλυτό κλάσμα COD (sCOD) ορίζεται ως ffCOD ανά Mamais et al. (1993) μέθοδος (Jose Jimenez et al., 2015).

2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΟΥ COD

2.4.1 EPS (Εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες)

Οι εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (extracellular polymer substances, EPS) είναι αναγκαίες για την ύπαρξη όλων των μικροβιακών συσσωματωμάτων καθώς αποτελούν το δομικό υλικό που είναι υπεύθυνο για την πρόσφυση των κυττάρων ή την συσσωμάτωση των βακτηρίων. Τα EPS κατά κύριο λόγο αποτελούνται από πρωτεΐνες και πολυσακχαρίτες με μεγαλύτερο μέρος να αναλογεί στις πρωτεΐνες, ειδικότερα ο λόγος πρωτεΐνης / πολυσακχαρίτη κυμαίνεται στην περιοχή από 2 έως 5. Επίσης ο Higgins και ο Novak (1997) διαπίστωσαν ότι η πρωτεΐνη παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στην βιοκροκίδωση της ενεργούς ιλύος και εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωση των κατιόντων. Συγκεκριμένα, τα κατιόντα ευθύνονται για την ανάπτυξη ενός σταθεροποιημένου δικτύου βιοπολυμερών και ειδικότερα τα δισθενή κατιόντα δεσμεύουν την εξωκυτταρική πρωτεΐνη εντός της βιολογικής κροκίδας με αποτέλεσμα το δίκτυο βιοπολυμερών να έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά καθίζησης και αφυδάτωσης. Στην περίπτωση βέβαια που σχηματιστούν υψηλές συγκεντρώσεις μονοσθενών κατιόντων, τα δισθενή κατιόντα απομακρύνονται από το εσωτερικό της κροκίδας μειώνοντας έτσι την περιεκτικότητα δεσμευμένης πρωτεΐνης και κατά συνέπεια επιδεινώνονται τα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας της ιλύος (Higgins and Novak, 1997).

Σύμφωνα με Laspidou και Rittmann, (2002), οι εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS) είναι ένα μικροβιακώς παραγόμενο οργανικό υλικό που περιέχει ηλεκτρόνια και άνθρακα, αλλά όχι ενεργά κύτταρα. Αυτό είναι σημαντικό δεδομένου ότι η εκτροπή ηλεκτρονίων και άνθρακα μακριά από τη βιοσύνθεση στο σχηματισμό EPS επηρεάζει τόσο την απόδοση του κυττάρου όσο και τον ρυθμό ανάπτυξης. Γενικότερα, στα συστήματα ενεργούς ιλύος ισχύει η άποψη ότι τα ηλεκτρόνια του υποστρώματος στρέφονται προς δύο κατευθύνσεις, είτε στον αποδέκτη ηλεκτρονίων για τη δημιουργία ενέργειας, είτε στη σύνθεση βιομάζας (Rittmann and McCarty, 2001). Όταν ένα σημαντικό τμήμα των ηλεκτρονίων μετατοπίζεται/στρέφεται στην παραγωγή EPS, λιγότερα είναι διαθέσιμα για τη σύνθεση βιομάζας και κατά συνέπεια μειώνεται ο συγκεκριμένος ρυθμός ανάπτυξης.

Η παραγωγή εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών (EPS) επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης με βιοκροκίδωση του σωματιδιακού και κολλοειδούς υποστρώματος. Τα προηγούμενα μοντέλα θεωρούσαν πως γίνεται άμεση ενσωμάτωση, ενώ στα συστήματα υψηλής φόρτισης δεν μπορεί να παραβλεφθεί. Από έρευνες προέκυψε πως τα EPS είναι συνάρτηση της ανάπτυξης βιομάζας (ως πτητικών αιωρούμενων στερεών VSS), του ποσοστού υδρόλυσης του ΧΒ (βραδέως βιοδιασπάσιμο υποστρώματος), της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου από τον αντιδραστήρα και του ρυθμού υδρόλυσης των EPS. Τα δεδομένα δείχνουν ότι η παραγωγή EPS αυξάνεται με αύξηση τόσο του SRT (0,3 έως 2 ημέρες) όσο και του DO (0,01 έως 2 mg/L σε SRT 1,5 ημερών) (Thomas Nogaj, 2015).

Τα διαλυτά μικροβιακά προϊόντα (SMP) ορίζονται ως διαλυτά κυτταρικά συστατικά που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της κυτταρικής λύσης, διαχέονται μέσω της κυτταρικής μεμβράνης, χάνονται κατά τη διάρκεια της σύνθεσης ή εκκρίνονται για ένα σκοπό. Η χρήση υποστρώματος, η αποσύνθεση της βιομάζας και η υδρόλυση εξωκυτταρικών πολυμερικών ουσιών (EPS) πιστεύεται ότι είναι οι διαδικασίες που συμβάλλουν περισσότερο στον σχηματισμό SMP. Το SMP μπορεί να διαιρεθεί σε προϊόντα που σχετίζονται με τη χρήση (utilisation-associated products, UAP) και σε προϊόντα που σχετίζονται με τη βιομάζα (biomass-associated products, BAP). Τα UAP παράγονται κατά τη διάρκεια του μεταβολισμού του υποστρώματος. Τα BAP σχηματίζονται από βιομάζα. Και τα δύο είδη είναι βιοδιασπάσιμα (Veerle De Smedt et al., 2015).

Τα EPS είναι ένα σύνθετο μίγμα υψηλού μοριακού βάρους πολυμερών που περιβάλλουν τα κύτταρα. Με άλλα λόγια είναι τα μόρια που καθιστούν δυνατή τη δημιουργία πολυ-μικροβιακών συσσωματωμάτων. Μια άλλη σημαντική λειτουργία του EPS είναι η προσρόφιση οργανικών ενώσεων και ανόργανων ιόντων στα συσσωματώματα. Τα χαρακτηριστικά, όπως η ικανότητα προσρόφισης και η σύνθεση του EPS, έχουν βρεθεί ότι επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες των μικροβιακών συσσωματωμάτων, όπως τη σταθερότητα και τη δομή τους (Veerle De Smedt et al., 2015).

2.4.2 Εσωτερική αποθήκευση (storage)

Με την παρουσία εξωτερικού υποστρώματος, οι οργανισμοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν το υπόστρωμα για ανάπτυξη ή για σχηματισμό προϊόντων αποθήκευσης (Thomas Nogaj, 2015). Η παρουσία βιοδιασπάσιμων αποθηκευτικών ενώσεων όπως πολυυδροαλκαλικών ενώσεων (PHA) και γλυκογόνων σε ενεργό ύψος είναι συχνό φαινόμενο με πιο συνηθισμένες μορφές του PHA στην ενεργό λάσπη να είναι πολυυδροβουτυρικών ενώσεων (PHB) και πολυυδροξυβαλερικών ενώσεων (PHV) (Veerle De Smedt et al., 2015).

Η αποθήκευση υποστρωμάτων έχει παρατηρηθεί συνηθέστερα κατά τη διάρκεια περιόδων κατά τις οποίες η ανάπτυξη μιας καλλιέργειας περιορίζεται από βιοσυνθετικό περιορισμό, ενώ είναι διαθέσιμη μια αξιοποιήσιμη πηγή άνθρακα και ενέργειας. Οι οργανισμοί που μπορούν να συνθέσουν προϊόντα αποθήκευσης, διαθέτουν ένα εκλεκτικό πλεονέκτημα σε περιβάλλοντα όπου η συγκέντρωση του εξωκυτταρικού υποστρώματος ποικίλει (π.χ. καθεστώς γιορτής-πείνας (feast/famine)) (Veerle De Smedt et al., 2015). Σε αυτά τα περιβάλλοντα, τα πολυμερή αποθήκευσης σχηματίζονται σε περιόδους υψηλής συγκέντρωσης υποστρώματος. Αυτά τα πολυμερή εξασφαλίζουν μικροβιακή επιβίωση κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής συγκέντρωσης υποστρώματος. Τα συστήματα σταθεροποίησης επαφής υψηλής φόρτισης (HiCS) είναι ένα παράδειγμα του καθεστώτος της γιορτής-πείνας (Meerburg et al., 2015).

Οι πολυυδροβουτυρικές ενώσεις (PHB) ήταν το κυρίαρχο πολυμερές αποθήκευσης υπό συνθήκες περίσσειας οξικού εστέρα (Van Aalst-Van Leeuwen et al., 1997). Υπό συνθήκες πλεονάσματος άνθρακα ο ρυθμός πρόσληψης υποστρώματος θα είναι μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για την ανάπτυξη. Ο σχηματισμός του NAPH₂ προκύπτει από την πρόσληψη υποστρώματος το οποίο καταναλώνεται με οξειδωτική φωσφορύλιωση με αποτέλεσμα το

σχηματισμό τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP) και NAD⁺. Εάν η κατανάλωση του ATP είναι περιορισμένη, τότε το ATP θα συσσωρευτεί με αποτέλεσμα την επακόλουθη συσσώρευση NAD⁺. Ως αποτέλεσμα, η παραγωγή PHB είναι πολύ πιθανή, αφού ο σχηματισμός PHB απαιτεί NADH₂. Μια βασική προϋπόθεση του μεταβολικού μοντέλου δηλώνει ότι η σύνθεση της βιομάζας αποτελείται από δύο διαμερίσματα (Van Aalst-Van Leeuwen et al., 1997), ένα ενεργό διαμέρισμα βιομάζας και ένα διαμέρισμα PHB. Η ενεργός βιομάζα είναι ικανή για αναπαραγωγή και ανάπτυξη και το διαμέρισμα PHB για αποθήκευση άνθρακα και ενέργειας. Το κλάσμα του PHB στη βιομάζα αντιπροσωπεύεται από το fPHB. Το κλάσμα της ενεργού βιομάζας στη συνολική βιομάζα είναι μικρότερο από 1-fPHB. Οι Van Aalst-Van Leeuwen et al. (1997) ανέπτυξαν ένα μεταβολικό μοντέλο για την παραγωγή και κατανάλωση PHB σε βακτηριακά κύτταρα σε μια καθαρή καλλιέργεια που υπόκειται σε συνθήκες γιορτής / λιμού. Η στοιχειομετρία περιγράφεται από επτά εσωτερικές αντιδράσεις (Thomas Nogaj, 2015).

2.5 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ HRAS

Είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη όλες οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα HRAS και είναι σημαντικές εξαιτίας των χαρακτηριστικών του όπως ο υψηλός λόγος F:M και οι χαμηλοί υδραυλικοί χρόνοι και παραμονής στερεών. Παρακάτω θα αναλυθούν όλες οι διεργασίες που παίζουν σημαντικό ρόλο στο σύστημα.

2.5.1 Προσρόφηση

Προσρόφηση είναι η φυσικοχημική διαδικασία προσκόλλησης του σωματιδιακού και του κολλοειδούς κλάσματος του COD των λυμάτων στην εξωτερική επιφάνεια των κροκίδων (Guellil, et al., 2001). Είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα πριν την υδρόλυση και ολοκληρώνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε συστήματα HRAS. Ακολουθεί κινητική 1^{ης} τάξης και αναλυτικότερα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ιστό του EPS που έχει σχηματιστεί, καθώς όταν υπάρχει μεγάλη ποσότητα EPS, γίνεται προσκόλληση των κολλοειδών και σωματιδιακών υποστρωμάτων στο EPS με την διαδικασία της προσρόφησης και απομακρύνεται έτσι το COD. Ο χρόνος της προσρόφησης είναι πολύ μικρός με και κατά συνέπεια σε μια περίπτωση υδραυλικού χρόνου διάρκειας 5 με 15 λεπτά, προλαβαίνει να προσροφηθεί στη βιομάζα μεγάλη ποσότητα COD.

2.5.2 Βιοπροσρόφηση

Η βιοπροσρόφηση αποτελεί συλλογικό όρο για τις διαδικασίες μη καταστροφικής πρόσληψης υποστρώματος (δηλ. συσσώρευση, προσρόφηση και αποθήκευση), με άλλα λόγια είναι η διεργασία κατά την οποία μικροοργανισμοί προσλαμβάνουν μια ουσία είτε με τη μορφή αποθήκευσης είτε συσσώρευσης και προσρόφησης στην εξωτερική επιφάνεια άλλων οργανικών ενώσεων ή μικροοργανισμών (Francis Meerburg, 2016). Τα παραπάνω καθιστούν την βιοπροσρόφηση τόσο ως μια φυσικοχημική διεργασία (προσρόφηση, παγίδευση άνθρακα στην κροκίδα) όσο και ως μια βιολογική διεργασία (ενδοκυτταρική αποθήκευση του διαλυτού υποστρώματος) (Xiaochun Zhang et al., 2014). Η φυσικοχημική προσρόφηση των διαλυτών υποστρωμάτων και η μικρο-καθίζηση παίζει ρόλο στη διαδικασία βιοπροσρόφησης. Η συγκέντρωση και η σύνθεση EPS παίζουν σημαντικό ρόλο στην βιοπροσρόφηση εφόσον η βιοπροσρόφηση λαμβάνει ουσιαστικά χώρα στο στρώμα εξωτερικών επιφανειών των μικροβιακών κυττάρων και των νευρώσεων. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας βιοπροσρόφησης εξαρτάται και από τη σύνθεση των λυμάτων και των περιβαλλοντικών συνθηκών (Veerle De Smedt et al., 2015). Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται σε αρκετά γρήγορο χρόνο, καθώς σε 30 λεπτά η προσρόφηση της οργανικής ύλης στην ενεργό ιλύ έχει φτάσει στον κορεσμό (Xiaochun Zhang et al., 2014).

2.5.3 Βιοκροκίδωση

Η διεργασία βιοκροκίδωσης ορίζεται ως η φυσική συσσωμάτωση κολλοειδών σωματιδίων και αιωρούμενων στερεών με μικροβιακή δραστηριότητα. Τα οργανικά και ανόργανα σωματίδια

στη συνέχεια κροκιδώνονται σε μικροβιακά συσσωματώματα (Veerle De Smedt et al., 2015). Με άλλα λόγια το βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα μετατρέπεται σε εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS) οι οποίες σχηματίζουν το στέλεχος των συσσωματωμένων βακτηρίων, δηλαδή την κροκίδα.

Η ικανότητα κροκιδώσης της ιλύος ελέγχεται από διαφορετικές επιφανειακές ιδιότητες που σχετίζονται με το EPS. Σύμφωνα με τους Liao et al. (2001), η ικανότητα κροκιδώσης επηρεάζεται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες της ιλύος, συμπεριλαμβανομένης της υδροφοβικότητας και του επιφανειακού φορτίου, και όχι από την ποσότητα του EPS. Υποστηρίζεται ότι παρόλο που το EPS είναι απαραίτητο για τον σχηματισμό κροκιδών, το υπερβολικό EPS με τη μορφή χαλαρά συνδεδεμένου EPS (LB-EPS) αποδυναμώνει την προσκόλληση των κυττάρων και επιδεινώνει τη δομή της κροκίδας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάβρωση των κυττάρων και κακό διαχωρισμό στερεών-υγρών (Veerle De Smedt et al., 2015).

Οι μικροοργανισμοί παράγουν βιοπολυμερή που απελευθερώνονται στο εξωκυτταρικό περιβάλλον, είτε με κυτταρική λύση είτε με ενεργή μεταφορά. Αυτά τα εξωκυτταρικά βιοπολυμερή ή οι εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS) αποτελούνται τυπικά από πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες, χουμικές ενώσεις, νουκλεϊκά οξέα και λιπίδια. Τα βιοπολυμερή στη συνέχεια σχηματίζουν έναν ιστό ο οποίος περικλείει τα μικρόβια βοηθώντας έτσι στην συσσωμάτωση του μικροοργανισμού και στον σχηματισμό κροκίδας. Η μάζα του συνολικού EPS σε μια κροκίδα έχει βρεθεί ότι αντιπροσωπεύει έως και 80% της μάζας ενεργού ιλύος (David C. Sobek και Matthew J. Higgins , 2002).

Γενικά βρέθηκε πως οι βιοκροκίδες έχουν καθαρό αρνητικό φορτίο, το απορρέει από λειτουργικές ομάδες που υπάρχουν στα EPS. Όπως αναφέρθηκε τα EPS αποτελούνται από πολυσακχαρίτες που περιέχουν ουρανικά οξέα που ανήκουν στις καρβοξυλομάδες, οι οποίες συμβάλλουν στο αρνητικό φορτίο της βιοκροκίδας και πρωτεΐνες οι οποίες είναι πλούσιες σε αμινοξέα που περιέχουν καρβοξυλομάδες όπως γλουταμικό και ασπαρτικό οξύ που επίσης συνεισφέρουν στο αρνητικό φορτίο των κροκιδών. Ο ρόλος των κατιόντων έχει αποδειχθεί πολύ σημαντικός στην βιοκροκιδώση και από έρευνες έχουν προκύψει τρεις διαφορετικές θεωρίες που σχετίζονται με τους μηχανισμούς που τα κατιόντα επηρεάζουν την βιοκροκιδώση (David C. Sobek και Matthew J. Higgins , 2002). Αυτές οι θεωρίες είναι:

1. Θεωρία διπλής επίστρωσης ή Θεωρία DLVO.
2. Θεωρία αλγινικού άλατος.
3. Θεωρία γεφύρωσης δισθενούς κατιόντων.

Αν και το στάδιο-A αναφέρεται ως διαδικασία προσρόφησης, οι Böhnke et al., (1997) ανέφεραν πως μόνο το 10% του COD απομακρύνεται μέσω προσρόφησης. Αυτό είναι πιθανό επειδή το SRT του σταδίου-A είναι πολύ σύντομο για επαρκή παραγωγή EPS που θα είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη βιοκροκιδώση της πλειονότητας του κολλοειδούς και σωματιδιακού υλικού. Ο HRT 30 λεπτών ενός σταδίου-A δεν είναι περιοριστικός από την άποψη χρόνου βιοκροκιδώσης. Όταν υπάρχει επαρκής ποσότητα EPS με διαθέσιμους χώρους προσρόφησης το οποίο συμβαίνει όταν το SRT είναι μεγαλύτερο της 1,5 ημέρας, τότε η προσρόφηση έχει ολοκληρωθεί εντός 15-20 λεπτών.

2.5.4 Υδρόλυση

Όπως προαναφέρθηκε, καθώς μόνο τα μικρά και απλά μόρια (όπως οξικό οξύ και γλυκόζη) μπορούν να μεταφερθούν μέσω κυτταρικών μεμβρανών των βακτηρίων, ένα πολύπλοκο υπόστρωμα πρέπει να υποβληθεί βαθμιαία σε αποπολυμερισμό και υδρόλυση έτσι ώστε να μπορέσει στην συνέχεια να μεταβολιστεί. Αυτά τα υποστρώματα πρέπει να διατίθενται μέσω εξωτερικών ενζυμικών αντιδράσεων οι οποίες παράγουν ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους

ώστε να μπορούν να μεταφερθούν μέσω της κυτταρικής μεμβράνης. Τα εξωκυτταρικά ένζυμα παράγονται ως μέρος του συστήματος σύνθεσης πρωτεϊνών (PSS) και απελευθερώνονται από τους οργανισμούς, πολλά από τα οποία είναι υδρολάσες (προσθέτουν ή απομακρύνουν νερό χωρίς οξειδωση ή αναγωγή), αλλά μπορούν να είναι ειδικές κυτταρίνες (κυτταρίνη), αμυλάσες (άμυλο), λιπάσες, και πρωτεάσες (πρωτεΐνη), ή μπορούν να είναι γενικά ή μη ειδικά ένζυμα ικανά να αποδοθούν ποικιλία ενώσεων. Η παραγωγή εξωκυτταρικών ενζύμων κοστίζει στον οργανισμό από άποψη ενέργειας και υλικών. Έχει γίνει γνωστό εδώ και αρκετό καιρό ότι η υδρόλυση είναι τυπικά το στάδιο περιορισμού της ταχύτητας στις οδούς μεταβολισμού υποστρώματος. Χρησιμοποιώντας τόσο καθαρές όσο και μικτές καλλιέργειες υπό διαφορετικές συνθήκες δέκτη ηλεκτρονίων παρατηρήθηκε μικρή αλλαγή στον ειδικό ρυθμό υδρόλυσης όταν τα εξωκυτταρικά ένζυμα ήταν δεσμευμένα σε EPS. Ωστόσο, η παραγωγή υδρολυτικών ενζύμων επηρεάστηκε από τις συνθήκες δέκτη ηλεκτρονίων αλλά δεν ήταν τόσο εμφανής στο σύστημα μικτής καλλιέργειας (Thomas Nogaj, 2015).

