



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΛΥΜΑΤΩΝ**

Ελένη Γκόβα

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Επιβλέπων: Κ. Νουτσόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

Ελένη Γκόβα

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Επιβλέπων: Κ. Νουτσόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Στα παιδάκια μου...

Αντί προλόγου

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και των μεταπτυχιακών μου σπουδών θέλω από καρδιάς να ευχαριστήσω τους ανθρώπους χωρίς τους οποίους δεν θα είχα ολοκληρώσει αυτή την πορεία.

Τα λόγια και οι ευχαριστίες δεν επαρκούν για να εκφράσουν την ευγνωμοσύνη μου για τον επιβλέποντα Καθηγητή και Ακαδημαϊκό μου Σύμβουλο, κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή, για την πίστη του σ' εμένα, την έμπρακτη στήριξη, τη συνεχή συμπαράσταση, βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς εκείνον αδιαμφισβήτητα αυτή η προσπάθεια θα είχε εγκαταλειφθεί.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον κ. Δανιήλ Μαμάη, Καθηγητή για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και τη στήριξη και βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου και ειδικότερα για τη συνέχιση των σπουδών μου.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ηλία Παπακωνσταντή, Λέκτορα για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Υποψήφιο Διδάκτορα Χρήστο Ιωαννίδη που μου πρόσφερε απλόχερα το αποτέλεσμα των κόπων του, το πρόγραμμα το οποίο έτρεχα για τις ανάγκες της εργασίας και, ταυτόχρονα ήταν δίπλα μου, απ' την αρχή έως το τέλος, πρόθυμος να με βοηθήσει σε ό,τι χρειάστηκα, θυσιάζοντας ακόμα και τις διακοπές του για να προλάβω να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου.

Δεν θα ήθελα να αμελήσω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην κ. Σοφία Ζγκαμπή για την υποστήριξη και τη βοήθειά της σε όποιο διαδικαστικό θέμα προέκυψε στην πορεία της φοίτησής μου στο πρόγραμμα.

Θερμά ευχαριστώ τον κ. Ιωάννη Ασπρουλάκη, Προϊστάμενο της Διεύθυνσης Τεχνικών Έργων Περιφερειακής Ενότητας Ανατολικής Αττικής, όπου εργάζομαι, για την υποστήριξή του στην προσπάθειά μου να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου.

Επίσης, ευχαριστώ και τις συναδέλφους μου στο Τμήμα Υδραυλικών και Λιμενικών Έργων της Διεύθυνσης Τεχνικών Έργων Περιφερειακής Ενότητας Ανατολικής Αττικής, κ. Χριστίνα Κλάδου και κ. Χριστίνα Μπρούλια για την κατανόησή και την ευγένειά τους.

Δεν μπορώ να αμελήσω να ευχαριστήσω τα κορίτσια μου, τις αδελφικές φίλες και συναδέλφους μου Θεοδότη Βέργου και Αλεξάνδρα Βυρίνη, γιατί πάντα είναι δίπλα μου και μου δίνουν δύναμη.

Ευχαριστώ επίσης, την αγαπημένη μου φίλη Μαρία Συμιακάκη γιατί είναι πάντα κοντά μου, χαίρεται με τις χαρές μου και με ενισχύει.

Αφήνοντας για το τέλος την οικογένειά μου, ακόμα μια φορά ευχαριστώ το σύζυγό μου, Νίκο Μυρωνάκη, που αντέχει να βαδίζει δίπλα μου με υπομονή, όλα τα χρόνια των σπουδών μου, όντας ένθερμος υποστηρικτής μου και εμφυσώντας μου το θάρρος και την αισιοδοξία ότι θα κατακτήσω τους στόχους μου.

Για τους γονείς μου θα πω ότι σε εκείνους οφείλω τα πάντα και τους ευχαριστώ για όλα, αυτά που πέρασαν, όσα συμβαίνουν τώρα και εκείνα που θα φέρει το μέλλον. Μακάρι να καταφέρω να γίνω κι εγώ τέτοιος γονιός για τα παιδιά μου.

Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τα παιδιά μου, το γιο μου Αλέξανδρο και την κόρη μου Αριάδνη, τους πολυτιμότερους ανθρώπους στη ζωή μου, γιατί η ύπαρξή τους μου δίνει τη δύναμη να προσπαθώ για το καλύτερο.

Ελένη Γκόβα

Νοέμβριος 2020

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο την ανάλυση ευαισθησίας ενός ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων για την ανάδειξη εκείνων των παραμέτρων που επιδρούν περισσότερο στη διαμόρφωση των τιμών επιλεγμένων μεταβλητών και δεικτών λειτουργίας του συστήματος.

Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο εφαρμόστηκε για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και βασίζεται στο Μοντέλο Ενεργού Ιλύος Νο 1 (ASM1) για την προσομοίωση των διεργασιών του βιοαντιδραστήρα, το οποίο επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει εξισώσεις για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Επίσης, περιλαμβάνει υπομοντέλο μονοδιάστατης καθίζησης για την προσομοίωση της λειτουργίας της δεξαμενής τελικής καθίζησης (ΔΤΚ) και υπομοντέλο που βασίζεται στο ADM1 για την προσομοίωση των διεργασιών του αναερόβιου χωνευτή. Η λειτουργία της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης (ΔΠΚ) υπολογίζεται από ισοζύγιο μαζών, καθώς και τα στοιχεία που αφορούν στη γραμμή επεξεργασίας της ιλύος, ενώ η προσομοίωση της λειτουργίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, της κατανάλωσης ενέργειας και των δεικτών εκτίμησης της απόδοσης υπολογίζονται από εξισώσεις.

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή μιας OAT (Once At a Time) μεθόδου για τη διερεύνηση της επίδρασης εξήντα επτά (67) στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων λειτουργίας του μοντέλου σε δεκαεννέα (19) μεταβλητές ενδιαφέροντος και δείκτες ελέγχου. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκε η επίδραση της μεταβολής μιας εκ των παραμέτρων κάθε φορά, κατά $\pm 30\%$, στις μεταβλητές: ολικό και διαλυτό COD στην έξοδο, ολικό και αμμωνιακό άζωτο στην έξοδο, περίσσεια ιλύος μετά την επεξεργασία της, ημερήσια απαίτηση οξυγόνου, παραγόμενο βιοαέριο, συνολική ενεργειακή κατανάλωση, ανάκτηση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, εκπομπή υποξειδίου του αζώτου στο βιοαντιδραστήρα, σύνολο εκπομπών υποξειδίου του αζώτου και αερίων του θερμοκηπίου σε όρους διοξειδίου του άνθρακα και στους δείκτες: εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προς COD που καταναλώνεται και προς άζωτο που απομακρύνεται, εκπομπές υποξειδίου του αζώτου προς ολικό άζωτο που εισέρχεται, ενεργειακή κατανάλωση προς COD που καταναλώνεται και προς άζωτο που απομακρύνεται, ποιότητα εκροής σε όρους ρύπανσης. Η σχετική ευαισθησία υπολογίστηκε από την ποσοστιαία μεταβολή της τιμής της μεταβλητής ενδιαφέροντος προς την ποσοστιαία μεταβολή της τιμής της παραμέτρου, που για την περίπτωση της συγκεκριμένης ανάλυσης ήταν 30%.

Στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας εξετάστηκαν σενάρια τα οποία κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Σταθερή φόρτιση του συστήματος με χρόνο παραμονής στερεών 10 ημέρες
- Σταθερή φόρτιση του συστήματος με χρόνο παραμονής στερεών 4.5 ημέρες
- Δυναμική φόρτιση του συστήματος με χρόνο παραμονής στερεών 10 ημέρες

Επισημαίνεται ότι για τη σταθερή φόρτιση η εγκατάσταση δεχόταν σταθερή ημερήσια παροχή η οποία κατανεμήθηκε ισόποσα στις ώρες της ημέρας, ενώ για τη δυναμική φόρτιση δεχόταν

μεταβαλλόμενη ημερήσια παροχή που κατανεμήθηκε σύμφωνα με υδρογράφημα το οποίο δίνει, για κάθε ώρα, ένα ποσοστό της μέσης ωριαίας παροχής.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας κωδικοποιούνται στα ακόλουθα:

- Για τα σενάρια σταθερής φόρτισης, με $SRT=10d$, η παράμετρος στην οποία οι περισσότερες μεταβλητές παρουσίασαν σημαντική σχετική ευαισθησία και σε αρκετές περιπτώσεις τη μέγιστη σχετική ευαισθησία είναι ο βαθμός απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας, Y_h που καθορίζει το κλάσμα οργανικού C που οδηγείται σε σύνθεση μικροοργανισμών ως προς το σύνολο του οργανικού C που απομακρύνεται από το σύστημα.
- Για τα σενάρια σταθερής φόρτισης με $SRT=4d$ οι μεταβλητές παραμένουν ευαίσθητες στις μεταβολές της παραμέτρου Y_h αλλά λόγω των συνθηκών αναστολής της νιτροποίησης αναδεικνύονται ως σημαντικότερες παράμετροι εκείνες που σχετίζονται με τα αζωτούχα συστατικά του συστήματος.
- Η κρίσιμη διεργασία για τα αποτελέσματα της επεξεργασίας είναι η νιτροποίηση. Η επάρκεια του χρόνου παραμονής στερεών για την ολοκλήρωση ή αναστολή της διεργασίας μεταβάλλει σημαντικά τις ισορροπίες και τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα ενεργού ιλύος.
- Η σχετική ευαισθησία των μεταβλητών και δεικτών ενδιαφέροντος μιας ΕΕΛ στις στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους εξαρτάται από τις λειτουργικές συνθήκες του συστήματος. Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται για στατική ή δυναμική φόρτιση, καθώς και μεταξύ συστημάτων που λειτουργούν με μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών ή μικρούς χρόνους παραμονής στερεών που δεν επιτρέπουν να συντελεστεί η διεργασία της νιτροποίησης.
- Η ίδια ανάλυση ευαισθησίας σε δυναμικές συνθήκες δίνει αρκετά διαφοροποιημένα αποτελέσματα μεταξύ των συνθηκών υψηλής, μέσης και χαμηλής φόρτισης του συστήματος και, επιπρόσθετα, η ίδια η απόκριση του μοντέλου διαφοροποιείται ακόμα και στην ίδια δυναμική φόρτιση.

Abstract

The purpose of the present thesis is the sensitivity analysis of an integrated mathematical model for the simulation of the operation of wastewater treatment plants, in order to highlight certain parameters that have the greatest influence in the formation of the value of the chosen variables and operation indices.

The mathematical model that was applied for the needs of this thesis has been developed by the research team of the Sanitary Engineering Laboratory of the National Technical University of Athens and is based on the Active Sludge Model No. 1 (ASM1) to simulate the bioreactor processes, which was extended to include equations for calculating greenhouse gas emissions. It also includes a one-dimensional settling sub-model to simulate the operation of the secondary clarifier and an ADM1-based sub-model to simulate processes of the anaerobic digester. The operation of the primary clarifier is calculated from mass balance, as well as the data related to the treatment of the activated sludge, while the simulation of the operation of the electromechanical equipment, energy consumption and performance evaluation indicators are calculated from equations.

Sensitivity analysis was performed by applying an OAT (Once At a Time) method to investigate the effect of sixty seven (67) stoichiometric and kinetic operating parameters of the model on nineteen (19) variables of interest and control indicators. In particular, the effect of the change of one of the parameters each time, by $\pm 30\%$, on the variables: total and soluble effluent COD, total and ammonium effluent nitrogen, excess sludge after treatment, daily oxygen demand, biogas produced, total energy consumption, recovery of electrical and thermal energy, nitrous oxide emissions in the bioreactor, total nitrogen oxides and greenhouse gas emissions in terms of carbon dioxide and in the indicators: carbon dioxide emissions to COD consumed and nitrogen removed, nitrous oxide emissions to total nitrogen entering the plant, energy consumption to COD consumed and nitrogen removed, discharge quality in pollution terms. The relative sensitivity was calculated from the percentage change in the value of the variable of interest to the percentage change in the value of the parameter, which in the case of this analysis was 30%.

In the context of the sensitivity analysis, scenarios were examined which are categorized into three main categories:

- Steady loading of the system with a solids retention time (SRT) of 10 days
- Steady loading of the system with a solids retention time (SRT) of 4.5 days
- Dynamic loading of the system with a solids retention time (SRT) of 10 days

It is pointed out that for the steady loading conditions the plant received a steady flow rate which was distributed evenly during the hours of the day, while for the dynamic loading it received a variable daily flow rate distributed according to a hydrograph which gives, for each hour, a percentage of the average hourly flow rate.

The main conclusions drawn from the sensitivity analysis are coded as follows:

- For the steady flow rate scenarios, with SRT = 10d, the parameter in which most variables showed significant relative sensitivity and in several cases the maximum relative sensitivity is the heterotrophic biomass yield coefficient, Y_h which determines the organic C fraction leading to the synthesis of microorganisms with respect to the total organic C removed from the system.
- For the steady flow rate scenarios with SRT = 4d, the variables remain sensitive to the changes of the parameter Y_h but due to the inhibition conditions of nitrification the most important parameters are those related to the nitrogenous components of the system.
- The critical process for the results of the treatment procedure is nitrification. The adequacy of the solids retention time to complete or inhibit the process significantly alters the balances and chemical reactions that take place within the activated sludge system.
- The relative sensitivity of the variables and indicators of interest of a WWTP to the stoichiometric and kinetic parameters depends on the operating conditions of the system. The results vary for steady or dynamic loading, as well as between systems operating with longer or shorter solids retention times that do not allow the nitrification process to take place.
- The same sensitivity analysis during dynamic loading conditions gives quite different results between the high, medium and low loading conditions of the system and, in addition, the response of the model itself differs even at the same dynamic loading scenario.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Abstract.....	iii
Περιεχόμενα	v
Ευρετήριο πινάκων.....	xiii
Ευρετήριο σχημάτων.....	xv
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2: Συστήματα προσομοίωσης λειτουργίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.)	3
2.1 Μοντέλα ενεργού ιλύος (Active Sludge Models – ASM)	3
2.1.1 Εισαγωγή	3
2.1.2 Μοντέλο ενεργού ιλύος Νο. 1 (ASM1).....	3
2.1.2.1 Εισαγωγή	3
2.1.2.2 Μεταβλητές μοντέλου	4
2.1.2.3 Διεργασίες μοντέλου	5
2.1.2.4 Στοιχειομετρία και κινητικές μοντέλου	6
2.1.2.5 Υποθέσεις και περιορισμοί μοντέλου.....	7
2.1.3 Μοντέλο ενεργού ιλύος Νο. 2 (ASM2).....	9
2.1.3.1 Εισαγωγή	9
2.1.3.2 Μεταβλητές μοντέλου	9
2.1.3.3 Διεργασίες μοντέλου	11
2.1.3.4 Στοιχειομετρία μοντέλου	13
2.1.3.5 Υποθέσεις και περιορισμοί μοντέλου.....	17
2.1.4 Μοντέλο ενεργού ιλύος Νο. 2d (ASM2d).....	18
2.1.4.1 Εισαγωγή	18
2.1.4.2 Μεταβλητές μοντέλου	19
2.1.4.3 Διεργασίες μοντέλου	20
2.1.4.4 Στοιχειομετρία μοντέλου	21
2.1.4.5 Υποθέσεις και περιορισμοί μοντέλου.....	21
2.1.5 Μοντέλο ενεργού ιλύος Νο. 3 (ASM3).....	25
2.1.5.1 Εισαγωγή	25
2.1.5.2 Σύγκριση μοντέλων ASM1 και ASM3	25
2.1.5.3 Μεταβλητές μοντέλου	26