Το μοντέλο HRAS περιέχει πολλές διαδικασίες υδρόλυσης, όπως φαίνεται παρακάτω:

- Υδρόλυση παγιδευμένων οργανικών για τον σχηματισμό αργού βιοδιασπάσιμου υποστρώματος (XB → SBs).
- Υδρόλυση προϊόντων αποθήκευσης για τον σχηματισμό γρήγορου βιοδιασπάσιμου υποστρώματος (XSTO → SBf).
- Υδρόλυση EPS για τον σχηματισμό γρήγορου βιοδιασπάσιμου υποστρώματος (XEPS → SBf).

2.5.5 Διάχυση

Η διαδικασία απομάκρυνσης του διαλυτού COD ξεκινάει πρώτα με την παγίδευση του στο πλέγμα των EPS και στην συνέχεια με την εισαγωγή του στο εσωτερικό του κυττάρου. Η εισαγωγή του στο κύτταρο προέκυψε ότι πραγματοποιείται με την διεργασία της διάχυσης. Συγκεκριμένα, η διάχυση ή παθητική μεταφορά περιγράφει τη τάση των μορίων μιας ουσίας να διασπείρονται από περιοχές υψηλότερης συγκέντρωσης προς περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης. Η τάση αυτή εκδηλώνεται με αντίστοιχη μετακίνηση των μορίων.

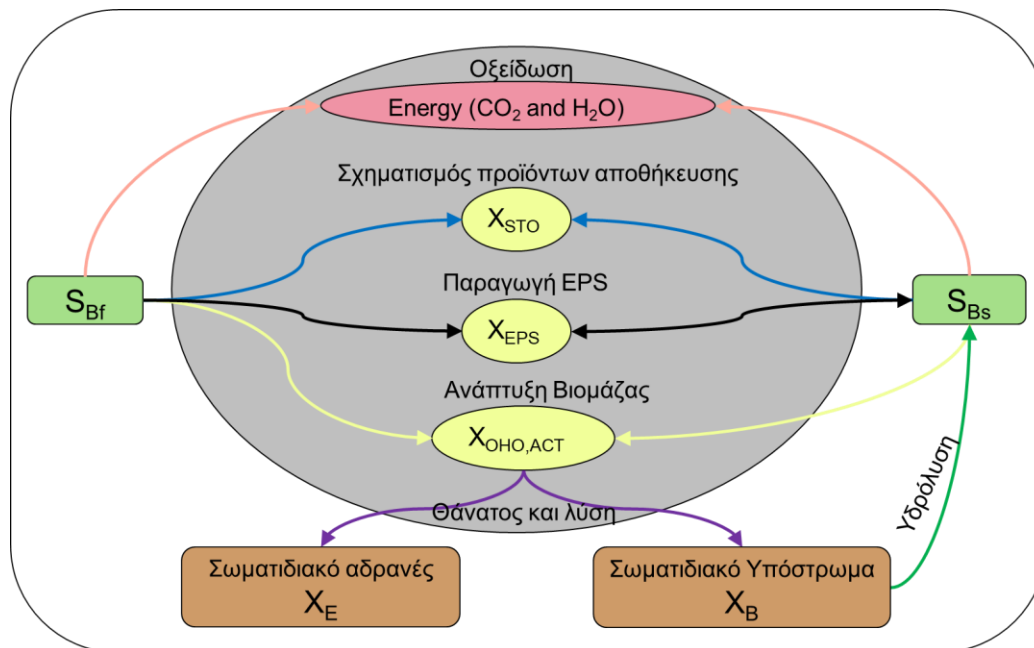
Παρόλο λοιπόν που η διάχυση είναι μια διεργασία που λαμβάνει χώρα στο σύστημα HRAS, δεν έχει μεγάλη βαρύτητα καθώς ο χρόνος που απαιτείται για την διάχυση είναι πολύ μικρότερος συγκριτικά με τις άλλες διεργασίες (ανάπτυξη βιομάζας, προσρόφησης, βιοκροκίδωσης).

2.5.6 Ανάπτυξη Βιομάζας

Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών απαιτεί κατανάλωση άνθρακα, ενέργειας και άλλα θρεπτικά όπως άζωτο και φώσφορο. Οι κινητικές που περιγράφουν την ανάπτυξη της βιομάζας είναι κινητικές Monod.

2.5.7 Φθορά – Ενδογενής Αναπνοή

Το μοντέλο HRAS ενσωματώνει την έννοια φθοράς για να απεικονίσει την απώλεια βιομάζας σε βιοχημικές λειτουργίες. Με βάση την υπόθεση ότι υπάρχει μόνο ενεργής, βιώσιμη βιομάζα. θεωρείται ότι υφίσταται συνεχώς θάνατος και λύση του κυττάρου, αποδίδοντας σωματιδιακό υπόστρωμα (XB) και θραύσματα βιομάζας. Μόλις μετατραπεί σε XB, εισέρχεται στον κύκλο υδρόλυσης όπου μετατρέπεται σε SBs και διατίθεται ως υπόστρωμα για ανάπτυξη. Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα για το μοντέλο HRAS.



Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση της λύσης, πηγή: Thomas Nogaj, 2015

2.6 ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η διαδικασία HRAS είναι μια μέθοδος με πρωταρχικό στόχο την ελαχιστοποίηση της οξείδωσης του οργανικού υποστρώματος, μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα την βιοκροκίδωση των κολλοειδών και σωματιδιακών οργανικών ενώσεων. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις DO (π.χ., DO < 0.1 mgO₂ / L) επηρεάζουν σημαντικά την απομάκρυνση του διαλυτού COD. Ωστόσο, αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απομάκρυνση των σωματιδίων από το σύστημα λόγω της χαμηλής παραγωγής EPS και της βιοκροκίδωσης. Η χρήση του SRT ως μέσου για τον έλεγχο της απομάκρυνσης του sCOD στο σύστημα HRAS φαίνεται πιθανή. Ωστόσο, η βιοκροκίδωση και η παραγωγή EPS είναι πολύ περιορισμένη στις χαμηλές συνθήκες SRT με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η απομάκρυνση του διαλυτού COD. Συνεπώς, ανάλογα με τον γενικό στόχο του συστήματος HRAS, είναι απαραίτητο να δίνεται βάρος στον καλό συνδυασμό των παραμέτρων λειτουργίας και όχι μεμονωμένα στην κάθε παράμετρο. Επίσης όσο μικρότερος ο χρόνος SRT, τόσο περισσότερη ποσότητα ιλύος παράγεται, καθώς η απώλεια βιομάζας λόγω ενδογενούς αναπνοής και υδρόλυσης κολλοειδούς και σωματιδιακού υποστρώματος είναι μικρότερη σε σύγκριση με την ανάπτυξη βιομάζας (Jose Jimenez et al., 2015).

2.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας δύο σταδίων μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν από τον χρόνο παραμονής στερεών που επιλέγεται για το στάδιο απομάκρυνσης του άνθρακα. Τέτοιες εγκαταστάσεις μπορούν ευρέως να ταξινομηθούν ως συμβατική επεξεργασία δύο σταδίων, και ως διαδικασία A / B. Η πρώτη μέθοδος τυπικά περιλαμβάνει ένα στάδιο επεξεργασίας απομάκρυνσης άνθρακα με SRT μεταξύ 3-15 ημερών. Η τελευταία διαδικασία τυπικά λειτουργεί σε SRT μικρότερο από 2 ημέρες (Tim Constantine et al., 2012).

2.7.1 Συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος (CAS)

Το συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος (CAS) είναι ένα από τα πρώτα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για απομάκρυνση άνθρακα και θρεπτικών ουσιών. Ένα τέτοιο σύστημα όμως έχει ως προτεραιότητα την ικανοποίηση των ορίων εκροής και όχι την ανάκτηση πόρων.

Αν ληφθεί υπόψη πως μια τυπική μονάδα CAS απαιτεί καθαρή ετήσια κατανάλωση ενέργειας της τάξης των 40 kWh ανά ισοδύναμο πληθυσμού, παρόλο που η θερμοδική ενεργειακή περιεκτικότητα των ακατέργαστων οικιακών λυμάτων υπερβαίνει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για λειτουργία μια εγκατάστασης CAS τουλάχιστον κατά 9 φορές (Shizas and Bagley, 2004). Επομένως, είναι εφικτή η επεξεργασία υγρών αποβλήτων με ουδέτερη ή θετική ενέργεια (Jenicek et al., 2013). Τρόπος αξιοποίησης της θερμοδικής ενέργειας των λυμάτων είναι η παραγωγή μεθανίου με την διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Για να ανακτηθεί η μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί από τα λύματα, θα πρέπει να αποφεύγεται όσο το δυνατόν περισσότερο η οξείδωση των οργανικών ενώσεων, ενώ τα επακόλουθα στάδια επεξεργασίας για την ανάκτηση θρεπτικών ουσιών και συμμόρφωσης με πρότυπα εκροής ή επαναχρησιμοποίησης πρέπει να σχεδιάζονται και να λειτουργούν με κύριο στόχο την μέγιστη ενεργειακή απόδοση (Francis Meerburg et al., 2015).

Περίπτωση με πρωτοβάθμια επεξεργασία - καθίζηση

Η συγκέντρωση της οργανικής ύλης μπορεί να επιτευχθεί με πρωτογενή κατακρήμιση ή χημικώς ενισχυμένη πρωτογενή κατακρήμιση (CEPT), που επιτυγχάνουν την απομάκρυνση των σωματιδίων περίπου 60% και 85% αντίστοιχα. Η CEPT, που ακολουθείται από αναερόβια χώνευση της παραγόμενης ιλύος, έχει προταθεί ως υποψήφια τεχνολογία για την επίτευξη ενεργειακά ουδέτερης επεξεργασίας λυμάτων. Ωστόσο, η CEPT δεν έχει βελτιστοποιηθεί για την απομάκρυνση της διαλυμένης οργανικής ύλης, η οποία περιορίζει τη μέγιστη ποσότητα που μπορεί να ανακτηθεί και αφήνει ένα σημαντικό κλάσμα οργανικών ουσιών προς επεξεργασία σε επόμενα στάδια (Huseyin Guven et al., 2019).

2.7.2 Σύστημα επαφής σταθεροποίησης CS

Το σύστημα CS είναι καταλληλότερο από ένα συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος όσον αφορά την ανάκτηση χημικής ενέργειας από τα λύματα, καθώς επιπλέον διεργασίες που συμβάλλουν στην συνολική απομάκρυνση του υποστρώματος είναι η προσρόφηση και η εσωτερική αποθήκευση. Αναλυτικότερα, σε αυτό το σύστημα η ιλύς επανακυκλοφορίας μεταφέρεται σε μια δεξαμενή σταθεροποίησης η οποία αερίζεται για ένα διάστημα αρκετών ωρών ώστε να αναγεννηθεί η λάσπη. Στη συνέχεια η ιλύς αναμειγνύεται με την εισροή σε μια δεξαμενή επαφής υπό ανοξικές συνθήκες για μικρό χρονικό διάστημα (από λεπτά έως κάποιες ώρες) και γίνεται η απομάκρυνση του υποστρώματος. Αυτή η διαδικασία με τις δύο φάσεις (σταθεροποίησης και επαφής) οδηγεί σε συνθήκες γιορτής – πείνας καθώς υπάρχει μεταβολή του υποστρώματος και ευνοείται έτσι η επιλογή υποστρώματος από προσρόφηση και εσωτερική αποθήκευση (Francis Meerburg et al., 2015).

Συστήματα στην κατηγορία HRAS

Τα συστήματα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος μπορούν να έχουν υποκατηγορίες εξαρτόμενα από τη διάταξη τους. Συγκεκριμένα, δύο υποκατηγορίες που αναφέρονται είναι το σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής σταθεροποίησης HiCS και το συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης HiCAS.

2.7.3 Συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης HiCAS

Το σύστημα HiCAS έχει διαμόρφωση του αντιδραστήρα παρόμοια με το CAS: μια δεξαμενή επαφής ή φάση επαφής στην οποία η ιλύς επανακυκλοφορίας αναμειγνύεται με την εισροή υπό αερόβιες συνθήκες πλήρους μίγματος, ακολουθούμενη από μια δεξαμενή καθίζησης ή μια φάση καθίζησης για να γίνει ο διαχωρισμός υγρών/στερεών. Οι σύντομοι υδραυλικοί χρόνοι (HRT) στο σύστημα HiCAS, δηλαδή μικρότεροι των 30 λεπτών, επιτρέπουν την ταχεία απομάκρυνση των οργανικών με τυπικές αποδόσεις απομάκρυνσης να κυμαίνονται από 50% έως 70%. Άλλα χαρακτηριστικά αυτού του συστήματος είναι ο ειδικός ρυθμός φόρτισης της ιλύος στο εύρος 2 έως 10 g βιοδιασπώμενης χημικής ζήτησης οξυγόνου (bCOD) ανά γραμμάριο πτητικών

αιωρούμενων στερεών (VSS) ανά ημέρα και χρόνους παραμονής στερεών (SRT) στο εύρος αρκετών ωρών έως 2 ημερών. Αυτά τα συστήματα όπως προαναφέρθηκε, ευνοούν την ανάκτηση ενέργειας μέσω της παραγωγής βιοαερίου (Francis Meerburg et al., 2015).

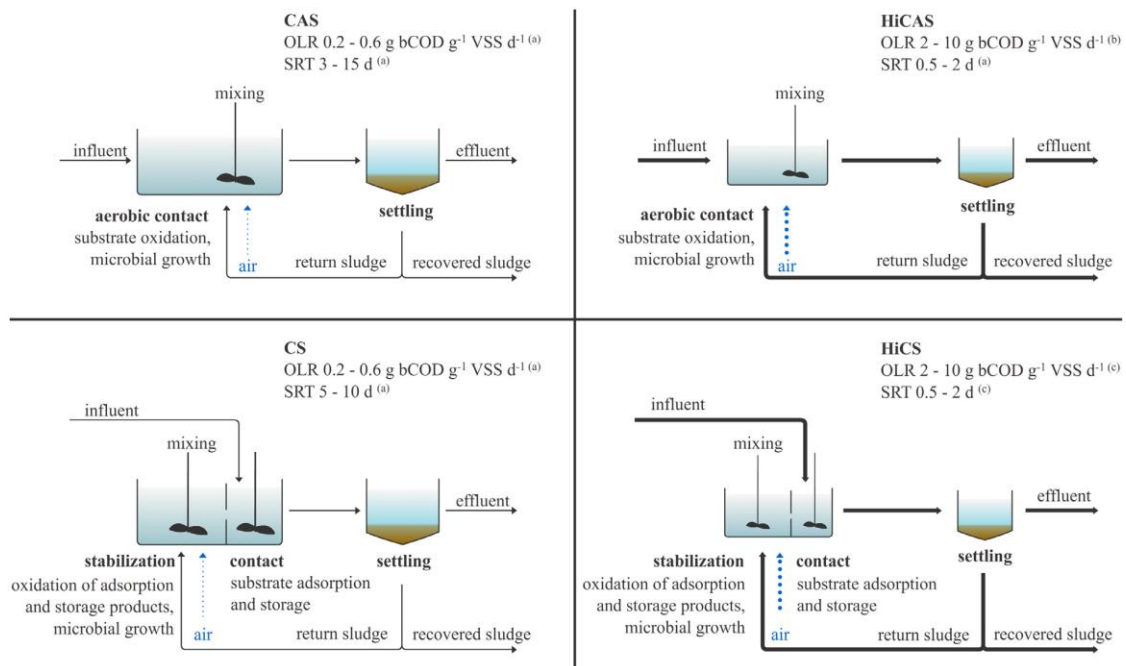
2.7.4 Σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής σταθεροποίησης HiCS

Η λειτουργία ενός συστήματος υψηλής ταχύτητας στη διαμόρφωση CS μπορεί να είναι ακόμη πιο αποτελεσματική από τις διαδικασίες HiCAS και CS για την ανάκτηση της χημικής ενέργειας ως βιοαερίου. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ συστημάτων υψηλής και χαμηλής ταχύτητας ενεργοποιημένης ύλης, προτείνουμε ότι μια διαδικασία σταθεροποίησης επαφής υψηλής φόρτισης (HiCS) θα πρέπει να οριστεί ως σύστημα υψηλής φόρτισης σε μια διαμόρφωση σταθεροποίησης επαφής, με ελάχιστο ειδικό ρυθμό φόρτισης ύλης $2 \text{ g bCOD g}^{-1} \text{ VSS d}^{-1}$ και η μέγιστη τιμή SRT να είναι 2 ημερών. Μια τέτοια διαδικασία HiCS μπορεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της υψηλής φόρτισης για τη λάσπη και του χαμηλού SRT (παρόμοια με τη διαδικασία HiCAS) λαμβάνοντας υπόψη παράλληλα την προσρόφηση και την αποθήκευση (παρόμοια με τη διαδικασία CS) (Francis Meerburg et al., 2015).

Αυτά τα πλεονεκτήματα προκύπτουν καθώς στη φάση της σταθεροποίησης γίνεται οξείδωση των προσροφημένων και των προϊόντων αποθήκευσης, ενώ παράλληλα γίνεται ανάπτυξη βιομάζας σε αερόβιες συνθήκες, ενώ στην φάση επαφής έρχεται σε επαφή η είσοδος των λυμάτων με την είσοδο από την φάση σταθεροποίησης, κατά την οποία η βιομάζα βρέθηκε σε συνθήκες πείνας και «άδειασε από άνθρακα», με αποτέλεσμα η μίξη αυτών των δύο διαλυμάτων να οδηγεί σε προσρόφηση του υποστρώματος που προέρχεται από τα λύματα της εισόδου και μάλιστα καθώς προϋπάρχει ο ιστός των EPS η προσρόφηση γίνεται άμεσα (σε χρόνο 15-20 λεπτών έχει ολοκληρωθεί) και αποθήκευση οργανικών προϊόντων.

Οι Huang και Li (2000) διαπίστωσαν ότι ένα σύστημα υψηλής φόρτισης με διαμόρφωση σταθεροποίησης επαφής επιτυγχάνει ταχεία προσρόφηση υποστρωμάτων κατά τη διάρκεια της φάσης επαφής και θεωρήθηκε πως ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση από το HiCAS όσον αφορά την αφαίρεση του υποστρώματος. Ωστόσο, απαιτείται συστηματική σύγκριση για την αξιολόγηση των επιδόσεων του συστήματος HiCS όσον αφορά την ανάκτηση ενέργειας και τις προοπτικές εφαρμογής τους σε ένα ενεργειακά ουδέτερο σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (Francis Meerburg et al., 2015).

Έχει παρατηρηθεί πως η διαδικασία HiCS συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της υψηλής φόρτισης ενεργού ύλης (δηλαδή υψηλές αποδόσεις λάσπης και χαμηλά ποσοστά οξείδωσης υποστρώματος) με τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας σταθεροποίησης επαφής (δηλαδή γρήγορη απορρόφηση και αποθήκευση υποστρωμάτων και επίτευξη αποτελεσματικής απομάκρυνσης οργανικής ύλης σε πολύ σύντομους χρόνους επαφής). Δεδομένης της περαιτέρω βελτιστοποίησης του λόγου διαχωρισμού στερεών / υγρών και SRT η διαδικασία HiCS μπορεί να ξεπεράσει τις άλλες διεργασίες ενεργού ύλης από την άποψη της συνολικής ανάκτησης ενέργειας και μπορεί να θεωρηθεί ως πολλά υποσχόμενη πρωτοβάθμια διαδικασία επεξεργασίας (Francis Meerburg et al., 2015).



Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση των 4 συστημάτων ενεργού ιλύος, όπου OLR (ρυθμός οργανικής φόρτισης), πηγή: Francis Meerburg et al., 2015

Συνοπτικά, να σημειωθεί πως οι αντιδραστήρες υψηλής και χαμηλής φόρτισης λειτουργούν χωρίς προεπεξεργασία της εισροής. Ο αερισμός πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της φάσης επαφής όλων των συστημάτων CAS και HiCAS και κατά τη διάρκεια της φάσης σταθεροποίησης όλων των συστημάτων CS και HiCS. Η ανάδευση πραγματοποιήθηκε και στις δύο φάσεις επαφής και σταθεροποίησης. Στις αερόβιες φάσεις, η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) διατηρείται πάνω από 2 mg L (Francis Meerburg et al., 2015).

2.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι η συλλογή υψηλού κλάσματος COD ως λάσπη χωρίς την οξείδωση του και κατ' επέκταση την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ο αποθηκευμένος άνθρακας της ιλύος για βιομεθανοποίηση (Jeremy Smitshuijzen et al., 2016). Επίσης η καλύτερη σταθερότητα της διαδικασίας νιτροποίησης λόγω αποφυγής διακυμάνσεων στην οργανική σύνθεση, στο pH και σε τοξικές ουσίες (Marthe S. de Graaff et al., 2016) είναι ένας ακόμα λόγος που το HRAS είναι προτιμότερο από τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος.

Επίσης οι χαμηλές τιμές SRT και η υψηλή οργανική φόρτιση και κατά συνέπεια ο υψηλός ρυθμός ανάπτυξης της βιομάζας στο HRAS, απομακρύνει ένα σημαντικό τμήμα αζώτου και φωσφόρου ως μέρος των θρεπτικών συστατικών της βιομάζας και έτσι και στην περίσσεια ιλύ (Tim Constantine et al., 2012).

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η κάλυψη μικρής έκτασης, που προκύπτει λόγω των μικρών όγκων των δεξαμενών καθώς οι μικροί υδραυλικοί χρόνοι και χρόνοι παραμονής δεν απαιτούν μεγάλο χώρο όπως θα συνέβαινε με ένα συμβατικό σύστημα. Με άλλα λόγια, τα συστήματα HRAS χαρακτηρίζονται από μικρούς όγκους αντιδραστήρων και κατά συνέπεια το κόστος της εγκατάστασης μειώνεται. Αυτό το σύστημα αξιοποιεί έτσι τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ενεργού ιλύος για την απομάκρυνση των οργανικών συστατικών από τα λύματα (Jose Jimenez et al., 2013).

Μειονεκτήματα

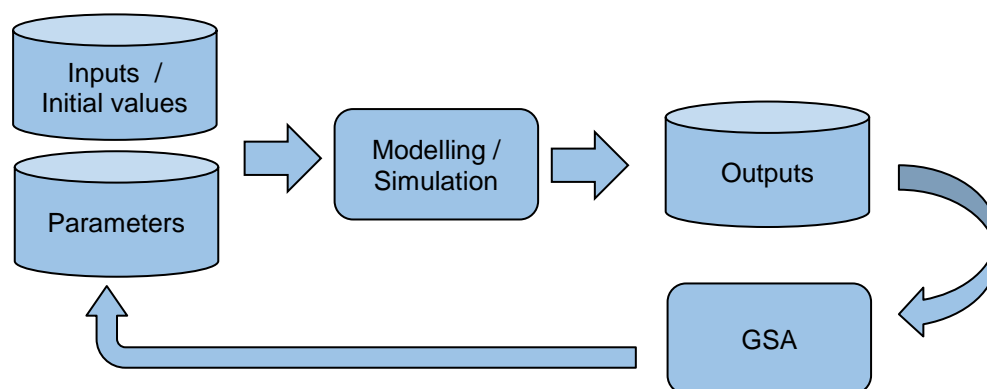
Ένα σύστημα A/B περιλαμβάνει το HRAS στο A-στάδιο και στο B-στάδιο γίνεται απομάκρυνση αζώτου. Πρέπει λοιπόν να ληφθεί υπόψη πως η έξοδος του A-σταδίου δίνει μικρή συγκέντρωση άνθρακα χωρίς όμως να ικανοποιεί τα δευτεροβάθμια πρότυπα εκροής και πολύ πιθανό να μην καλύπτει την απαιτούμενη ποσότητα για απονιτροποίηση, με αποτέλεσμα να χρειάζεται απαραίτητα ένα δεύτερο στάδιο για περαιτέρω επεξεργασία και πιθανόν να απαιτείται η χρήση άλλων τρόπων απομάκρυνσης του αζώτου.

Κεφάλαιο 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Ένα μοντέλο προσομοίωσης ακολουθεί μια ορισμένη διαδικασία δόμησης, η οποία προσδιορίζει ουσιαστικά τα απαραίτητα βήματα που απαιτούνται για να αντιμετωπιστεί ένα πρόβλημα με μαθηματικό τρόπο. Με άλλα λόγια, θα γίνει αρχικά ο ορισμός του προβλήματος και στην συνέχεια θα σχεδιαστεί ένα θεωρητικό μοντέλο που να περιγράφει το πρόβλημα. Στη συνέχεια θα στηθεί η δομή του μοντέλου και θα εισαχθούν οι μαθηματικές εξισώσεις που το προσδιορίζουν. Είναι απαραίτητο να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος ολοκλήρωσης του μοντέλου και στην συνέχεια πρέπει να γραφτεί σε μία γλώσσα προγραμματισμού για να υλοποιηθεί. Αφού γίνει η προσομοίωση του μοντέλου πρέπει να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να προκύψουν οι κρίσιμες παράμετροι του μοντέλου, αλλά και πόσο ευαίσθητα είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου σε διακυμάνσεις αυτών των παραμέτρων. Τέλος αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση ευαισθησίας, πρέπει να γίνει βαθμονόμηση (ρύθμιση) του μοντέλου ώστε να προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πραγματικές συνθήκες και στην συνέχεια να ακολουθήσει η επαλήθευση του μοντέλου (validation) ώστε να ελεγχθεί ότι προσαρμόζεται καλά και σε άλλα πειραματικά δεδομένα με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Συνοπτικά:

Ορισμός του προβλήματος → Θεωρητικό μοντέλο → Δομή του μοντέλου → Εξισώσεις (Μαθηματική έκφραση του μοντέλου) → Μέθοδος ολοκλήρωσης → Κώδικας προγραμματισμού → Ανάλυση ευαισθησίας → Ρύθμιση → Επαλήθευση μοντέλου



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας δόμησης μοντέλου μέχρι το στάδιο της ανάλυσης ευαισθησίας

Η δομή και οι εξισώσεις του μοντέλου παρουσιάζονται με την μορφή μήτρας (πίνακα) ο οποίος αποτελείται στον οριζόντιο άξονα από τις μεταβλητές κατάστασης (state variables) και στον κάθετο άξονα από τις διεργασίες. Συγκεκριμένα, αποτελεί έναν στοιχειομετρικός πίνακας (μήτρα) (v_{ij}) και εμπεριέχει και τις σταθερές ρυθμού διεργασίας (p_j). Κάθε διαδικασία στο στοιχειομετρικό πίνακα ορίζεται από την ειδική στοιχειομετρία της αντίδρασης που εμπλέκεται στη βιοχημική λειτουργία. Αναλυτικότερα, τα στοιχεία (μεταβλητές κατάστασης) που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο μοντέλο και οι διεργασίες μετασχηματισμού καθορίζονται από τους δείκτες i και j αντίστοιχα. Οι στοιχειομετρικοί συντελεστές παρουσιάζονται με τη μορφή μίας μήτρας που ορίζεται από v_{ij} . Οι σταθερές ρυθμού διεργασίας σχηματίζουν ένα διάνυσμα p_j . Η συγκεκριμένη μήτρα συχνά αναφέρεται ως μήτρα Peterson (Peterson, 1965) (Thomas Nogaj, 2015).

Ο στοιχειομετρικός πίνακας αναφέρεται στο ισοζύγιο μάζας, αν παρατηρηθεί ως προς την κάθετη κατεύθυνση. Κατά συνέπεια, μπορεί να προκύψει για κάθε στήλη του πίνακα (ή αλλιώς συνιστώσα i δηλαδή μεταβλητή κατάσταση) ισοζύγιο μάζας το οποίο είναι δυνατόν να

επηρεάζεται είτε από μία είτε από όλες τις διαδικασίες j . Ο ρυθμός παραγωγής κάθε συνιστώσας (μεταβλητή κατάστασης) i , ορίζεται ως r_i και υπολογίζεται από το:

$$r_i = \sum (v_{ji} * \rho_j) \text{ για όλες τις διαδικασίες } j.$$

Πίνακας 1: Κινητικές και στοιχειομετρικές διεργασίες για αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών, πηγή: Thomas Nogaj, 2015.

Στοιχεία →	i	1 X_{OHO}	2 S_s	3 S_o	Ρυθμός διεργασίας ρ_j [ML ⁻³ T ⁻¹]
j Διεργασία ↓					
1 Ανάπτυξη	1		$-\frac{1}{Y_H}$	$-\frac{-1-Y_H}{Y_H}$	$\frac{\mu S_s}{K_s + S_s} X_{OHO}$
2 Φθορά	-1			-1	bX_{OHO}
Παρατηρούμενοι ρυθμοί μετατροπής ML ⁻³ T ⁻¹	$r_j = \sum_j n_j = \sum_j v_{ij} \rho_j$				Κινητικοί Παράμετροι:
Στοιχειομετρικοί παράμετροι: Συντελεστής μετατροπής βιομάζας Y_H	Βιομάζα [M(COD)L ⁻³]	Υπόστρωμα [M(COD)L ⁻³]	Οξυγόνο (αρνητικό COD) [M(-COD)L ⁻³]		Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης: $\hat{\mu}$ Σταθερά ημι-ταχύτητας: K_s Ειδικός ρυθμός φθοράς: b

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ HRAS

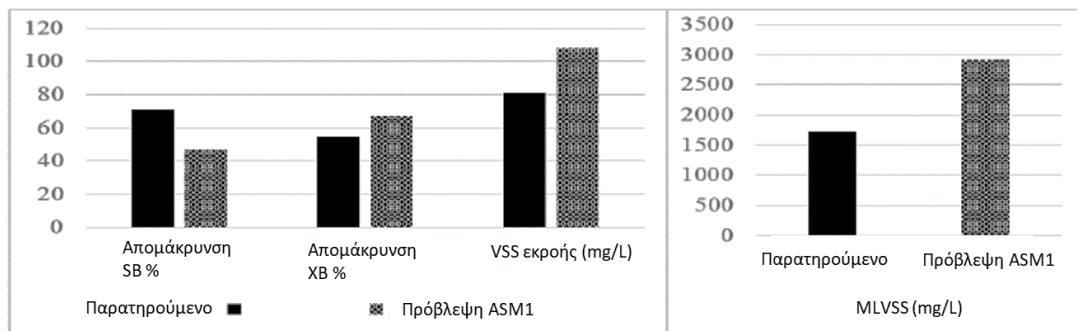
Το μοντέλο ASM1 προσομοιώνει την απομάκρυνση της οργανικής ύλης και του αζώτου. Η απομάκρυνση του άνθρακα πραγματοποιείται μέσω της υδρόλυσης και στη συνέχεια της βιολογικής οξείδωσης της οργανικής ύλης και της αφομοίωσης μέσω βιοσύνθεσης. Η απομάκρυνση του αζώτου γίνεται μέσω βιολογικής νιτροποίησης και απονιτροποίησης, καθώς και αφομοίωσης. Τα μοντέλα ASM2 (2, 2d) είναι μια επέκταση του ASM1 που περιλαμβάνει απομάκρυνση βιολογικών θρεπτικών ουσιών (αζώτου και φωσφόρου). Το ASM3 αναπτύχθηκε ως πιθανή αντικατάσταση του ASM1 με σημαντική διαφορά τη σημασία των πολυμερών αποθήκευσης στην ετεροτροφική μετατροπή των οργανικών σε συστήματα ενεργού ιλύος (Thomas Nogaj, 2015).

Διαφοροποιήσεις με το μοντέλο ASM1:

Τα μοντέλα ASM1 και ASM3 αναπτύχθηκαν έχοντας χαρακτηριστικά τυπικών συνθηκών λειτουργίας, δηλαδή χρόνους παραμονής στερεών μεγαλύτερους των 3 ημερών, με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται υπόψη οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία του συστήματος με μικρό χρόνο παραμονής στερεών (μικρότερος των 2 ημερών). Τέτοιες διεργασίες είναι η βιοκροκίδωση / προσρόφηση του σωματιδιακού και κολλοειδούς (αργά βιοδιασπάσιμου) υποστρώματος, οι οποίες σε μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών είναι περιορισμένες καθώς το ενδιαφέρον στρέφεται στην οξείδωση. Αναλυτικότερα, οι διεργασίες που περιγράφουν τα μοντέλα ASM1 και ASM3 είναι η απομάκρυνση του αργού βιοδιασπάσιμου υποστρώματος (κυρίως σωματιδιακό και κολλοειδές) με την άμεση ενσωμάτωση/παγίδευση και υδρόλυση του σωματιδιακού και κολλοειδούς υποστρώματος που

ακολουθείται από οξείδωση διαλυτού βιοδιασπάσιμου υποστρώματος. Όπως φαίνεται, δεν λαμβάνεται πουθενά υπόψη η διεργασία της βιοκροκίδωσης στην απομάκρυνση του σωματιδιακού και κολλοειδούς υποστρώματος (Thomas Nogaj, 2015).

Καθώς το ASM1 δεν περιγράφει όλες τις διεργασίες που συμβαίνουν στο σύστημα HRAS, η προσομοίωση του HRAS με αυτό το μοντέλο δεν έχει νόημα καθώς τα αποτελέσματα που δίνει το ASM1 με τα χαρακτηριστικά του HRAS (δηλαδή μικρούς υδραυλικούς χρόνους και χρόνους παραμονής στερεών) δεν ανταποκρίνονται με τα μετρημένα μεγέθη από τα πειραματικά συστήματα. Συγκεκριμένα, το μοντέλο υποεκτιμά την απόδοση του HRAS στην απομάκρυνση του Ss ενώ υπερεκτιμά την απόδοση του XB, των VSS εκροής και των MLVSS (Thomas Nogaj, 2015).



Εικόνα 6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ πειραματικών δεδομένων και μοντέλου ASM1, πηγή: Thomas Nogaj, 2015.

Έχοντας λάβει υπόψη τα παραπάνω ο Thomas Nogaj (2015), σχεδίασε βασιζόμενο στο μοντέλο ASM1 ένα καινούριο μοντέλο που να περιγράφει το σύστημα HRAS. Οι παραδοχές και οι νέες διεργασίες που εντάχθηκαν για την καλύτερη περιγραφή του μοντέλου συστήματος ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης δίνονται παρακάτω.

Αρχικά πρέπει να τονιστεί ότι το διαλυτό βιοδιασπάσιμο COD στο ASM1 που είχε δηλωθεί ως Ss, στο μοντέλο HRAS διαχωρίζεται σε δύο κλάσματα: σε διαλυτό γρήγορα βιοδιασπάσιμο COD (S_{BF}) και σε διαλυτό αργά βιοδιασπάσιμο COD (S_{BS}). Ο επιμέρους διαχωρισμός των κλασμάτων προέκυψε καθώς στην έξοδο από το σύστημα υπήρχε διαλυτό βιοδιασπάσιμο COD το οποίο δεν είχε προλάβει να διασπαστεί στο στάδιο-A (HRAS) αλλά γινόταν η διάσπαση του στο στάδιο-B. Κατά συνέπεια ήθελε περισσότερο χρόνο για να διασπαστεί, οπότε έγινε η θεώρηση ότι το μέρος του βιοδιασπάσιμου διαλυτού COD που είναι βιοδιασπάσιμο τόσο στο στάδιο-A όσο και στο στάδιο-B θα είναι το διαλυτό γρήγορα βιοδιασπάσιμο (S_{BF}) και το υπόλοιπο μέρος που είναι βιοδιασπάσιμο μόνο στο B-στάδιο (καθώς διασπάται σε μεγαλύτερο χρόνο από του σταδίου-A) θα είναι το διαλυτό αργά βιοδιασπάσιμο (S_{BS}). Με άλλα λόγια το διαλυτό αργά βιοδιασπάσιμο (S_{BS}) προκύπτει από την διαφορά Ss με S_{BF} .

Ο διαχωρισμός του διαλυτού βιοδιασπάσιμου COD σε δύο κλάσματα οδήγησε στην ανάπτυξη δύο προσεγγίσεων για τον τρόπο ανάπτυξης της βιομάζας στο σύστημα HRAS. Αναλυτικότερα:

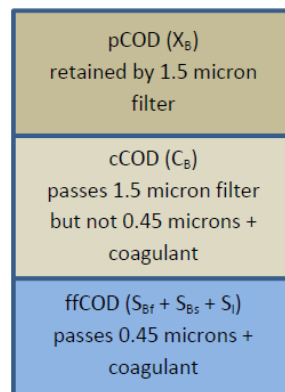
Στην πρώτη προσέγγιση με το όνομα **Διοξικό Μοντέλο (Diauxic Model)**, γίνεται πρώτα κατανάλωση του διαλυτού γρήγορα βιοδιασπάσιμου COD (S_{BF}), και όταν ολοκληρωθεί η διάσπαση του, ξεκινάει η κατανάλωση του διαλυτού αργά βιοδιασπάσιμου COD (S_{BS}). Η προσέγγιση πήρε το όνομα της από την διοξική ανάπτυξη (diauxic growth), κατά την οποία μία τροφή βιοδιασπάται αμέσως από βασικά ένζυμα, και όταν εξαντληθεί γίνεται ανάπτυξη νέων ενζύμων με μεταβολικές διεργασίες για να βιοδιασπάσουν την επόμενη τροφή.

Στην δεύτερη προσέγγιση με το όνομα **Μοντέλο Διπλού Υποστρώματος (Dual Substrate Model)**, γίνεται ταυτόχρονη κατανάλωση και των δύο διαλυτών βιοδιασπάσιμων κλασμάτων

(S_{Bf}) και (S_{Bs}), με την διαφορά ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της βιομάζας από το διαλυτό γρήγορα βιοδιασπάσιμο COD (S_{Bf}) είναι υψηλότερος από τον ρυθμό ανάπτυξης της βιομάζας από το διαλυτό αργά βιοδιασπάσιμο COD (S_{Bs}).

3.2.1 Προσρόφηση του κολλοειδούς COD

Άλλη απαραίτητη κλασματοποίηση που έγινε ήταν ο διαχωρισμός του σωματιδιακού COD σε σωματιδιακό (pCOD ή X_B) και κολλοειδές (cCOD ή C_B). Το διαλυτό κλάσμα του COD (ffCOD) αποτελείται από το άθροισμα του S_{Bf} με το S_{Bs} και το S_I (όπου S_I ή S_U είναι το μη-βιοδιασπάσιμο διαλυτό). Το κολλοειδές οργανικό κλάσμα κατηγοριοποιείται σε βιοδιασπάσιμο (C_B) και μη βιοδιασπάσιμο (C_U). Αντίστοιχα, το σωματιδιακό οργανικό κλάσμα διαχωρίζεται σε βιοδιασπάσιμο (X_B) και μη βιοδιασπάσιμο (X_U). Με την βιοκροκίδωση το C_B μετατρέπεται σε X_B , το οποίο κατόπιν θα υδρολυθεί σε S_{Bs} . Ενώ το C_U συσσωματώνεται με το σωματιδιακό X_U και ως μέρος της περίσσειας λάσπης φεύγει από το HRAS. Η κλασματοποίηση του COD έγινε με διήθηση. Το pCOD αποτελείται από οργανικά αιωρούμενα στερεά (ssCOD) που διατηρούνται με φίλτρο 1,5 micron. Το κολλοειδές COD (cCOD) αποτελείται από το κλάσμα του διαλυτού COD (sCOD), το οποίο διέρχεται από το φίλτρο 1,5 micron αλλά συγκρατείται από το φίλτρο 0,45 μικρών συν πηκτικό. Το διαλυμένο COD χωρίς τα κολλοειδή είναι το πραγματικά διαλυτό οργανικό υλικό στα λύματα και αυτό ποσοτικοποιήθηκε με την πήξη / κροκίδωση ακολουθούμενη από διήθηση (δηλαδή ffCOD) (Jimenez et al., 2005).



Εικόνα 7: Διαχωρισμός επιμέρους κλασμάτων COD για το HRAS του Thomas Nogaj, 2015.

3.2.2 Εξωκυτταρικά πολυμερή προϊόντα (EPS)

Στο μοντέλο αυτό πρέπει η επίδραση των εξωκυτταρικών πολυμερών προϊόντων EPS παίζει σημαντικό ρόλο καθώς επηρεάζει την διεργασία της βιοκροκίδωσης για την απομάκρυνση του σωματιδιακού και του κολλοειδούς υποστρώματος. Στα συστήματα με μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών και υδραυλικούς αλλά και με χαμηλή φόρτιση, πολλές διεργασίες όπως η παγίδευση δεν λαμβάνονται υπόψη καθώς θεωρείτο ότι συνέβαιναν στιγμιαία. Στην περίπτωση των συστημάτων ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης αυτή η παραδοχή δεν είναι σωστή, καθώς ο μικρός χρόνος του συστήματος καθιστά την περιγραφή αυτών των διεργασιών απαραίτητη. Για αυτό το λόγο το μοντέλο εντάσσει την παραγωγή EPS ως μέρος της αερόβιας ανάπτυξης στο S_{Bf} και S_{Bs} . Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο συντελεστής αναλογικότητας $K_{EPS,PC}$ για την ποσοτικοποίηση το μέρους των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται στο σχηματισμό του EPS. Η ποσότητα των ηλεκτρονίων που στάλθηκε στο σχηματισμό EPS, πρέπει να αφαιρεθεί από τον ετεροτροφικό συντελεστή μετατροπής βιομάζας (Y_{OHO}), δηλαδή $Y_{OHO} \cdot (1 - K_{EPS,PC})$, καθώς άνηκε στην συνολική ποσότητα ηλεκτρονίων που θα πήγαινε για σύνθεση νέου κυτταρικού υλικού. Με την ανακατεύθυνση όμως μέρους των ηλεκτρονίων για σχηματισμό EPS ο συντελεστής που αντιστοιχεί στη σύνθεση βιομάζας μειώνεται. Ο υπολογισμός του $K_{EPS,PC}$

προέκυψε από τον παρακάτω υπολογισμό, στον οποίο η τιμή $k_{EPS,MAX}$ που περιγράφει την μέγιστη παραγωγή EPS, εκτιμήθηκε με τα σύνολα δεδομένων που παρείχε ο Jimenez et al. (2000), εφαρμόζοντας σε αυτά μια ελάχιστη τετραγωνική λογαριθμική προσαρμογή η οποία έδωσε αποτέλεσμα της τιμής $k_{EPS,MAX}$ ίσο με 0,25 (gCODEPS / gVSS).

Για τον υπολογισμό του στοιχειομετρικού συντελεστή $k_{EPS,SC}$ με μονάδες [gCODEPS*gCOD_{XOHO}⁻¹], χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση:

$$k_{EPS,SC} = \left(\frac{k_{EPS,MAX}}{i_{CB}} \right) \times \left(\frac{S_{O_2}}{(K_{O,EPS} + S_{O_2})} \right) \quad [1]$$

Όπου ο όρος i_{CB} είναι ένας στοιχειομετρικός συντελεστής μετατροπής που μετατρέπει τα $k_{EPS,MAX}$ από μονάδες gCODEPS / gVSS σε gCODEPS / gCODVSS και είναι ίσος με 1,48.

Ο όρος $K_{O,EPS}$ (σταθερά ημι-κορεσμού για παραγωγή EPS σχετικά με το διαθέσιμο οξυγόνο) εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης των δεδομένων παραγωγής EPS έναντι δεδομένων συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (DO) που παρείχε ο Jimenez et al. (2000) και είναι ίσος με 1,5 gr_{S_{O₂}/m³.}

Για τον υπολογισμό του συντελεστή αναλογικότητας $k_{EPS,PC}$ με μονάδες [gCODEPS*gCOD_{BSf}⁻¹], χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση:

$$k_{EPS,PC} = (k_{EPS,SC} * Y_{OHO,AER}) * \frac{1 - k_{STO,PC}}{1 + (k_{EPS,SC} * Y_{OHO,AER})} \quad [2]$$

Η τιμή $k_{EPS,SC}$ ορίζεται ως στοιχειομετρικός συντελεστής (stoichiometric coefficient, SC) κανονικοποιημένος στη συγκέντρωση βιομάζας (gCODEPS / gCOD_{XOHO}). Εφόσον το EPS παράγεται συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης και η υδρόλυση EPS εξαρτάται από την ποσότητα EPS που είναι διαθέσιμη, το EPS αυξάνεται όταν το SRT είναι μικρό. Όμως, καθώς αυξάνεται το SRT, επιτυγχάνεται σημείο όπου ο ρυθμός υδρόλυσης του EPS υπερβαίνει τον ρυθμό παραγωγής EPS, και πέρα από το σημείο αυτό το EPS μειώνεται με την αύξηση του SRT. Για τα τρέχοντα μοντέλα αυτό συνέβη σε ένα SRT μεγαλύτερο των 2 ημερών.

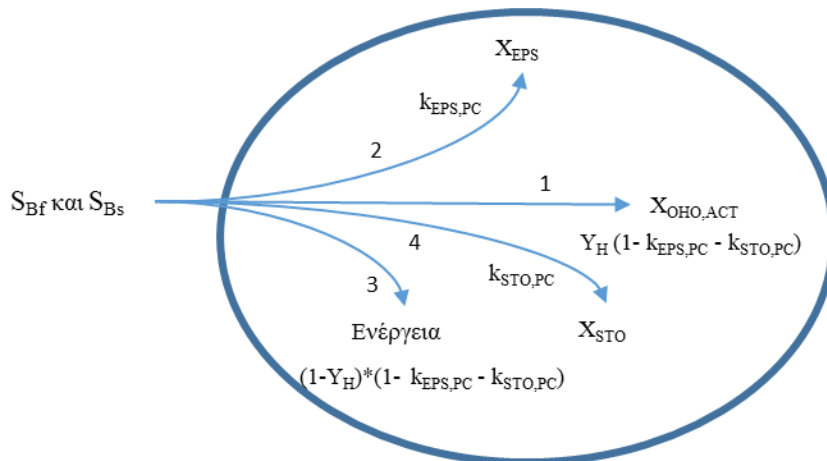
Όπως αναφέρθηκε, ο σχηματισμός EPS από την κατανάλωση του SBs δεν συμβαίνει μέχρι να αρχίσει να εξαντλείται το SBf. Κατά την κατανάλωση του SBs για τον σχηματισμό EPS, δεν υπάρχει ανακατεύθυνση ηλεκτρονίων για τον σχηματισμό προϊόντων αποθήκευσης όπως συμβαίνει με το SBf. Επιπλέον το SBs γίνεται διαθέσιμο μέσω της υδρόλυσης του XB (Carucci et al., 2001).

3.2.3 Εσωτερικά πολυμερή προϊόντα αποθήκευσης (STO)

Επειδή τα περισσότερα WWTP λειτουργούν σε υψηλά SRT (δηλαδή σε χαμηλούς ρυθμούς ανάπτυξης σε σχέση με το HRAS), υποτίθεται ότι ο μέγιστος ρυθμός πρόσληψης υποστρώματος είναι υψηλότερος από την ποσότητα που απαιτείται για την ανάπτυξη. Συνεπώς, η μέγιστη ροή μέσα στο κύτταρο (συγκέντρωση ηλεκτρονίων υποστρώματος) υπερβαίνει την ποσότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση βιομάζας, με αποτέλεσμα ένα τμήμα των εισερχομένων ηλεκτρονίων / άνθρακα να εκτραπεί προς σχηματισμό πολυμερών αποθήκευσης (Sin et al., 2005).

Για την ποσοτικοποίηση της παραγωγής εσωτερικών πολυμερών προϊόντων αποθήκευσης (STO), χρησιμοποιείται ο συντελεστής αναλογικότητας $k_{STO,PC}$ για την ποσοτικοποίηση το

μέρους των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται στο σχηματισμό του STO. Η ποσότητα των ηλεκτρονίων που στάλθηκε στο σχηματισμό STO, πρέπει να αφαιρεθεί από τον ετεροτροφικό συντελεστή μετατροπής βιομάζας (Y_{OHO}), δηλαδή $Y_{OHO} * (1 - k_{EPS,PC} - k_{STO,PC})$, καθώς άνηκε στην συνολική ποσότητα ηλεκτρονίων που θα πήγαινε για σύνθεση νέου κυτταρικού υλικού. Με την ανακατεύθυνση όμως μέρους των ηλεκτρονίων για σχηματισμό STO, λαμβάνοντας υπόψη και την μείωση που υπέστη λόγω σχηματισμού EPS, ο συντελεστής Y_{OHO} μειώνεται ακόμα περισσότερο (Carucci et al., 2001). Τα προϊόντα αποθήκευσης αρχίζουν να βιοδιασπώνται στο μοντέλο όταν εξαντληθούν τόσο τα SBf όσο και τα SBs. Στη συνέχεια το X_{STO} υδρολύεται κατευθείαν σε S_{Bs} και χρησιμοποιείται για αερόβια ανάπτυξη.



Εικόνα 8: Σχηματική απεικόνιση της ροής ηλεκτρονίων του HRAS για το διαλυτό βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα και για τις δύο προσεγγίσεις του μοντέλου (Thomas Nogaj, 2015)

Έχει παρατηρηθεί ότι η χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου δηλαδή $<0,9$ mg/L ευνοούν την μετατροπή του SBf σε προϊόντα αποθήκευσης. Η χρήση οξικού οξέος (acetate) ως υπόστρωμα (εναλλακτικά του COD) έδειξε ότι ο σχηματισμός προϊόντων αποθήκευσης εξαρτιόταν αυστηρά από το διαλυμένο οξυγόνο. Σε χαμηλό DO, η ροή των ηλεκτρονίων χρησιμοποιήθηκε για την πρόσληψη οξικού οξέος και την παραγωγή προϊόντων αποθήκευσης. Οι υψηλές συγκεντρώσεις DO οδήγησαν σε υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης με αποτέλεσμα η ροή των ηλεκτρονίων να κατευθύνεται κυρίως στην παραγωγή βιομάζας με περίπου 20% του υποστρώματος να είναι οξειδωμένο, ανεξάρτητα από τη συγκέντρωση DO. Για τον λόγο αυτό, εντάχθηκε η ακόλουθη έκφραση στα μοντέλα Diauxic και Dual Substrate ώστε να ληφθεί υπόψη η εξάρτηση του STO από τη συγκέντρωση του DO.

$$f_{STO} = (f_{shunt,max}) * \left(\frac{S_{O_2}}{(K_{O,STO} + S_{O_2})} \right) \quad [3]$$

Όπου το f_{STO} αντιπροσωπεύει το κλάσμα των προϊόντων αποθήκευσης στην ενεργή βιομάζα, το $f_{shunt,max}$ αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ροή των ηλεκτρονίων ως συνάρτηση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου και $K_{O,STO}$ είναι ο συντελεστής ημι-κορεσμού για το S_{O_2} .

Επίσης να αναφερθεί πως για τον υπολογισμό του συντελεστή αναλογικότητας $k_{STO,PC}$ με μονάδες $[gCOD_{STO} * gCOD_{SBf}^{-1}]$, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση:

$$k_{STO,PC} = \max(0.01; Y_{PC,O2} * (1 - (\frac{f_{STO}}{f_{STO,max}}))) \quad [4]$$

Όπου ο συντελεστής μετατροπής STO προσαρμοσμένος σύμφωνα με την συγκέντρωση του DO με μονάδες [gX_{OH0}*gS_B⁻¹], είναι:

$$Y_{PC,O2} = Y_{STO} * \left(\frac{K_{O,STO}}{K_{O,STO} + S_{O2}} \right) \quad [5]$$

Και ο συντελεστής που περιγράφει την μέγιστη ποσότητα STO την οποία μπορεί να αποθηκεύσει η βιομάζα (κορεσμός):

$$f_{STO,max} = (-0.783 * (\mu/24)) + 0.39 \quad [6]$$

Όπου η μεταβλητή μ με μονάδες [d⁻¹] αντιστοιχεί στον πραγματικό ρυθμό ανάπτυξης, ο οποίος είναι ίσος με:

$$\mu = \mu_{OH0,T} * \left(\frac{S_{Bf}}{K_{Bf} + S_{Bf}} \right) * \left(\frac{S_{O2}}{K_{O,OH0} + S_{O2}} \right) * \left(\frac{S_{NHx}}{K_{NHx,nut} + S_{NHx}} \right) \quad [7]$$

και περιλαμβάνει κινητικές Monod για το οξυγόνο, την αμμωνία και το S_{Bf}.

Όσον αφορά τα παραπάνω, παρατηρήθηκε πως μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρονίων κατευθύνονται για παραγωγή εσωτερικών προϊόντων αποθήκευσης (ποσοστό f_{STO}) από ότι για παραγωγή EPS (ποσοστό f_{EPS}), ενώ το τμήμα των ηλεκτρονίων που μετατοπίστηκαν στη σύνθεση βιομάζας (f_s) είναι σταθερό. Επίσης σε συστήματα HRAS (υψηλός λόγος F:M και χαμηλό SRT, ανεξάρτητα του DO) το άγνωστο COD που χάνεται στο ισοζύγιο μάζας είναι πιθανόν να αντιστοιχεί στο σχηματισμό προϊόντων αποθήκευσης. Μπορεί να υπάρχει μεταβολή των συντελεστών κατανομής λόγω συγκεκριμένων λειτουργικών παραμέτρων και συνθηκών στο σύστημα, όπως λόγος F:M, SRT, θερμοκρασία, DO. Ο μέσος όρος του μέγιστου στοιχειομετρικού συντελεστή μετατροπής της ετεροτροφικής βιομάζας (Y_{OH0,Max}=f_s/(1-f_{EPS}-f_{STO})), που ισχύει για το σύστημα (SBf και SBs) είχε τιμή 0.47 gCOD/gCOD, ο οποίος λαμβάνοντας υπόψη τον αναθεωρημένο λόγο COD/VSS προκύπτει ένας φαινόμενος συντελεστής Y_{obs} ίσος με 0.32 gVSS/gCOD_{SB}, που προσεγγίζει ικανοποιητικά την τιμή που παρατηρήθηκε ίση με 0.40 gVSS/gCOD_{SB}.

Ο προσδιορισμός των στοιχειομετρικών συντελεστών f_{EPS} (k_{EPS,PC}) και f_{STO} (k_{STO,PC}) έγινε με χρήση συνδυαστικής στοιχειομετρίας για SBf και SBs, το αποτέλεσμα των οποίων φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, οι τιμές των οποίων προέκυψαν για πολύ χαμηλό DO (<0,2 mg / L) και χαμηλό SRT (<2 ημέρες). Όπου η λειτουργία σε χαμηλό DO και SRT υποδηλώνει αυξημένη παραγωγή προϊόντων αποθήκευσης και μείωση της παραγωγής EPS.

Πίνακας 2: Μέσος όρος συγκεντρωτικών ποσοστών μετατροπής COD βασισμένα σε συνδυαστική στοιχειομετρία των SBf και SBs, πηγή: Thomas Nogaj et al., 2015.

Υπόστρωμα	f _s (gCOD/gCOD)	f _{EPS} (gCOD/gCOD)	f _{STO} (gCOD/gCOD)
SB _{sys}	0.27	0.085	0.27

Σύμφωνα με τον Thomas Nogaj, 2015, το ισοζύγιο μάζας COD που υπολογίστηκε με χρήση πειραματικών δεδομένων δεν έκλεινε (δηλαδή ισοζύγιο μάζας <100%), το οποίο θεωρείται ότι οφείλεται σε αναλυτικό σφάλμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή της τιμής του COD στα στερεά που απομακρύνονται από το σύστημα από 1,48 gCOD/gVSS (που χρησιμοποιείται στα συμβατικά συστήματα) σε 1,86 gCOD/gVSS, ώστε να κλείνει το ισοζύγιο μάζας.

Αναλυτικότερα στο μοντέλο:

Για το SBs, βρέθηκαν τρεις (3) οδοί σύμφωνα με τις οποίες θα κατευθυνθούν τα ηλεκτρόνια του COD που εισέρχονται στο κύτταρο. Ένα τμήμα των ηλεκτρονίων χρησιμοποιείται από το κύτταρο για τη σύνθεση βιομάζας (οδός No. 1), ενώ η οδός No 2 είναι για την παραγωγή του EPS και η οδός No 3 είναι ηλεκτρόνια που αποστέλλονται στον δέκτη ηλεκτρονίων για την παραγωγή ενέργειας. Η κατανομή των ηλεκτρονίων σε κάθε μονοπάτι ορίζεται από έναν συντελεστή αναλογικότητας (proportionality coefficient ή PC). Όπως προαναφέρθηκε, $k_{EPS,PC}$ είναι ο συντελεστής αναλογικότητας για την παραγωγή EPS (MassEPS / MassSs) και Y_{OHO} είναι ο πραγματικός συντελεστή μετατροπής βιομάζας εάν όλο το υπόστρωμα χρησιμοποιηθεί για σύνθεση νέου κυτταρικού υλικού. Δεδομένου ότι αυτό δεν συμβαίνει στο μοντέλο μας, το Y_{OHO} μειώνεται από τον παράγοντα $(1 - k_{EPS,PC})$.

Για το SBf, το μοντέλο HRAS έχει επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει μια 4η διαδρομή από την οποία μπορούν να κατευθυνθούν τα ηλεκτρόνια του COD που εισέρχονται στο κύτταρο. Ένα τμήμα των ηλεκτρονίων θα χρησιμοποιηθεί από το κύτταρο για τον σχηματισμό STO (οδός No. 4). Ο συντελεστής αναλογικότητας $k_{STO,PC}$ έχει προστεθεί για την παραγωγή πολυμερών αποθήκευσης (MSTO / MS). Το Y_{OHO} μειώνεται τελικά από τον παράγοντα $(1 - k_{EPS,PC} - k_{STO,PC})$. Σύμφωνα με τα παραπάνω τροποποιείται η στοιχειομετρία για την αερόβια ανάπτυξη των ετερότροφων του μοντέλου ASM1 ώστε να ληφθεί υπόψη το τμήμα των ηλεκτρονίων που μετατοπίζονται στο EPS και στο STO.

Στον πίνακα του μοντέλου εντάχθηκαν οι μεταβλητές X_{EPS} (g CODEPS/L) και X_{STO} (g COD_{STO}/L) για να περιγράψουν την συγκέντρωση των EPS και των STO αντίστοιχα.

Ο πίνακας του Thomas Nogaj, 2015 που περιγράφει το μοντέλο HRAS δίνεται στο Παράρτημα.

Περαιτέρω ανάλυση των διεργασιών του μοντέλου:

Η διαδικασία την υδρόλυσης (ρυθμός r14) περιγράφει την υδρόλυση των EPS σε διαλυτό γρήγορα βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα (S_B). Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η σταθερά $q_{EPS,HYD}$ που αντιστοιχεί στον ρυθμό υδρόλυσης των EPS.

Η διαδικασία της υδρόλυσης παγιδευμένων οργανικών (r9) περιγράφει την υδρόλυση του X_B σε διαλυτό αργά βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα (SBs). Ενώ η υδρόλυση παγιδευμένου οργανικού αζώτου (r10) περιγράφει την υδρόλυση του X_{NB} σε S_{NB} , χρησιμοποιώντας και στις δύο διεργασίες (r9 και r10) ως ρυθμό υδρόλυσης του X_B την σταθερά $q_{XB,HYD}$ (σε μονάδες d^{-1}), τον συντελεστή διόρθωσης για υδρόλυση κάτω από ανοξικές συνθήκες (η_{HYD}), με την διαφορά ότι στην διεργασία r10 πολλαπλασιάστηκε ο ρυθμός υδρόλυσης $q_{XB,HYD}$ με τον λόγο (X_{NB}/X_B) ώστε να αναχθεί η υδρόλυση του X_B στην υδρόλυση του X_{NB} .