2.1.5.4	Διεργασίες μοντέλου	26
2.1.5.5	Στοιχειομετρία μοντέλου	27
2.1.5.6	Υποθέσεις και περιορισμοί μοντέλου.....	27
2.2	Μοντέλα ολοκληρωμένης προσομοίωσης ΕΕΛ (Benchmark Simulation Models – BSM)..	33
2.2.1	Εισαγωγή	33
2.2.2	Μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης No. 1 (BSM1)	33
2.2.2.1	Εισαγωγή	33
2.2.2.2	Προσομοιούμενο σύστημα.....	34
2.2.2.2.1	Μοντέλο βιολογικών διεργασιών.....	34
2.2.2.2.2	Βιολογικός αντιδραστήρας	34
2.2.2.2.3	Δεξαμενή τελικής καθίζησης (ΔΤΚ).....	34
2.2.2.3	Διαδικασία προσομοίωσης.....	38
2.2.2.4	Εκτίμηση απόδοσης	38
2.2.2.4.1	Δείκτης ποιότητας εκροής (Effluent Quality Index – EQI)	38
2.2.2.4.2	Παραβιάσεις ορίων εκροής	39
2.2.2.4.3	Ολικό λειτουργικό κόστος (Overall Cost Index – OCI)	39
2.2.3	Μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης No. 1_LT (BSM1_LT)	39
2.2.3.1	ΕισαγωγήΕπειδή η περίοδος αξιολόγησης του BSM1 περιορίζεται σε μία (1) εβδομάδα, χρόνος που σε πολλές περιπτώσεις δεν επαρκεί για την ανάπτυξη φαινομένων, διεργασιών και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής δράσεων ελέγχου μιας εγκατάστασης προτάθηκε το BSM1_LT για να διορθώσει αυτό το μειονέκτημα του μοντέλου.	39
2.2.3.2	Διαφορές BSM1 και BSM1_LT.....	39
2.2.4	Μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης No. 2 (BSM2)	40
2.2.4.1	Εισαγωγή	40
2.2.4.2	Προσομοιούμενο σύστημα.....	41
2.2.4.2.1	Μοντέλο βιολογικών διεργασιών.....	41
2.2.4.2.2	Δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (ΔΠΚ).....	42
2.2.4.2.3	Βιολογικός αντιδραστήρας	42
2.2.4.2.4	Δεξαμενή τελικής καθίζησης (ΔΤΚ).....	42
2.2.4.2.5	Πάχυνση βαρύτητας	42
2.2.4.2.6	Αναερόβια χώνευση	42
2.2.4.2.7	Αφυδάτωση.....	44
2.2.4.2.8	Δεξαμενή αποθήκευσης	44