Για την διαδικασία την κροκίδωσης του κολλοειδούς υποστρώματος C_B και κατά συνέπεια την μετατροπή του σε σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα X_B , χρησιμοποιήθηκε ο ρυθμός r11 ο οποίος έχει ως ρυθμό προσρόφησης την σταθερά q_{ADS} (σε μονάδες d^{-1}) και τον συντελεστή ημι-κορεσμού για περιορισμό της επιφάνειας K_{SL} , ο οποίος δείχνει αν υπάρχουν ή όχι κενές θέσεις για προσκόλληση του κολλοειδούς υποστρώματος στον ιστό της βιομάζας. Στη συνέχεια, οι προσροφημένες οργανικές ουσίες υδρολύονται στο διαλυτό αργό βιοδιασπάσιμο COD (S_B) το οποίο έπειτα οξειδώνεται ή αποθηκεύεται από τη βιομάζα.

$$r_{11} = q_{ADS} * C_B * (X_{OHO,ACT} + X_{ANO}) * (K_{SL} / ((C_B / (X_{OHO,ACT} + X_{ANO})) + K_{SL})) * (X_{EPS} / (K_{EPS} + X_{EPS})) \quad [8]$$

Στις διεργασίες ανάπτυξης ετερότροφων σε ανοξικές συνθήκες (r3 και r4) συμμετέχει ο συντελεστής μείωσης για ανοξική ανάπτυξη του X_{OHO} ($\eta_{GRO,ANOX}$) και η κινητική Monod για τα νιτρικά και νιτρώδη (K_{NOX} , S_{NOX}), ενώ πέρα από τα παραπάνω είναι ίδιοι με τις διεργασίες ανάπτυξης ετερότροφων σε αερόβιες συνθήκες (r1 και r2 αντίστοιχα). Στις κινητικές r2 και r4 που περιγράφουν την ανάπτυξη ετερότροφων με αργό ρυθμό, γίνεται η εισαγωγή του όρου ($K_{Bf} / (K_{Bf} + S_{Bf})$), ο οποίος λειτουργεί ως διακόπτης με στόχο να αρχίσει να λειτουργεί αυτός ο ρυθμός όταν έχει αρχίσει να εξαντλείται το S_{Bf} (άρα βρίσκεται στην περίπτωση του Διοξικού Μοντέλου).

Στην διεργασία ενσωμάτωσης / αποθήκευσης S_{NB} (r13) συμμετέχει η σταθερά ρυθμού για ανάπτυξη στο X_{STO} (q_{STO}), η οποία πολλαπλασιάζεται με τον λόγο (S_{NB} / S_{Bf}) ώστε να αναχθεί η αποθήκευση του S_{Bf} σε αποθήκευση του S_{NB} .

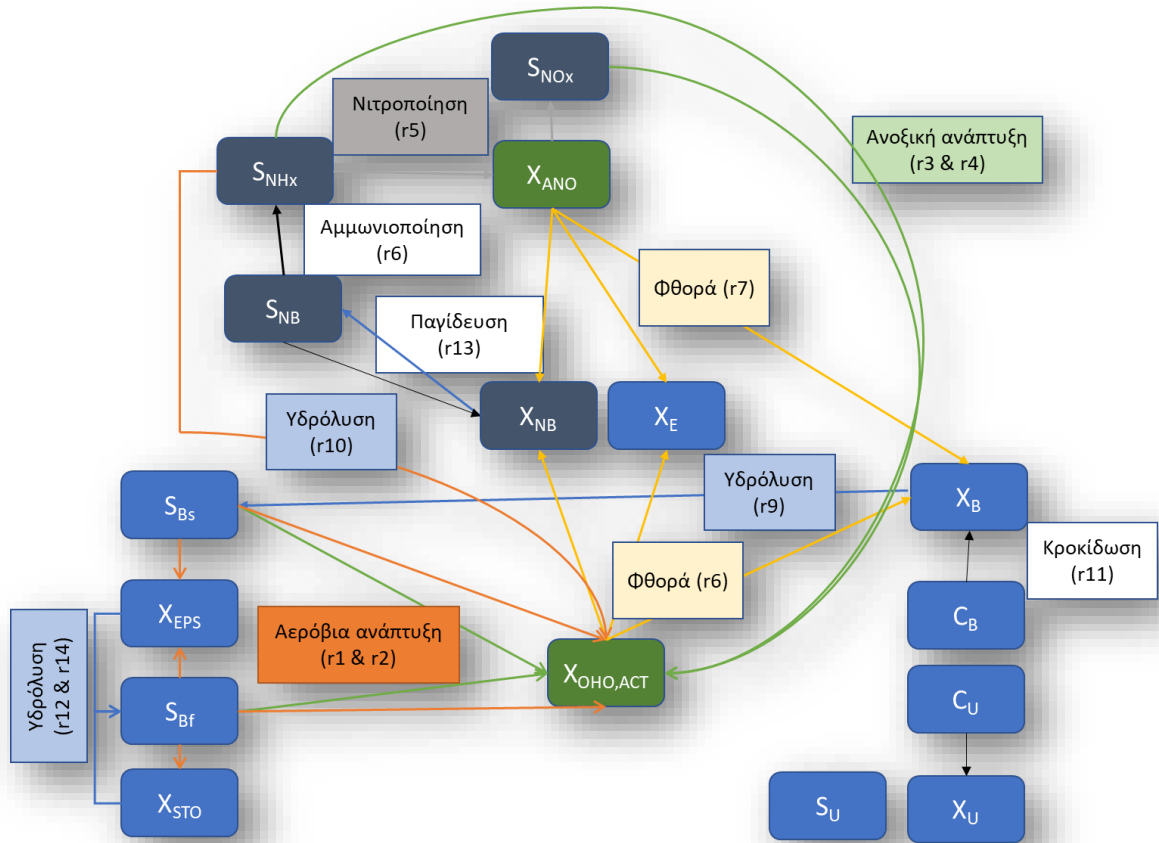
Για τις κινητικές r1 και r2, πρέπει να επισημανθεί πως η ταχύτητα ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας (μ_{OHO}) έχει την ίδια τιμή και στις δύο περιπτώσεις με αποτέλεσμα να διαφέρει ο ρυθμός ανάπτυξης τους με την χρήση της σταθεράς K_{Bf} στην r1 και της K_{Bs} στην r2. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στην r2 (και r4) γίνεται χρήση του διακόπτη ($K_{Bf} / (K_{Bf} + S_{Bf})$), πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο που περιγράφεται είναι το Διοξικό Μοντέλο, και όχι το Μοντέλο Διπλού Υποστρώματος, το οποίο θεωρείται ότι χρησιμοποιήθηκε.

Στο εσωτερικό του πίνακα του μοντέλου, το f_U , αντιστοιχεί στο ποσοστό του σωματιδιακού οργανικού μη βιοδιασπάσιμου X_U που προέρχεται από την φθορά της βιομάζας

Άλλη παρατήρηση όσον αφορά το μοντέλο, είναι η έλλειψη κινητικής για την βιοκροκίδωση του κολλοειδούς αδρανούς κλάσματος (CU), με αποτέλεσμα η συγκέντρωση του CU στην είσοδο και στην έξοδο του σταδίου-A να είναι ίδια.

Για το καλιμπράρισμα των παραμέτρων, ο Thomas Nogaj, 2015 χρησιμοποίησε τα αποτελέσματα από το πιλοτικό που χρησιμοποίησε ο Jimenez, 2002 για την πειραματική προσομοίωση του HRAS (A-σταδίο), ενώ για την επικύρωση του μοντέλου (validation) έκανε χρήση των αποτελεσμάτων ενός πιλοτικού στο Hampton Roads Sanitation District, Virginia (Mark W. Miller et al., 2013).

Για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του μοντέλου, απεικονίζονται οι κινητικές με τα κλάσματα του COD στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 9: Σχηματική περιγραφή των κινητικών του HRAS

3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

ASM1 – HRAS

Οι βασικές διαφορές του μοντέλου HRAS με το ASM1 διατυπώθηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο «Μοντέλο HRAS». Για το λόγο αυτό, θα γίνει μια συνοπτική τους περιγραφή παρακάτω.

Το HRAS έχει ενσωματώσει στο μοντέλο επιπλέον τις διεργασίες της βιοκροκίδωσης/προσρόφησης, της παγίδευσης/εσωτερικής αποθήκευσης S_{NB} , της υδρόλυσης EPS και διεργασίες με διαφορετικούς ρυθμούς αερόβιας και ανοξικής ανάπτυξης ετερότροφων λόγω της κλασματοποίησης του διαλυτού σε αργό και γρήγορο διαλυτό βιοδιασπάσιμο COD. Επιπλέον έγινε η εισαγωγή νέων μεταβλητών στο μοντέλο οι οποίες είναι το S_{BF} , S_{BS} , C_B , X_{EPS} , X_{STO} .

Όσον αφορά τις παραμέτρους λειτουργίας, σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι οι μικροί υδραυλικοί χρόνοι και χρόνοι παραμονής στερεών, που είναι μικρότεροι από 2 ημέρες στο σύστημα HRAS σε αντίθεση με το συμβατικό σύστημα όπου το SRT κυμαίνεται από 3 έως 15 ημέρες. Επίσης η οργανική φόρτιση των λυμάτων στο σύστημα HRAS είναι υψηλή, δηλαδή ρυθμός οργανικής φόρτισης να κυμαίνεται από 2 έως 10 $gbCOD \cdot g^{-1}VSS \cdot d^{-1}$, ενώ στο συμβατικό σύστημα είναι από 0,2 έως 0,6 $gbCOD \cdot g^{-1}VSS \cdot d^{-1}$.

3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Το μοντέλο HRAS είναι ένα πολύπλοκο μοντέλο με πολλές παραμέτρους. Ορισμένες τιμές παραμέτρων πρέπει να εκτιμηθούν πριν το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρακτικές εφαρμογές. Ο σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να απλοποιήσει τη διαδικασία βαθμονόμησης (calibration) του μοντέλου, η οποία πρόκειται να καταστεί δύσκολη τόσο λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου όσο και του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων που περιλαμβάνονται σε αυτό. Θα εφαρμοστεί η ανάλυση συνολικής ευαισθησίας (global sensitivity analysis, GSA), ώστε να εντοπιστεί ποια μεταβλητή εξόδου είναι πιο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις των παραμέτρων αλλά και ποιες παράμετροι έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα του μοντέλου (μεταβλητές κατάστασης). Επειδή είναι αδύνατο να προσομοιωθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των παραμέτρων εισόδου, επιλέγεται η τεχνική Monte-Carlo. Συγκεκριμένα, η ανάλυση ευαισθησίας που προτείνεται εφαρμόζει μια τυχαία διακύμανση στις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου, δημιουργώντας έτσι ένα φάσμα αντίστοιχων τιμών εξόδου. Η γέννηση των τιμών εισόδου πραγματοποιείται με ψευδοτυχαίο τρόπο μέσω μιας επιλεγμένης κατανομής πιθανότητας (εδώ εφαρμόζεται η Gaussian πιθανοτική κατανομή).

Όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί ένα σημαντικό βήμα σε ένα μοντέλο, καθώς δείχνει πόσο ευαίσθητο είναι στις αλλαγές των παραμέτρων, αλλά και ποια παράμετρος είναι πιο σημαντική, δηλαδή επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα του μοντέλου. Η στατιστική αβεβαιότητα που οφείλεται στις παραμέτρους του μοντέλου ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή μεταβλητότητας σύμφωνα με τη μέθοδο των Dimitriadis et al. (2016). Συγκεκριμένα, εκτιμώντας τον συντελεστή μεταβλητότητας των τιμών εξόδου, μπορεί να εντοπιστούν οι παράμετροι εισόδου (στοιχειομετρικές και κινητικές) που προκαλούν αυτή τη διακύμανση, και άρα, που επηρεάζουν περισσότερο τις παραμέτρους εξόδου.

Για την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε μέσω της τεχνικής Monte Carlo δημιουργήθηκε με ένα δείγμα τιμών για κάθε παράμετρο από την κατανομή της κάθε παραμέτρου. Η κατανομή που ορίστηκε για την κάθε παράμετρο, ήταν η Γκαουσιανή με εύρος (φάσμα) τιμών μέχρι το $\pm 50\%$ της μέσης τιμής. Η μέση τιμή των παραμέτρων αντιστοιχεί στις βαθμονομημένες τιμές που χρησιμοποίησε στο μοντέλο του ο Nogaj (2015). Στη συνέχεια, 16 παράμετροι εξόδου εντοπίστηκαν σε όλο το σύστημα και 36 παράμετροι από τις 49, κρίθηκαν σημαντικές και ελήφθησαν υπόψη για την αβεβαιότητα του μοντέλου. Στην ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκαν 10.000 επαναλήψεις του μοντέλου με διαφορετικούς (τυχαίους) συνδυασμούς των παραμέτρων εισόδου και τα αποτελέσματα (παράμετροι εξόδου) αποθηκεύτηκαν για την περαιτέρω στατιστική επεξεργασία τους.

Για κάθε έξοδο του μοντέλου έγινε υπολογισμός της μέσης τιμής (μ), της τυπικής απόκλισης (σ) και του συντελεστή μεταβλητότητας ($c.v. = \sigma / \mu$). Η τιμή του $c.v.$ είναι αυτή που θα καθορίσει ποιο αποτέλεσμα του μοντέλου επηρεάζεται περισσότερο από τις τυχαίες διακυμάνσεις των υπόλοιπων παραμέτρων. Για να προσδιοριστούν ποιες παράμετροι είναι οι πιο σημαντικές, οι 10.000 επαναλήψεις ομαδοποιήθηκαν σύμφωνα με την αύξουσα ταξινόμηση κάθε παραμέτρου. Συγκεκριμένα, για κάθε παράμετρο οι 10.000 τιμές ταξινομήθηκαν σε αύξουσα σειρά, έτσι ώστε οι μέγιστες τιμές να βρίσκονται στο τέλος και έτσι έγινε για τις τιμές κάθε εξόδου. Στη συνέχεια σχηματίστηκαν 25 ομάδες (κάθε ομάδα αποτελείται από 400 τιμές) και υπολογίστηκαν για κάθε ομάδα, κάθε έξοδο και κάθε παράμετρο ο μέσος όρος (μ), η τυπική απόκλιση (σ) και ο συντελεστής μεταβλητότητας ($c.v.$).

Αναλυτικότερα, προκύπτει έτσι ένας πίνακας με 10.000 γραμμές, όπου η πρώτη στήλη είναι η επιλεγμένη παράμετρος σε αύξουσα σειρά, οι επόμενες στήλες είναι οι υπόλοιπες παράμετροι όπως ταξινομήθηκαν ακολουθώντας την ταξινόμηση της 1^{ης} στήλης και η τελευταία στήλη είναι

η ευαίσθητη μεταβλητή εξόδου που επιλέχθηκε, η οποία και αυτή έχει ταξινομηθεί με βάση την ταξινόμηση της 1^{ης} στήλης. Κρατώντας σταθερή μια παράμετρο κάθε φορά και ταξινομώντας την (πρώτη στήλη), επαναλαμβάνεται η μέθοδος Monte Carlo για τις υπόλοιπες παραμέτρους που ακολουθούν την ταξινόμηση της πρώτης, καθώς οι υπόλοιπες έχουν τυχαία ταξινόμηση. Αφού χωριστούν οι ομάδες και υπολογιστούν τα μ , σ και c.v. της ευαίσθητης μεταβλητής για την κάθε ομάδα, τότε από την τελευταία ομάδα (για την οποία η παράμετρος της πρώτης στήλης έχει τις μέγιστες τιμές της) επιλέγεται το c.v. Αυτή η μεθοδολογία θα επαναληφθεί μέχρις ότου να έχουν περάσει από την πρώτη στήλη όλες οι παράμετροι του μοντέλου και να προκύψει έτσι για κάθε παράμετρο ένα c.v. της ευαίσθητης μεταβλητής από την τελευταία ομάδα. Στη συνέχεια, αυτά απεικονίζονται σε διάγραμμα παραμέτρων – c.v. και αυτά με τις μεγαλύτερες τιμές αποτελούν και τις παραμέτρους με την μεγαλύτερη σημαντικότητα για την ευαίσθητη παράμετρο.

Η κατανομή που μπορούν να ακολουθεί η κάθε παράμετρος δεν μας ενδιαφέρει καθώς στόχος δεν είναι η μεταβλητότητα των παραμέτρων αλλά η εξαγωγή ενός κανάβου πολλών τυχαίων τιμών σε κάθε παράμετρο με αποτέλεσμα ένα πυκνό δίκτυο τιμών. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η επιλογή της γκαουσιανής κατανομής για την κάθε παράμετρο έτσι ώστε όταν γίνεται ο επιμερισμός σε διαστήματα μετά την ταξινόμηση, το c.v.= σ/μ του κάθε διαστήματος στην παράμετρο να είναι σταθερό με ίδια τιμή μεταξύ των διαστημάτων.

Χωρίζοντας σε τμήματα υπάρχει μια αμεροληψία όσον αφορά την επιρροή των παραμέτρων, οπότε ίσως ένας διαχωρισμός σε τμήματα με ίση πιθανότητα να είναι προτιμητέα.

Επίσης να σημειωθεί ότι τα δεδομένα εισόδου θεωρούνται ανεξάρτητα.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω προκύπτουν 10.000 τιμές για κάθε μεταβλητή κατάστασης. Ο υπολογισμός του c.v. για κάθε μεταβλητή δίνει κατά πόσο μεταβάλλονται οι τιμές της μεταβλητής, όσο μεταβάλλονται οι τιμές των παραμέτρων. Άρα, η μεταβλητή που έχει το μεγαλύτερο c.v. είναι και αυτή που είναι πιο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις των παραμέτρων (συνολικά).

Στη συνέχεια, έστω πως θέλουμε να εξετάσουμε μια μεταβλητή ξεχωριστά και να εντοπίσουμε ποιες παράμετροι αν τις μεταβάλλουμε θα την επηρεάσουν περισσότερο, τότε γίνονται τα εξής βήματα:

Αρχικά, επιλέγεται η μεταβλητή που θέλουμε να εξετάσουμε και σχηματίζουμε έναν πίνακα όπου οι στήλες αποτελούνται από τις παραμέτρους και στην τελευταία στήλη προστίθεται η μεταβλητή κατάστασης η οποία εξετάζεται, ενώ στις γραμμές αντιστοιχούν οι 10.000 επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν. Αφού σχηματιστεί ο πίνακας, επιλέγεται η πρώτη στήλη που αντιστοιχεί σε μία παράμετρο και γίνεται ταξινόμηση των τιμών της σε αύξουσα σειρά, ενώ παράλληλα μετακινούνται (ταξινομούνται) και οι υπόλοιπες τιμές της κάθε στήλης με βάση τη ταξινόμηση της πρώτης στήλης. Στη συνέχεια, χωρίζονται οι γραμμές σε 25 τμήματα (400 τιμές ανά τμήμα) και υπολογίζεται το c.v., εφόσον προηγουμένως έχει υπολογιστεί ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση, για κάθε τμήμα, στη μεταβλητή κατάσταση. Η ταξινόμηση με αύξουσα σειρά της παραμέτρου και ο υπολογισμός της μεταβλητής κατάστασης επαναλαμβάνεται για όλες τις παραμέτρους και προκύπτει έτσι για κάθε τμήμα μία τιμή c.v. της μεταβλητής κατάστασης που εξετάζεται για κάθε παράμετρο. Στη συνέχεια επιλέγονται τα μεγαλύτερα c.v. του τμήματος 25 και αυτές θεωρούνται οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο την μεταβλητή κατάσταση. Τα μεγαλύτερα c.v. του τμήματος 13 αντιστοιχούν στις παραμέτρους που έχουν την μικρότερη επιρροή στην μεταβλητή κατάσταση.

Κεφάλαιο 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

Σύγκριση μαθηματικού μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα

Με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης γίνεται μια προσπάθεια ρύθμισης των παραμέτρων ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να μπορούν να συγκριθούν με πειραματικά αποτελέσματα που έχουν συλλεχθεί από την παρακολούθηση πιλοτικού συστήματος υψηλής φόρτισης που είναι εγκατεστημένο στο Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας (ΚΕΛΨ).