2.2.4.3	Διαδικασία προσομοίωσης	47
2.2.4.4	Εκτίμηση απόδοσης	47
2.2.4.4.1	Δείκτης ποιότητας εκροής (Effluent Quality Index – EQI)	47
2.2.4.4.2	Παραβιάσεις ορίων εκροής	48
2.2.4.4.3	Ολικό λειτουργικό κόστος (Overall Cost Index – OCI)	48
2.3	Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse Gases Emissions – GHGs).....	48
2.3.1	Εισαγωγή	48
2.3.2	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	49
2.3.3	Μεθάνιο (CH ₄)	49
2.3.4	Υποξείδιο του αζώτου (N ₂ O)	49
2.3.5	Βιολογική απομάκρυνση αζώτου	49
2.3.5.1	Εισαγωγή	49
2.3.5.2	Μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών παραγωγής υποξειδίου του αζώτου (N ₂ O)	52
Κεφάλαιο 3:	Μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) με απομάκρυνση θρεπτικών	56
3.1	Εισαγωγή.....	56
3.2	Μεταβλητές μοντέλου	59
3.3	Πρωτοβάθμια επεξεργασία	62
3.3.1	Εισαγωγή	62
3.3.2	Προσομοίωση δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης (ΔΠΚ).....	62
3.3.2.1	Θέση 32 – έξοδος πρωτοβάθμιας ιλύος	62
3.3.2.2	Θέση 4 – έξοδος πρωτοβάθμιων επεξεργασμένων λυμάτων	63
3.4	Βιολογικός αντιδραστήρας	64
3.4.1	Εισαγωγή	64
3.4.2	Διεργασίες μοντέλου	64
3.4.3	Συντελεστές και παράμετροι του μοντέλου	65
3.4.4	Εξισώσεις ρυθμού των διεργασιών.....	70
3.4.4.1	Ρυθμός αερόβιας υδρόλυσης	71
3.4.4.2	Ρυθμός ανοξικής υδρόλυσης παρουσία νιτρικών (SNO ₃).....	71
3.4.4.3	Ρυθμός ανοξικής υδρόλυσης παρουσία νιτρωδών (SNO ₂).....	71
3.4.4.4	Ρυθμός αναερόβιας υδρόλυσης	72
3.4.4.5	Ρυθμός αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH).....	72
3.4.4.6	Ρυθμός απονιτροποίησης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH).....	72

3.4.4.7	Ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH) – 1 ^η διεργασία: μετατροπή νιτρικών (SNO ₂) σε μονοξείδιο του αζώτου (SNO)	73
3.4.4.8	Ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH) – 2 ^η διεργασία: μετατροπή μονοξειδίου του αζώτου (SNO) σε υποξείδιο του αζώτου (SN ₂ O)	73
3.4.4.9	Ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH) – 3 ^η διεργασία: μετατροπή υποξειδίου του αζώτου (SN ₂ O) σε αέριο άζωτο (SN ₂)	73
3.4.4.10	Ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH)	74
3.4.4.11	Ρυθμός οξείδωσης αμμωνίας (SNH) σε υδροξυλαμίνη (SN ₂ OH)	74
3.4.4.12	Ρυθμός οξείδωσης υδροξυλαμίνης (SN ₂ OH) σε μονοξείδιο του αζώτου (SNO)	74
3.4.4.13	Ρυθμός οξείδωσης μονοξειδίου του αζώτου (SNO) σε νιτρώδη (SNO ₂)	74
3.4.4.14	Ρυθμός αναγωγής μονοξειδίου του αζώτου (SNO) σε υποξείδιο του αζώτου (SN ₂ O)	75
3.4.4.15	Ρυθμός αναγωγής νιτρικών (SNO ₂) σε υποξείδιο του αζώτου (SN ₂ O).....	75
3.4.4.16	Ρυθμός αερόβιας ανάπτυξη νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (XNOB)	75
3.4.4.17	Ρυθμός αποσύνθεσης νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (XAOB)	76
3.4.4.18	Ρυθμός αποσύνθεσης αυτοτροφικών βακτηρίων (XNOB)	76
3.4.5	Εξισώσεις μεταβολής συγκεντρώσεων	76
3.4.5.1	SI: Αδρανής διαλυτή οργανική ύλη.....	76
3.4.5.2	SS: Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη.	76
3.4.5.3	XI : Αδρανής σωματιδιακή οργανική ύλη.	77
3.4.5.4	XS : Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη.	77
3.4.5.5	XBH : Ετεροτροφική βιομάζα.	77
3.4.5.6	XAOB : Αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια.	77
3.4.5.7	XNOB : Νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια.	77
3.4.5.8	SO : Διαλυμένο οξυγόνο.	78
3.4.5.9	SN ₂ : Αέριο άζωτο.	78
3.4.5.10	SNH : Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο.	78
3.4.5.11	SNO : Μονοξείδιο του αζώτου.	78
3.4.5.12	SNO ₂ : Νιτρώδες άζωτο.	79
3.4.5.13	SNO ₃ : Νιτρικό άζωτο.....	79
3.4.5.14	SN ₂ O : Υποξείδιο του αζώτου.	79
3.4.5.15	SNH ₂ OH : Υδροξυλαμίνη.....	79
3.4.5.16	SALK: Αλκαλικότητα.	80