Στο ΚΕΛ Ψυττάλειας έχουν σχεδιαστεί και τεθεί σε λειτουργία δύο πιλοτικά συστήματα σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο, εντός εμπορευματοκιβωτίου και λειτουργούν συνεχώς από τον Ιούλιο του 2018 έως σήμερα.

Το πρώτο σύστημα ονομάζεται συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης (HiCAS), περιλαμβάνει μία δεξαμενή επαφής (contact tank) όπου εκεί συντελούνται όλες οι βιολογικές διεργασίες και μια δεξαμενή τελικής καθίζησης για τον διαχωρισμό των επεξεργασμένων λυμάτων από το ανάμεικτο υγρό. Στην δεξαμενή επαφής, βιομάζα που επανακυκλοφορείται από τον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης αναμιγνύεται με φρέσκα λύματα υπό αερόβιες συνθήκες. Ο όγκος της δεξαμενής επαφής είναι 15 L και της ΔTK 130 L περίπου.

Το δεύτερο σύστημα ονομάζεται σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής σταθεροποίησης (HiCS) και αποτελεί ουσιαστικά παραλλαγή του πρώτου συστήματος. Τα εισερχόμενα λύματα στο σύστημα HiCS έρχονται σε επαφή με την βιομάζα στην δεξαμενή επαφής (contact tank) όμοια με αυτήν του HiCAS και από εκεί μεταφέρονται στην δεξαμενή καθίζησης. Η διαφοροποίηση από το προηγούμενο σύστημα (HiCAS) είναι ότι η ανακυκλοφορούμενη ιλύς από τον πυθμένα της ΔTK διέρχεται πρώτα από μια δεξαμενή σταθεροποίησης (stabilization tank) όγκου 24 L, υπό αερόβιες συνθήκες ώστε να αυξηθεί η ικανότητα της για απομάκρυνση οργανικού φορτίου στην δεξαμενή επαφής. Ο αερισμός της βιομάζας στη δεξαμενή σταθεροποίησης επιτρέπει την οξείδωση του ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου κλάσματος του COD και ενός μέρους του προσροφημένου σωματιδιακού και κολλοειδούς COD που υδρολύεται, δημιουργώντας έτσι ελεύθερες περιοχές στην επιφάνεια των κροκίδων και κενό χώρο για ενδοκυτταρική αποθήκευση. Οι όγκοι της δεξαμενής επαφής και ΔTK είναι όμοιοι με το σύστημα HiCAS.

Το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία κρίνεται ότι περιγράφει επαρκώς τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στο συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης και με αυτό γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Χαρακτηρισμός πλεονάσματος ιλύος συστήματος υψηλής φόρτισης

ο υπολογισμός των επιμέρους κλασμάτων του οργανικού φορτίου της βιομάζας που λαμβάνονται στο μοντέλο προσομοίωσης έγινε μέσω ενός συνόλου πειραμάτων προσδιορισμού του ρυθμού αποξυγόνωσης (OUR).

Σε κάθε έναν από τους 5 κύκλους λειτουργίας, σε δείγματα του πλεονάσματος ιλύος που απομακρύνεται καθημερινά από το σύστημα, εκτελέστηκαν πειράματα αερόβιας σταθεροποίησης και υπολογίστηκαν οι διάφοροι ρυθμοί κατανάλωσης οξυγόνου (Καρατσώκης, 2019).

Ο στόχος του πειράματος είναι ο προσδιορισμός των κλασμάτων του COD των εισερχόμενων λυμάτων που έχει δεσμευθεί στη βιομάζα είτε με τον μηχανισμό της προσρόφησης είτε με τον

μηχανισμό της ενδοκυτταρικής αποθήκευσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της μέτρησης της ταχύτητας αποξυγόνωσης (oxygen uptake rate (OUR)).

Ο συνολικός όγκος του ανάμεικτου υγρού στον batch αντιδραστήρα είναι 500 mL. Το δείγμα αερίζεται και ανά τακτά χρονικά διαστήματα μετράτε ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου. Κατά την έναρξη του πειράματος ο ρυθμός αποξυγόνωσης προσδιορίζεται ανά 5 λεπτά ενώ στη συνέχεια μετά την ολοκλήρωση της κατανάλωσης των εύκολα βιοδιασπάσιμων οργανικών ενώσεων οι μετρήσεις γίνονται ανά μισή και μία ώρα όσο πλησιάζει η λήξη του πειράματος.

Ο προσδιορισμός της ενδογενούς φάσης ανάπτυξης των ετεροτροφικών βακτηρίων γίνεται σε αντίστοιχο πείραμα 24 ώρες πριν την έναρξη του πειράματος διερεύνησης και υπολογίστηκε περίπου στα 5 mgO₂/grVSS-h.

Η κλασματοποίηση του οργανικού φορτίου που έχει δεσμευθεί στη βιομάζα και υπολογίζετε μέσω των ταχυτήτων αποξυγόνωσης έχει ως εξής:

- **Εύκολα βιοδιασπάσιμο COD (S_{Bf} και S_{Bs}), – μέγιστη τιμή OUR έως και περίπου 20 mgO₂ / gVSS-h.**
- **Κολλοειδές COD (cCOD ή C_B) – 16 έως 9 mgO₂ / gVSS-h.**
- **Σωματιδιακό COD (pCOD ή X_B) – 9 mgO₂ / gVSS-h έως τιμή ενδογενούς αναπνοής.**
- **Ενδοκυτταρικά αποθηκευμένο (fsto) 20 – 16 mgO₂ / gVSS-h**

Η θεώρηση που γίνεται για το ενδοκυτταρικά αποθηκευμένο οργανικό υλικό στη βιομάζα βασίζεται στην παρατήρηση μιας σταθεροποίησης του ρυθμού αποξυγόνωσης σε τιμές που σύμφωνα με την βιβλιογραφία δεν αντιστοιχούν ούτε στο ευκολοδιασπάσιμο κλάσμα του COD αλλά ούτε και στο κολλοειδές. Επίσης το ενδοκυτταρικά αποθηκευμένο οργανικό υλικό με την μορφή των PHAs αναμένεται να καταναλώνεται σε ένα εύρος ταχυτήτων ανάμεσα σε διαλυτό ευκολοδιασπάσιμο και κολλοειδές COD. Σε κάθε περίπτωση όμως η παραπάνω υπόθεση δεν είναι επαρκώς τεκμηριωμένη.

Εξωκυτταρικά πολυμερή EPS

Ο ρόλος των εξωκυτταρικών πολυμερών στον μηχανισμό της προσρόφησης οργανικού υλικού στη βιομάζα έχει παρουσιαστεί σε πλήθος βιβλιογραφικών αναφορών. Τα EPS θεωρούνται ως προϊόντα μεταβολισμού των μικροοργανισμών, αποτελούν δομικό συστατικό των κροκίδων και βρίσκονται δεσμευμένα στο εξωτερικό μέρος του κυττάρου.

Για την αποδέσμευση των EPS από την βιομάζα γίνεται χρήση κατιονικής ρητίνης ιοντοανταλλαγής (Cation Exchange Resin - CER). Η κατιονική ρητίνη εναλλάσσει κατιόντα με την βιομάζα με αποτέλεσμα την μεταφορά των EPS στην υγρή φάση με ελάχιστες επιμολύνσεις από ενδοκυτταρικές ουσίες. Τα EPS δεσμεύονται στη βιομάζα μέσω δεσμών δισθενών ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέγεται γιατί προκαλεί ελάχιστη λύση των κυττάρων των μικροοργανισμών σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν. Αποτελεί επίσης την πλέον εφαρμοζόμενη πρακτική εξαγωγής των EPS σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Η μέτρηση του ολικού COD στην υγρή φάση που έχει προκύψει από την διαδικασία εξαγωγής που περιγράφηκε παραπάνω, αντιστοιχεί στο COD των EPS που βρίσκονταν δεσμευμένα στη βιομάζα.

Υπολογισμός της ενεργής βιομάζας X_{OHO}

Ο υπολογισμός της ετεροτροφικής βιομάζας που συμμετέχει ενεργά στις βιολογικές διεργασίες (X_{OHO}) υπολογίζεται από την τιμή του ολικού COD του ανάμεικτου υγρού στο τέλος του πειράματος OUR, αφού αφαιρεθεί η τιμή του αδρανούς σωματιδιακού COD της βιομάζας.

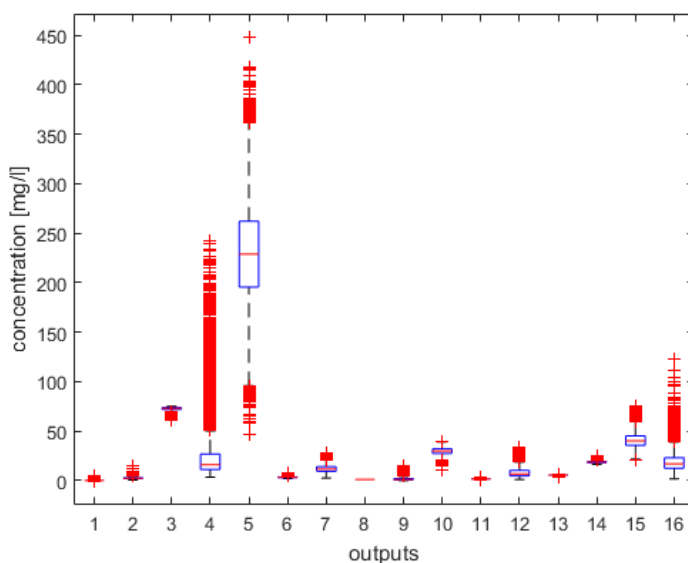
Υπολογισμός του διαλυτού COD

Το διαλυτό COD (S_{Bf} και S_{Bs}) που βρίσκεται στο ανάμεικτο υγρό θεωρείται ότι είναι ίδιο με το διαλυτό COD της εξόδου και προκύπτει μέσω μεθόδου κροκίδωσης.

Για τον προσδιορισμό των επιμέρους κλασμάτων του οργανικού φορτίου τόσο στα εισερχόμενα λύματα αλλά και στα δείγματα εξόδου των δύο συστημάτων, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός μεθόδων διήθησης και κροκίδωσης με χρήση θειούχου ψευδαργύρου ως κροκιδωτικό.

Η μέθοδος της κροκίδωσης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πραγματικά διαλυτού κλάσματος του COD. Η πιο συνήθης εφαρμοσμένη πρακτική περιλαμβάνει την διήθηση δείγματος μέσω μεμβράνης μεγέθους πόρων 0,45 μm . Θεωρείται ότι στο διήθημα που προκύπτει το COD που υπολογίζεται πειραματικά αντιπροσωπεύει το διαλυτό COD του εξεταζόμενου δείγματος. Στην πραγματικότητα όμως, μικρού μοριακού βάρους ενώσεις που ανήκουν στην κατηγορία των κολλοειδών (μικρο-κολλοειδή) διέρχονται μέσω της μεμβράνης διήθησης και αλλοιώνουν προς τα πάνω την προσδιοριζόμενη τιμή.

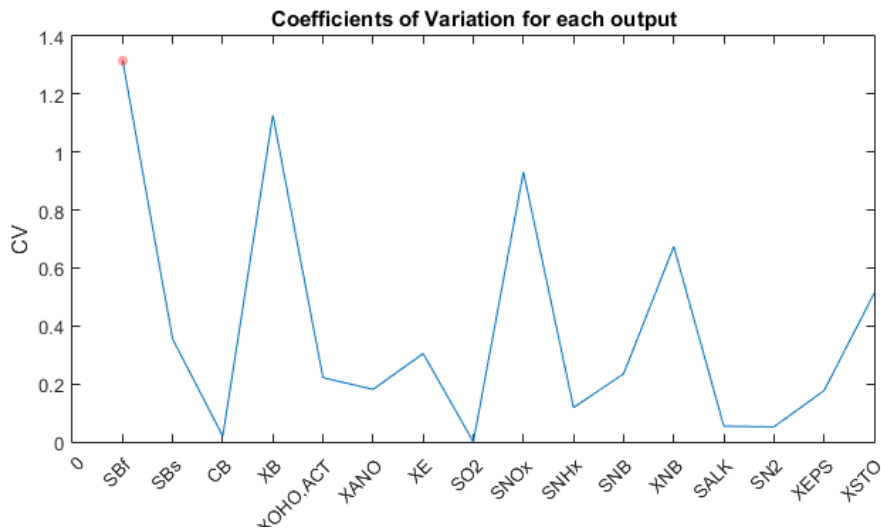
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ



Εικόνα 10: Whiskers-Boxplots

Ορισμένες συγκεντρώσεις ακολουθούν διαφορετικές κατανομές πιθανοτήτων, οι οποίες μπορούν να εκτιμηθούν από μια εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας.

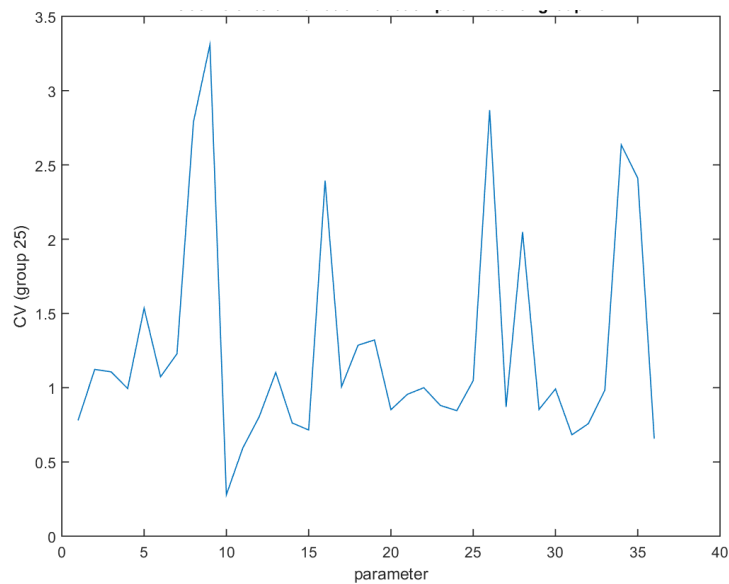
Έχουν παρατηρηθεί πολλές ακραίες τιμές (outliers) το οποίο είναι αναμενόμενο εφόσον οι έξοδοι προέρχονται από προσομοίωση και το εφαρμοζόμενο μοντέλο είναι εξαιρετικά μη γραμμικό και χαοτικό (ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες).



Εικόνα 11: c.v. για κάθε μεταβλητή εξόδου

Οι τιμές του c.v. κυμαίνονται μεταξύ 0,1 και 1,3, γεγονός που εξασφαλίζει ότι η χρήση της μεταβλητότητας ως μέτρο ευαισθησίας έχει νόημα για τις εξόδους του μοντέλου. Έτσι, στην περίπτωση των πολύ μικρών c.v. όπως το 0,01, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί εάν οι διαφορετικές παράμετροι του μοντέλου συμμετέχουν στη διασπορά των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

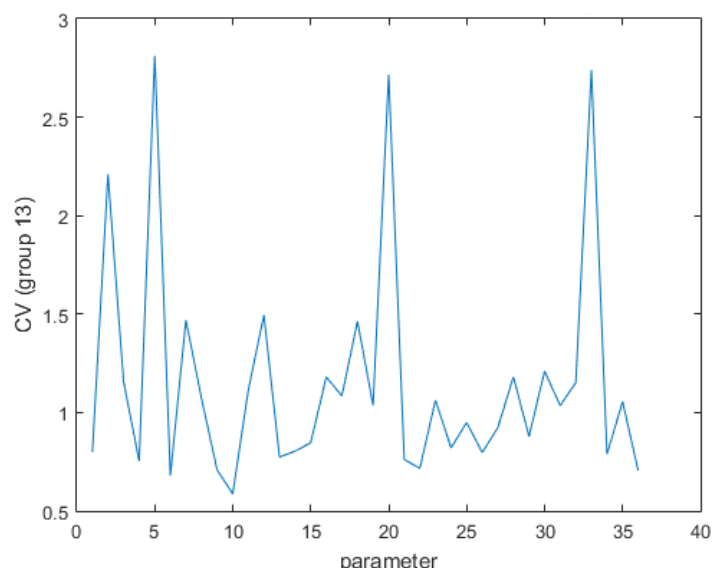
Από το παραπάνω σχήμα, μπορεί να διαπιστωθεί ότι το διαλυτό γρήγορο βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα (SBf) είναι η πιο ευαίσθητη μεταβλητή εξόδου στις μεταβολές των παραμέτρων.



Εικόνα 12: c.v. για την ομάδα 25, για κάθε παράμετρο

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται το c.v. κάθε παραμέτρου για την έξοδο διαλυτού γρήγορου βιοδιασπάσιμου υποστρώματος (SBf). Στην ομάδα 25 οι παράμετροι με τις υψηλότερες τιμές είναι οι εξής:

- μΟΗΟ
- qSTO
- YOHO,AER
- kEPS,MAX



Εικόνα 13: c.v. για την ομάδα 13, για κάθε παράμετρο

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται το c.v. κάθε παραμέτρου για την έξοδο διαλυτού γρήγορου βιοδιασπάσιμου υποστρώματος (SBf). Στην ομάδα 13 οι παράμετροι με τις υψηλότερες τιμές είναι οι εξής:

- qEPS_HYD
- qXB_HYD
- KNHx

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Μετά την εκτενή ανάλυση του μοντέλου HRAS, θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Το μοντέλο του Thomas Nogaj, 2015 γράφθηκε σύμφωνα με τον πίνακα που δόθηκε στο κεφάλαιο «Μοντέλο HRAS» με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Python και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με διαγραμματική και σχηματική απεικόνιση. Αναλυτικότερα, οι τιμές των αρχικών συγκεντρώσεων (αυτών που ήδη υπάρχουν στον αντιδραστήρα) πάρθηκαν από το διδακτορικό του Thomas Nogaj, 2015 και οι τιμές των παραμέτρων ήταν αυτές που χρησιμοποίησε ο Nogaj μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου του με τα δικά του πειραματικά δεδομένα. Οι δε τιμές των συγκεντρώσεων εισόδου δόθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα του πιλοτικού που αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, όπως το ίδιο συνέβη και για τις παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος (δηλαδή παροχή εισόδου, παροχή λάσπης και όγκος αντιδραστήρα). Οι τιμές όλων των παραπάνω δίνονται στους πίνακες του Παραρτήματος.

Πίνακας 3: Παράμετροι σχεδιασμού του πιλοτικού για τους 5 κύκλους λειτουργίας, όπου Q_{in} η παροχή εισόδου, Q_{WAS} η παροχή ιλύος και V ο όγκος του αντιδραστήρα.

	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5
Q_{in} [L/d]	180	360	360	720	720
Q_{WAS} [L/d]	7.5	7.5	15	15	30
V [L]	15	15	15	15	15

Κάποιες παρατηρήσεις που πρέπει να γίνουν σε αυτό το σημείο, είναι πως το μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνει μοντέλο καθίζησης και καθώς δεν έγινε κάποια χρήση συντελεστή f που να περιγράφει την καθίζηση, θεωρείται πως πριν την έξοδο γίνεται ένας τέλειος διαχωρισμός στερεών-υγρών και η έξοδος των στερεών περιλαμβάνει μόνο τις σωματιδιακές και κολλοειδείς συγκεντρώσεις ενώ η έξοδος των διαλυτών τα υπόλοιπα. Δεδομένου επίσης πως έγινε και η χρήση του διακόπτη ($K_{Bf}/(K_{Bf}+S_{Bf})$) στις κινητικές r_2 και r_4 , που περιγράφουν την βραδεία ανάπτυξη των ετερότροφων, πρέπει να επισημανθεί πως το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Διοξικό Μοντέλο και όχι το μοντέλο Διπλού Υποστρώματος.

Τα πειραματικά αποτελέσματα του πιλοτικού δίνονται στους παρακάτω πίνακες και αποτελούν τις συγκεντρώσεις εισόδου και τις συγκεντρώσεις εξόδου για τους 5 κύκλους λειτουργίας.

Πίνακας 4: Συγκεντρώσεις εισόδου του πιλοτικού για τους 5 κύκλους λειτουργίας.

Σύμβολο	Μονάδα	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5
S_{Bf}	g COD.m ⁻³	60.8	64.8	64.8	64.8	64.8
S_{Bs}	g COD.m ⁻³	44.5	47.2	47.2	47.2	47.2
C_B	g COD.m ⁻³	54	57.6	57.6	57.6	57.6
X_B	g COD.m ⁻³	350	370	370	370	370
$X_{OHO,ACT}$	g COD.m ⁻³	10	10	10	10	10
X_E	g COD.m ⁻³	0	0	0	0	0
X_{EPS}	g COD.m ⁻³	10	10	10	10	10
X_{STO}	g COD.m ⁻³	10	10	10	10	10

Πίνακας 5: Αποτελέσματα του πιλοτικού για τους 5 κύκλους λειτουργίας.

	Πειραματικά				
	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5
SBf	15	40	5	54	46
SBs			25		
CB	28	250	190	460	650
XB	53	540	880	1130	1250
XOHO_ACT	5250	8860	5000	7580	4360
XE	515	1090	306	612	82
XEPS	245	360	200	570	214
XSTO	2	135	60	120	380
Sum COD	6108	11275	6666	10526	6982

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι πολλές από τις τιμές δεν μπορούσαν να μετρηθούν στο εργαστήριο και άλλες τιμές από αυτές μετρήθηκαν με διαφορετικές μεθόδους από αυτές που χρησιμοποιήσαν στο μοντέλο του Nogaj. Για τις τιμές που δεν είχαν μετρηθεί, είτε έγινε κάποια παραδοχή ότι είναι μηδέν είτε δόθηκε αντίστοιχη τιμή που είχε χρησιμοποιήσει στα δικά του ο Nogaj.

Εφόσον δεν είναι διαθέσιμα τα πειραματικά αποτελέσματα που χρησιμοποίησε ο Nogaj (2015) για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και για τον προσδιορισμό των παραμέτρων, δεν μπορούμε να κρίνουμε την ορθότητα τους (όπως δεν γνωρίζουμε αν με άλλα πειραματικά η τιμή του f_{STO} ή του $K_{EPS,MAX}$ που είχε προκύψει από τα σύνολα δεδομένων που παρείχε ο Jimenez et al. (2000),

εφαρμόζοντας σε αυτά μια ελάχιστη τετραγωνική λογαριθμική προσαρμογή η οποία έδωσε αποτέλεσμα της τιμής $k_{EPS,MAX}$ ίσο με 0,25 (gCODEPS / gVSS), κατά πόσο θα ήταν κοντά στην εκτιμημένη τιμή του ή θα διέφερε αρκετά) και αυτό αποτελεί και έναν λόγο που μπορεί το μοντέλο να μην προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις μετρήσεις του πιλοτικού.

Έχοντας τρέξει το πρόγραμμα για αυτές τις τιμές παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κάθε κύκλου και γίνεται σύγκριση με τα μετρημένα του πιλοτικού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται στους πίνακες όταν πιάσουν σταθερές συνθήκες (steady state).

Πίνακας 6: Αποτελέσματα του μοντέλου για τους 5 κύκλους λειτουργίας.

Results	Μοντέλο				
	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5
SBf	0.20	0.20	0.36	0.36	1.39
SBs	6.1	6.1	9.5	9.5	15.4
CB	2.4	2.2	4.4	4.0	33.3
XB	203	430	786	1572	6962
XOHO_ACT	5166	10924	6161	12323	3292
XE	515	1090	306	612	82
XEPS	244	254	211	220	94
XSTO	107	225	211	423	252
Sum COD	6244	12931	7689	15164	10732

Έγινε επίσης μια προσπάθεια να πλησιάσουν οι τιμές του διαλυτού βιοδιασπάσιμου COD που προέκυψαν από το μοντέλο, με τις τιμές του πιλοτικού, αλλάζοντας τις τιμές κάποιων από τις παραμέτρους. Δεδομένου ότι θέλουμε να διορθώσουμε τα SBf και SBs, και καθώς αυτά εξαρτώνται από το ρυθμό ανάπτυξης που δεν θέλουμε να πειράξουμε γιατί η βιομάζα δίνει κοντινές με το πιλοτικό τιμές, και από τα KBf και KBs, έγινε η επιλογή να τρέξει η προσομοίωση με τιμές KBf ίση με 120 και KBs ίση με 140. Τα αποτελέσματα αυτού του τρεξίματος, δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα του μοντέλου για τους 5 κύκλους λειτουργίας με αλλαγή 2 παραμέτρων.

Results	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5
SBf	1.19	1.20	2.20	2.20	10.76
SBs	21.32	21.30	32.87	32.88	46.9
CB	2.44	2.27	4.70	4.29	337
XB	206	435	897	1795	7717
XOHO_ACT	5005	10602	5807	11616	2199
XE	499	1058	289	577	55
XEPS	244	254	209	217	77
XSTO	104	219	200	399	180

4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τα προηγούμενα φαίνονται παρακάτω αναλυτικά τα αποτελέσματα του μοντέλου σε σχέση με τα μετρημένα του πιλοτικού.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα του μοντέλου για τους 5 κύκλους λειτουργίας και σύγκριση με του πιλοτικού, όπου Μ: μοντέλο και Π: πειραματικά και μονάδες (mg/L).

	Κύκλος 1		Κύκλος 2		Κύκλος 3		Κύκλος 4		Κύκλος 5	
	Μ	Π	Μ	Π	Μ	Π	Μ	Π	Μ	Π
SBf	0.20	15	0.20	40	0.36	5	0.36	54	1.39	46
SBs	6.1		6.1		9.5	25	9.5		15.4	
CB	2.4	28	2.2	250	4.4	190	4.0	460	33.3	650
XB	203	53	430	540	786	880	1572	1130	6962	1250
XOHO_ACT	5166	5250	10924	8860	6161	5000	12323	7580	3292	4360
XE	515	515	1090	1090	306	306	612	612	82	82
XEPS	244	245	254	360	211	200	220	570	94	214
XSTO	107	2	225	135	211	60	423	120	252	380
Sum COD	6244	6108	12931	11275	7689	6666	15164	10526	10732	6982

Από τον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνεται πως υπάρχουν σοβαρές αποκλίσεις μεταξύ κάποιων κλασμάτων του COD των μετρημένων τιμών με του μοντέλου. Συγκεκριμένα, το X_B φαίνεται στο μοντέλο να υπερεκτιμάται σε σχέση με του πιλοτικού. Στον 5^ο κύκλο παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση του X_B και αρκετά χαμηλή τιμή της ενεργής βιομάζας ($X_{OHO,ACT}$) το οποίο μπορεί να οφείλεται στο γεγονός πως επειδή υπάρχει υψηλή φόρτιση αλλά μικρός χρόνος παραμονής στερεών (μεγάλη τιμή της παροχής περίσσειας ιλύς), είναι πιθανόν επειδή η κινητική της φθοράς βιομάζας για παραγωγή X_B έχει κινητική 1^{ης} τάξης, ενώ η παραγωγή ετερότροφων έχει κινητική Monod, το σύστημα σε μικρό SRT η βιομάζα που παράγεται δεν προλαβαίνει να αυξηθεί τόσο προτού φύγει από το σύστημα και καθώς η φθορά αποδίδει X_B το σύστημα συσσωρεύει πολύ X_B το οποίο δεν προλαβαίνει να υδρολύσει σε S_{Bs} .

Επιπλέον τα διαλυτά βιοδιασπάσιμα κλάσματα του COD (S_{Bf} και S_{Bs}) υποεκτιμούνται αρκετά στο μοντέλο σε σχέση με τα πειραματικά, το οποίο δεν φαίνεται να είναι και λογικό καθώς η απομάκρυνση διαλυτού COD είναι πολύ μεγάλη, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Να αναφερθεί όμως πως αν γίνει σύγκριση του συνολικού COD του μοντέλου με τα πειραματικά $VSS*1,86$ (για να υπολογιστεί σε μονάδες COD), δεν παρατηρείται τόσο μεγάλη απόκλιση.

Πίνακας 9: Ποσοστά απομάκρυνσης του διαλυτού βιοδιασπάσιμου COD του μοντέλου για τους 5 κύκλους λειτουργίας.

	Απομάκρυνση διαλυτού COD στο μοντέλο				
	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5
SBf	99.7%	99.7%	99.5%	99.5%	97.9%
SBs	86.3%	87.1%	80.0%	80.0%	67.5%

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι διαφορές που δίνει το μοντέλο με το πιλοτικό όσον αφορά τα την αναλογία των επιμέρους κλασμάτων προς το συνολικό COD. Συγκεκριμένα, φαίνεται πως η ενεργή βιομάζα $X_{OHO,ACT}$ καταλαμβάνει το ίδιο ποσοστό COD και στις δύο περιπτώσεις, σε όλους τους κύκλους λειτουργίας εκτός από τον 5^ο, όπου το μοντέλο δείχνει πως η βιομάζα είναι μόνο το 30% του συνολικού COD, ενώ το πιλοτικό στην ίδια αναλογία δείχνει πως είναι το 60% του ολικού COD. Επίσης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το διαλυτό βιοδιασπάσιμο COD υποεκτιμάται στο μοντέλο και αυτό είναι εμφανές και στον παρακάτω πίνακα όπου στο μοντέλο το διαλυτό κυμαίνεται από 5% έως 15% του ολικού COD, ενώ στο πιλοτικό είναι από 25% έως 66% του ολικού COD.

Πίνακας 10: Ποσοστά των επιμέρους κλασμάτων του COD προς το συνολικό, για τους 5 κύκλους λειτουργίας και σύγκριση του μοντέλου με του πιλοτικού, όπου Μ: μοντέλο και Π: πειραματικά.

	Κύκλος 1		Κύκλος 2		Κύκλος 3		Κύκλος 4		Κύκλος 5	
	Μ	Π	Μ	Π	Μ	Π	Μ	Π	Μ	Π
SBf	0.00%	0.25%	0.00%	0.35%	0.00%	0.08%	0.00%	0.51%	0.01%	0.66%
SBs	0.10%		0.05%		0.12%	0.38%	0.06%			
CB	0.0%	0.5%	0.0%	2.2%	0.1%	2.9%	0.0%	4.4%	0.3%	9.3%
XB	3%	1%	3%	5%	10%	13%	10%	11%	65%	18%
XOHO_ACT	83%	86%	84%	79%	80%	75%	81%	72%	31%	62%
XE	8%	8%	8%	10%	4%	5%	4%	6%	1%	1%
XEPS	4%	4%	2%	3%	3%	3%	1%	5%	1%	3%
XSTO	2%	0%	2%	1%	3%	1%	3%	1%	2%	5%

Στο πιλοτικό πέρα από τις μετρήσεις των κλασμάτων του COD, έγινε και η μέτρηση του ολικού COD καθώς και των πτητικών αιωρούμενων στερεών (MLVSS), με αποτέλεσμα να μπορεί να προκύψει ο λόγος του i_c ο οποίος δίνει την αντιστοιχία των VSS με το σωματιδιακό COD και σύμφωνα με τον Νογaj του δόθηκε η τιμή 1,86 gCOD/gVSS αντί για την τιμή 1,42 gCOD/gVSS, όπως δίνεται συνήθως σε ένα συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος. Από τις μετρήσεις του πιλοτικού, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα οι τιμές του συγκεκριμένου λόγου, για κάθε κύκλο λειτουργίας.

Πίνακας 11: Λόγος i_{cv} με μονάδες gCOD/gVSS από μετρήσεις στο πιλοτικό, για κάθε κύκλο λειτουργίας.

Κύκλος	COD ιλύος (gCOD/L)	MLVSS (gVSS/L)	Λόγος (gCOD/gVSS)
1	4.63	3.70	1.25
2	10.97	6.24	1.76
3	7.90	3.19	2.48
4	13.14	5.92	2.22
5	5.91	3.80	1.56

Μια παρατήρηση που προκύπτει από τον πίνακα είναι πως ο μέσος όρος του λόγου των 5 κύκλων λειτουργίας πλησιάζει την τιμή του 1,86 gCOD/gVSS, αλλά είναι εμφανές πως από τον ένα κύκλο στον άλλον υπάρχει μεγάλη μεταβολή του λόγου. Επίσης η τιμή του κύκλου 5 δεν συμβαδίζει με τις υπόλοιπες.

Κεφάλαιο 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Συμπεράσματα βασισμένα στην ανάλυση ευαισθησίας:

Από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

Η πιο ευαίσθητη έξοδος στις διακυμάνσεις των παραμέτρων είναι το διαλυτό γρήγορο βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα (S_{Bf}). Οι παράμετροι με μεγάλη επιρροή σε αυτή την έξοδο είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της βιομάζας (μ_{OHO}), η σταθερά ρυθμού ανάπτυξης σε X_{STO} (q_{STO}), ο συντελεστής μετατροπής ετερότροφων για αναερόβια ανάπτυξη X_{OHO} (Y_{OHO_AER}) και ο συντελεστής σχηματισμού EPS (k_{EPS_MAX}). Ενώ οι παράμετροι με μικρή επιρροή είναι ο ρυθμός υδρόλυσης των EPS (q_{EPS_HYD}), ο ρυθμός υδρόλυσης του σωματιδιακού X_B (q_{XB_HYD}), και η σταθερά ημι-κορεσμού για αυτότροφους (K_{NHx}).

Όπως παρατηρήθηκε από τα Whiskers-Boxplots, μερικές έξοδοι ακολουθούν διαφορετικές κατανομές πιθανοτήτων, το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω πολυπλοκότητας του μοντέλου.

Από την ανάλυση ευαισθησίας παρατηρούνται πολλές ακραίες συνθήκες του χαοτικού συστήματος που προκύπτουν από ένα συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων.

5.2 Συμπεράσματα που προέκυψαν από τη χρήση των πειραματικών δεδομένων:

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση διαλυτού βιοδιασπάσιμου υποστρώματος όπως και κολλοειδούς υποστρώματος σε σχέση με το μοντέλο, που μπορεί να οφείλεται στους γρήγορους ρυθμούς κροκίδωσης και ανάπτυξης βιομάζας, απομακρύνοντας έτσι μεγαλύτερη ποσότητα διαλυτού και κολλοειδούς από όσο αναμένεται. Άλλο αίτιο στο οποίο μπορεί να οφείλεται αυτή η διαφοροποίηση είναι ο διαφορετικός τρόπος μέτρησης των επιμέρους κλάσμάτων του COD, καθώς δεν είναι γνωστή η μέθοδος μέτρησης που χρησιμοποίησε ο Nogaj και που στην συνέχεια με βάση αυτόν βαθμονόμησε τις παραμέτρους του μοντέλου του, ενώ στην δική μας περίπτωση ο διαχωρισμός των διαλυτών με τα κολλοειδή και τα στερεά έγινε με την μέθοδο του Mamais et al., 1993.

Επίσης πέρα από το διαλυτό και το κολλοειδές, τα στερεά X_B του μοντέλου φαίνεται να υπερεκτιμώνται σε σχέση με τις μετρήσεις του πιλοτικού, εφόσον ιδίως οι τιμές του X_B είναι σχετικά μεγαλύτερες από τις πειραματικές.

Γενικά συμπεραίνουμε πως παρατηρούνται κάποιες αποκλίσεις μεταξύ πιλοτικού και μοντέλου στα επιμέρους κλάσματα του COD.

Παρόλο που τα επιμέρους κλάσματα του COD φαίνεται να μην προσεγγίζουν πολύ καλά τα πειραματικά αποτελέσματα, αν γίνει σύγκριση του συνολικό COD του μοντέλου, με αυτό του πιλοτικού (το οποίο προκύπτει από την μάζα των VSS *1.86 gCOD/gVSS), θα προκύψει πως οι τιμές συγκλίνουν.

Γενικά στον 5^ο κύκλο εμφανίζονται πολλές ασυνάφειες συγκριτικά με τους προηγούμενους κύκλους και το μοντέλο φαίνεται να δείχνει ακόμα μεγαλύτερες διαφορές από ότι στα πειραματικά, με άλλα λόγια το μοντέλο σε αυτές τις συνθήκες (υψηλή οργανική φόρτιση, μικρό SRT και μικρός HRT) δεν προσαρμόζεται τόσο καλά στα πειραματικά δεδομένα. Ειδικότερα, στον 5ο κύκλο παρατηρείται μια αύξηση του X_B και μια χαμηλή τιμή της ενεργής βιομάζας (X_{OHO_ACT}) το οποίο μπορεί να οφείλεται στο γεγονός πως επειδή υπάρχει υψηλή φόρτιση αλλά μικρός χρόνο παραμονής στερεών (μεγάλη τιμή της παροχής περίσσειας ύλης), είναι πιθανόν επειδή η κινητική της φθοράς βιομάζας για παραγωγή X_B έχει κινητική 1ης τάξης, ενώ η παραγωγή ετερότροφων έχει κινητική Monod, το σύστημα σε μικρό SRT η βιομάζα που

παράγεται δεν προλαβαίνει να αυξηθεί τόσο προτού φύγει από το σύστημα και καθώς η φθορά αποδίδει X_B το σύστημα συσσωρεύει πολύ X_B το οποίο δεν προλαβαίνει να υδρολύσει σε S_{Bs} .

5.3 Γενικά συμπεράσματα που αφορούν το μοντέλο:

Παρατηρούνται δυσκολίες στην χρήση του μοντέλου λόγω του μεγάλου αριθμού δεδομένων εισόδου που απαιτείται για να τρέξει το μοντέλο. Πολλές από τις μεταβλητές των συγκεντρώσεων εισόδου είναι μεγέθη που δεν μπορούν να μετρηθούν εύκολα σε όλα τα εργαστήρια υγειονομικής τεχνολογίας με αποτέλεσμα να καθιστά το μοντέλο σχετικά δύσχρηστο. Επίσης ο μεγάλος αριθμός παραμέτρων του μοντέλου, από τις οποίες δεν έχουν όλες εμπειρικές τιμές από την βιβλιογραφία που να προσαρμόζουν το μοντέλο σε ικανοποιητικό βαθμό με τις μετρήσεις των πιλοτικών, και η πολυπλοκότητα του λόγω των πολλών κινητικών που περιλαμβάνει, αποτελούν ένα ακόμα λόγο που καθιστούν την εφαρμογή του μοντέλου δύσκολη.

5.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Καθώς το μοντέλο HRAS δεν περιλαμβάνει μοντέλο καθίζησης, δίνει αποτελέσματα θεωρώντας ένα τέλειο διαχωρισμό στερεών – υγρών, έχοντας την έξοδο των στερεών στην δίοδο απομάκρυνσης λάσπης. Σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσε είτε να προστεθεί ένα μοντέλο καθίζησης ή εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής f , ο οποίος να δείχνει σε ποσοστό πόσο ανάμεικτο υγρό έφυγε από την έξοδο. Ουσιαστικά το f θα είναι το ποσοστό που φεύγει από το πυθμένα της καθίζησης (δηλαδή από την έξοδο της περίσσειας ιλύος) και το $1-f$ θα αντιστοιχεί στο ποσοστό που φεύγει από την κύρια έξοδο.

Έχει ενδιαφέρον να εξεταστούν και άλλα μοντέλα που προσομοιώνουν το HRAS, βασιζόμενα στο μοντέλο ASM1 της IWA, που μπορεί να έχουν λιγότερες παραμέτρους και γενικότερα μικρότερο βαθμό πολυπλοκότητας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

- Akanyeti, I., Temmink, H., Remy, M., & Zwijnenburg, A. (2010). Feasibility of bioflocculation in a high-loaded membrane bioreactor for improved energy recovery from sewage. *Water Science and Technology*, 61(6), 1433-1439.
- Ardern, E., & Lockett, W. T. (1914). Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. *Journal of the society of chemical industry*, 33(10), 523-539.
- Batstone, D. J., & Virdis, B. (2014). The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy. *Current Opinion Biotechnology*, 27, 142–149.
- Boehnke, D. B., & Diering, D. B. (1997). Cost-effective wastewater treatment process for removal of... *Water Engineering & Management*, 144(5), 30-34.
- Carucci, A., Dionisi, D., Majone, M., Rolle, E., & Smurra, P. (2001). Aerobic storage by activated sludge on real wastewater. *Water Research*, 35(16), 3833-3844.
- Chua, H., & Yu, P. H. F. (1999). Production of biodegradable plastics from chemical wastewater—a novel method to reduce excess activated sludge generated from industrial wastewater treatment. *Water science and technology*, 39(10-11), 273-280.
- Constantine, T., Houweling, D. & Kraemer, J. (2012). “Doing the Two-Step”—Reduced Energy Consumption Sparks Renewed Interest in Multistage Biological Treatment. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2012(10), 5771-5783.
- De Graaff, M. S., van den Brand, T. P., Roest, K., Zandvoort, M. H., Duin, O. & van Loosdrecht, M. C. (2016). Full-scale highly-loaded wastewater treatment processes (A-stage) to increase energy production from wastewater: performance and design guidelines. *Environmental Engineering Science*, 33(8), 571-577.
- De Smedt, V., Nopens, I., Amerlinck, Y., Vlaeminck, S. E., Meerburg, M. F. & Torfs, I. E. (2015). The high-rate contact stabilisation system: combining experiments and modelling to gain system knowledge. *Faculty of bio-engineering*.
- Guellil, A., Boualam, M., Quiquampoix, H., Ginestet, P., Audic, J. M., & Block, J. C. (2001). Hydrolysis of wastewater colloidal organic matter by extracellular enzymes extracted from activated sludge flocs. *Water Science and Technology*, 43(6), 33-40.
- Güven, H., Dereli, R. K., Özgün, H., Ersahin, M. E., & Öztürk, I. (2019). Towards sustainable and energy efficient municipal wastewater treatment by up-concentration of organics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 145-168.

- Heidrich, E. S., Curtis, T. P., & Dolfing, J. (2010). Determination of the internal chemical energy of wastewater. *Environmental Science & Technology*, 45(2), 827-832.
- Higgins, M. J., & Novak, J. T. (1997). Characterization of exocellular protein and its role in bioflocculation. *Journal of environmental engineering*, 123(5), 479-485.
- Huang, J. C., & Li, L. (2000). An innovative approach to maximize primary treatment performance. *Water science and technology*, 42(12), 209-222.
- Jenicek, P., Kutil, J., Benes, O., Todt, V., Zabranska, J., & Dohanyos, M. (2013). Energy self-sufficient sewage wastewater treatment plants: is optimized anaerobic sludge digestion the key?. *Water Science and Technology*, 68(8), 1739-1744.
- Jetten, M. S., Horn, S. J., & van Loosdrecht, M. C. (1997). Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system. *Water science and technology*, 35(9), 171-180.
- Jimenez, J., Bott, C., Miller, M., Murthy, S., Randall, A., Nogaj, T., & Wett, B. (2013). High-Rate Activated Sludge System for Carbon Removal–Pilot Results and Crucial Process Parameters. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2013(16), 2443-2451.
- Jimenez, J., Miller, M., Bott, C., Murthy, S., De Clippeleir, H. & Wett, B. (2015). High-rate activated sludge system for carbon management–Evaluation of crucial process mechanisms and design parameters. *Water research*, 87, 476-482.
- Kargbo, D. M. (2010). Biodiesel production from municipal sewage sludges. *Energy & Fuels*, 24, 2791–2794.
- Lapidou, C. S., & Rittmann, B. E. (2002). Non-steady state modeling of extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass. *Water Research*, 36(8), 1983-1992.
- McCarty, P. L., Bae, J., & Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer–can this be achieved?.
- Meerburg, F. (2016). High-rate activated sludge systems to maximize recovery of energy from wastewater: Microbial ecology and novel operational strategies. Doctoral dissertation, Ghent University, p. 235.
- Meerburg, F. A., Boon, N., Van Winckel, T., Vercamer, J. A., Nopens, I., & Vlaeminck, S. E. (2015). Toward energy-neutral wastewater treatment: A high-rate contact stabilization process to maximally recover sewage organics. *Bioresource technology*, 179, 373-381.

- Miller, M. W. (2015). Optimizing high-rate activated sludge: organic substrate for biological nitrogen removal and energy recovery (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Modin, O., Persson, F., Wilén, B. M., & Hermansson, M. (2016). Nonoxidative removal of organics in the activated sludge process. *Critical reviews in environmental science and technology*, 46(7), 635-672.
- Nogaj, T. (2015). Mathematical modeling of carbon removal in the a-stage activated sludge system.
- Nogaj, T. M., Randall, A. A., Jimenez, J. A., Takacs, I., Bott, C. B., Miller, M. W., Murthy, S. & Wett, B. (2013). Mathematical modeling of carbon removal in the high-rate activated sludge system: model presentation and application. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2013(16), 2452-2471.
- P. Dimitriadis, A. Tegos, A. Oikonomou, V. Pagana, A. Koukouvinos, N. Mamassis, D. Koutsoyiannis, and A. Efstratiadis (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping, *Journal of Hydrology*, 534, 478–492.
- Petersen, E. E. (1965). *Chemical reaction analysis*. Prentice Hall.
- Rahman, A., Warner, T., Miller, M., Jimenez, J. A., Wett, B., Al-Omari, A., Riffat, R., Murthy, S., De Clippeleir, H. & Bott, C. (2017). Potential of high-rate contact-stabilization for maximizing carbon redirection and capture compared to plug flow A-stage systems. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2017(7), 4269-4275.
- Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *The activated sludge process. Environmental biotechnology: principles and applications*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGraw-Hill, Boston, 307-393.
- Sancho, I., Lopez-Palau, S., Arespacochaga, N. & Cortina, J. L. (2019). New concepts on carbon redirection in wastewater treatment plants: A review. *Science of the Total Environment*, 647, 1373-1384.
- Shizas, I., & Bagley, D. M. (2004). Experimental determination of energy content of unknown organics in municipal wastewater streams. *Journal of Energy Engineering*, 130(2), 45-53.
- Sin, G., Van Hulle, S. W., De Pauw, D. J., Van Griensven, A., & Vanrolleghem, P. A. (2005). A critical comparison of systematic calibration protocols for activated sludge models: A SWOT analysis. *Water Research*, 39(12), 2459-2474.

- Smitshuijzen, J., Pérez, J., Duin, O. & van Loosdrecht, M. C. (2016). A simple model to describe the performance of highly-loaded aerobic COD removal reactors. *Biochemical engineering journal*, 112, 94-102.
- Sobeck, D. C., & Higgins, M. J. (2002). Examination of three theories for mechanisms of cation-induced bioflocculation. *Water research*, 36(3), 527-538.
- Van Aalst-van Leeuwen, M. A., Pot, M. A., Van Loosdrecht, M. C. M., & Heijnen, J. J. (1997). Kinetic modeling of poly (β -hydroxybutyrate) production and consumption by *Paracoccus pantotrophus* under dynamic substrate supply. *Biotechnology and bioengineering*, 55(5), 773-782.
- Verstraete, W., Van de Caveye, P., & Diamantis, V. (2009). Maximum use of resources present in domestic “used water”. *Bioresource technology*, 100(23), 5537-5545.
- Zhang, X., Li, X., Zhang, Q., Peng, Q., Zhang, W., & Gao, F. (2014). New insight into the biological treatment by activated sludge: the role of adsorption process. *Bioresource technology*, 153, 160-164.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Καρατσώκης, Γεώργιος Χ., (2019). Παρακολούθηση και βελτιστοποίηση πιλοτικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων υψηλής οργανικής φόρτισης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 12: Κινητικές εξισώσεις HRAS μοντέλου, πηγή: Thomas Nogaj, 2015

j	Symb ol	Name	Rate expression (rj)
1	r1	Αερόβια ανάπτυξη ετερότροφων – Ταχεία	$\mu_{\text{OHO,T}} \cdot (\text{S}_{\text{Bf}} / (\text{K}_{\text{Bf}} + \text{S}_{\text{Bf}})) \cdot (\text{S}_{\text{O}_2} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot (\text{S}_{\text{NH}_x} / (\text{K}_{\text{NH}_x,\text{nut}} + \text{S}_{\text{NH}_x})) \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
2	r2	Αερόβια ανάπτυξη ετερότροφων – Βραδεία	$\mu_{\text{OHO,T}} \cdot (\text{S}_{\text{Bs}} / (\text{K}_{\text{Bs}} + \text{S}_{\text{Bs}})) \cdot (\text{K}_{\text{Bf}} / (\text{K}_{\text{Bf}} + \text{S}_{\text{Bf}})) \cdot (\text{S}_{\text{O}_2} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot (\text{S}_{\text{NH}_x} / (\text{K}_{\text{NH}_x,\text{nut}} + \text{S}_{\text{NH}_x})) \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
3	r3	Ανοξική ανάπτυξη ετερότροφων – Ταχεία	$\mu_{\text{OHO,T}} \cdot (\text{S}_{\text{Bf}} / (\text{K}_{\text{Bf}} + \text{S}_{\text{Bf}})) \cdot (\text{K}_{\text{O,OH}} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot (\text{S}_{\text{NO}_x} / (\text{K}_{\text{NO}_x} + \text{S}_{\text{NO}_x})) \cdot (\text{S}_{\text{NH}_x} / (\text{K}_{\text{NH}_x,\text{nut}} + \text{S}_{\text{NH}_x})) \cdot \eta_{\text{GRO,ANO}_x} \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
4	r4	Ανοξική ανάπτυξη ετερότροφων – Βραδεία	$\mu_{\text{OHO,T}} \cdot (\text{S}_{\text{Bs}} / (\text{K}_{\text{Bs}} + \text{S}_{\text{Bs}})) \cdot (\text{K}_{\text{Bf}} / (\text{K}_{\text{Bf}} + \text{S}_{\text{Bf}})) \cdot (\text{K}_{\text{O,OH}} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot (\text{S}_{\text{NO}_x} / (\text{K}_{\text{NO}_x} + \text{S}_{\text{NO}_x})) \cdot (\text{S}_{\text{NH}_x} / (\text{K}_{\text{NH}_x,\text{nut}} + \text{S}_{\text{NH}_x})) \cdot \eta_{\text{GRO,ANO}_x} \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
5	r5	Αερόβια ανάπτυξη αυτότροφων	$\mu_{\text{ANO}} \cdot (\text{S}_{\text{NH}_x} / (\text{K}_{\text{NH}_x} + \text{S}_{\text{NH}_x})) \cdot (\text{S}_{\text{O}_2} / (\text{K}_{\text{O,ANO}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot \text{X}_{\text{ANO}}$
6	r6	Φθορά ετερότροφων	$b_{\text{O}_2,\text{OHO,T}} \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
7	r7	Φθορά αυτότροφων	$b_{\text{ANO}} \cdot \text{X}_{\text{ANO}}$
8	r8	Αμμωνιοποίηση διαλυτού οργανικού αζώτου	$q_{\text{AMM}} \cdot \text{S}_{\text{NB}} \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
9	r9	Υδρόλυση του παραγιδευμένου άνθρακα	$q_{\text{XB,HYD}} \cdot ((\text{X}_{\text{B}} / \text{X}_{\text{OHO,ACT}}) / (\text{K}_{\text{B,HYD}} + \text{X}_{\text{B}} / \text{X}_{\text{OHO,ACT}})) \cdot ((\text{S}_{\text{O}_2} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) + \eta_{\text{HYD}} \cdot (\text{K}_{\text{O,OH}} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot (\text{S}_{\text{NO}_x} / (\text{K}_{\text{NO}_x} + \text{S}_{\text{NO}_x}))) \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
10	r10	Υδρόλυση του παραγιδευμένου οργανικού αζώτου	$q_{\text{XB,HYD}} \cdot (\text{X}_{\text{NB}} / \text{X}_{\text{B}}) \cdot ((\text{X}_{\text{B}} / \text{X}_{\text{OHO,ACT}}) / (\text{K}_{\text{B,HYD}} + \text{X}_{\text{B}} / \text{X}_{\text{OHO,ACT}})) \cdot ((\text{S}_{\text{O}_2} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) + \eta_{\text{HYD}} \cdot (\text{K}_{\text{O,OH}} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot (\text{S}_{\text{NO}_x} / (\text{K}_{\text{NO}_x} + \text{S}_{\text{NO}_x}))) \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
11	r11	Συσσωμάτωση της κολλοειδούς βιοδιασπάσιμης ουσίας	$q_{\text{ADS}} \cdot \text{C}_{\text{B}} \cdot (\text{X}_{\text{OHO,ACT}} + \text{X}_{\text{ANO}}) \cdot (\text{K}_{\text{SL}} / ((\text{C}_{\text{B}} / (\text{X}_{\text{OHO,ACT}} + \text{X}_{\text{ANO}})) + \text{K}_{\text{SL}})) \cdot (\text{X}_{\text{EPS}} / (\text{K}_{\text{EPS}} + \text{X}_{\text{EPS}}))$
12	r12	Υδρόλυση των προϊόντων εσωτερικής αποθήκευσης	$q_{\text{STO,HYD}} \cdot (\text{X}_{\text{STO}} / \text{X}_{\text{OHO,ACT}}) / (\text{K}_{\text{STO,HYD}} + \text{X}_{\text{STO}} / \text{X}_{\text{OHO,ACT}}) \cdot (\text{K}_{\text{Bf}} / (\text{K}_{\text{Bf}} + \text{S}_{\text{Bf}})) \cdot (\text{K}_{\text{Bs}} / (\text{K}_{\text{Bs}} + \text{S}_{\text{Bs}})) \cdot (\text{S}_{\text{O}_2} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
13	r13	Παγίδευση/Εσωτερική αποθήκευση του S_{NB}	$q_{\text{STO}} \cdot \text{S}_{\text{NB}} / \text{S}_{\text{Bf}} \cdot (\text{S}_{\text{Bf}} / (\text{K}_{\text{B,STO}} + \text{S}_{\text{Bf}})) \cdot (\text{S}_{\text{O}_2} / (\text{K}_{\text{O,OH}} + \text{S}_{\text{O}_2})) \cdot \text{X}_{\text{OHO,ACT}}$
14	r14	Υδρόλυση των EPS	$q_{\text{EPS,HYD}} \cdot \text{X}_{\text{EPS}}$

Πίνακας 14: Τιμές παραμέτρων του Νογαί, πηγή: Thomas Noğaj, 2015

Παράμετροι	Τιμές	Μονάδες
KB_HYD	0.03	g XCB.g XOHO-1
hHYD	0.4	-
qEPS_HYD	0.16	
KEPS	100	
KEPS_HYD	0.05	
qXB_HYD	2.75	
qSTO_HYD	3	
KSTO_HYD	0.15	
KO_EPS	0.7	g SO2.m-3
mOHO	8	d-1
hGRO_ANOX	0.8	-
KBf	20	g SBf.m-3
KBs	40	g SBs.m-3
bOHO	0.62	d-1
KO_OHO	0.15	g SO2.m-3
KNOx	0.5	g SNOx.m-3
KNHx_nut	0.05	g SNHx.m-3
qSTO	2	d-1
KB_STO	5	-
KO_STO	0.7	g SO2.m-3
μANO	0.8	d-1
KNHx	1	g SNHx.m-3
KO_ANO	0.4	g SO2.m-3
bANO	0.15	d-1
qAMM	0.08	m3.g XCB_N-1.d-1
qADS	0.06	d-1
KSL	0.009	-
SRTm_OHO	1.04	-
SRTb_O2_OHO	1.03	-
T	20	Co
Tbase	20	Co
YOHO_AER	0.67	gXOHO.gSB-1
YOHO_ANOX	0.54	gXOHO.gSB-1
YSTO	0.9	gXB.gSB-1
YANO	0.24	gXAUT.gSNO3-1
fU	0.08	gXU.gSBio-1
iN_XB	0.086	g N.g XBio-1
iN_XU	0.06	g N.g XUE-1
iN_EPS	0.12	g N.g XEPS-1
iNO3_N2	2.857	g COD.g N-1
iCOD_NO3	-4.571	g COD.g N-1
iCOD_N2	-1.71429	g COD.g N-1
iCharge_SNHx	0.071	Charge.g N-1
iCharge_SNOx	-0.07143	Charge.g N-1
iCV	1.86	g COD.g VSS-1
iCB	1.42	g COD.g VSS-1
KEPS_MAX	0.2	g CODEPS.gVSS-1
kSTO_MAX	0.56	g XSTO.gSBf-1
fSTO	0.15	

Πίνακας 15: Ονόματα παραμέτρων του Nogaj, πηγή: Thomas Nogaj, 2015

Παράμετροι	
KB_HYD	Συντελεστής κορεσμού για ΧΒ / ΧΟΗΟ
hHYD	Συντελεστής διόρθωσης για υδρόλυση κάτω από ανοξικές συνθήκες
qEPS_HYD	Υδρόλυση EPS
KEPS	Σταθερά ημι-κορεσμού για το EPS
KEPS_HYD	Σταθερά ημι-κορεσμού υδρόλυσης για το EPS
qXB_HYD	Ρυθμός υδρόλυσης του ΧΒ
qSTO_HYD	Ρυθμό υδρόλυσης προϊόντων αποθήκευσης
KSTO_HYD	Σταθερά ημι-κορεσμού υδρόλυσης για STO
KO_EPS	EPS Σταθερά ημι-κορεσμού για το SO ₂
mOHO	Ταχύτητα ανάπτυξης του ΧΟΗΟ
hGRO_ANOX	Συντελεστής μείωσης για ανοξική ανάπτυξη του ΧΟΗΟ
KBf	Σταθερά ημι-κορεσμού για SBf
KBs	Σταθερά ημι-κορεσμού για SBs
bOHO	Ρυθμός αποσύνθεσης για το ΧΟΗΟ
KO_OHO	Σταθερά ημι-κορεσμού για το SO ₂
KNO _x	Σταθερά ημι-κορεσμού για το SNO _x
KNH _{x_nut}	Σταθερά ημι-κορεσμού θρεπτικών συστατικών
qSTO	Ρυθμός για ανάπτυξη στο ΧSTO
KB_STO	Σταθερά ημι-κορεσμού για την αποθήκευση του SB
KO_STO	Σταθερά ημι-κορεσμού STO για το SO ₂
μANO	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης του ΧANO
KNH _x	Σταθερά ημι-κορεσμού υποστρώματος για ANO
KO_ANO	Σταθερά ημι-κορεσμού για το SO ₂
bANO	Ταχύτητα αποσύνθεσης για το ΧANO
qAMM	Ρυθμός αμμωνιοποίησης
qADS	Ρυθμός προσρόφησης
KSL	Σταθερά ημι-κορεσμού για τον περιορισμό της επιφάνειας
SRT _{m_OHO}	Συντελεστής Arrhenius
SRT _{b_O2_OHO}	Συντελεστής Arrhenius
T	Θερμοκρασία
YOHO_AER	Συντελεστής μετατροπής της ετεροτροφικής βιομάζας
YOHO_ANOX	Συντελεστής μετατροπής για ανοξική ανάπτυξη ΧΟΗΟ
YSTO	Συντελεστής μετατροπής για αποθήκευση και παγίδευση SB
YANO	Συντελεστής μετατροπής ανάπτυξης ΧANO ανά SNO ₃
fU	Κλάσμα του ΧU που παράγεται κατά τη διάσπαση της βιομάζας
iN_XB	N περιεκτικότητα της βιομάζας (ΧΟΗΟ, ΧΡΑΟ, ΧΑΝΟ)
iN_XU	N περιεκτικότητα προϊόντων από βιομάζα
iN_EPS	N περιεκτικότητα EPS
iNO _{3_N2}	Μείωση NO ₃ σε ισοδύναμο N ₂ ηλεκτρονίων
iCOD_NO ₃	Ισοδυναμία ηλεκτρονίων οξείδωσης NH ₃ σε NO ₃

iCOD_N2	Ισοδυναμία ηλεκτρονίων οξείδωσης NH3 σε N2
iCharge_SNHx	Συντελεστής μετατροπής για φορτίο NHx
iCharge_SNOx	Συντελεστής μετατροπής για το φορτίο NO3
iCV	Λόγος σωματιδιακού COD προς VSS
iCB	Λόγος COD βιομάζας προς VSS
kEPS_MAX	Συντελεστής σχηματισμού EPS
kSTO_MAX	Μέγιστος ρυθμός παραγωγής πολυμερών αποθήκευσης
fSTO	Κλάσμα του STO στη βιομάζα