3.4.5.17	ΧΝV : Σωματιδιακές ανόργανες ενώσεις.....	80
3.4.6	Τελικές συγκεντρώσεις μεταβλητών.....	80
3.4.7	Ζήτηση οξυγόνου συστήματος.....	80
3.5	Δεξαμενή τελικής καθίζησης (ΔTK).....	83
3.5.1	Εισαγωγή.....	83
3.5.2	Δείκτες καθιζησιμότητας ιλύος.....	83
3.5.2.1	Δείκτης Sludge Volume Index (SVI).....	84
3.5.2.2	Ταχύτητα ζωνικής καθίζησης.....	84
3.5.3	Εμπειρικές εξισώσεις ταχύτητας καθίζησης.....	85
3.5.4	Προσομοίωση δεξαμενής τελικής καθίζησης (ΔTK).....	85
3.5.4.1	Θέση 14 – Είσοδος ανάμικτου υγρού.....	86
3.5.4.2	Θέση 15 – Επιφανειακό στρώμα.....	86
3.5.4.3	Θέση 16 – Στρώμα τροφοδοσίας.....	86
3.5.4.4	Θέσεις 17-21 – Ενδιάμεσα στρώματα.....	87
3.5.4.5	Θέση 22 – Στρώμα πυθμένα.....	87
3.5.4.6	Θέση 23 – Απομάκρυνση περίσσειας ιλύος.....	87
3.5.4.7	Θέση 24 – Εξωτερική ανακυκλοφορία ιλύος.....	87
3.5.4.8	Θέση 29 – Έξοδος δευτεροβάθμιας επεξεργασμένης εκροής.....	87
3.5.5	Συγκέντρωσεις μεταβλητών σε χρονικό βήμα dt.....	87
3.6	Μονάδα πάχυνσης ιλύος.....	88
3.6.1	Εισαγωγή.....	88
3.6.2	Προσομοίωση πάχυνσης ιλύος.....	88
3.6.2.1	Πάχυνση βαρύτητας πρωτοβάθμιας ιλύος.....	89
3.6.2.1.1	Θέση 32 – Είσοδος πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων.....	89
3.6.2.1.2	Θέση 33 – Έξοδος πρωτοβάθμιας παχυμένης ιλύος.....	89
3.6.2.1.3	Θέση 34 – Έξοδος στραγγιδίων πάχυνσης βαρύτητας.....	90
3.6.2.2	Μηχανική πάχυνση δευτεροβάθμιας ιλύος.....	90
3.6.2.2.1	Θέση 23 – Είσοδος δευτεροβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων.....	91
3.6.2.2.2	Θέση 33 – Έξοδος δευτεροβάθμιας παχυμένης ιλύος.....	91
3.6.2.2.3	Θέση 7 – Έξοδος στραγγιδίων μηχανικής πάχυνσης.....	92
3.6.2.2.4	Απαιτούμενη ποσότητα πολυηλεκτρολύτη για τη μηχανική πάχυνση.....	92
3.7	Μονάδα αναερόβιας χώνευσης.....	92
3.7.1	Εισαγωγή.....	92

3.7.2	Προσομοίωση αναερόβιας χώνευσης ιλύος.....	93
3.7.2.1	Θέση 33 – Είσοδος πρωτοβάθμιας παχυμένης ιλύος	94
3.7.2.2	Θέση 28 – Είσοδος δευτεροβάθμιας παχυμένης ιλύος	94
3.7.2.3	Θέση 35 – Είσοδος μίγματος πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας παχυμένης ιλύος	94
3.7.2.4	Θέση 36 – Έξοδος σταθεροποιημένης ιλύος	95
3.7.2.4.1	Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για $14d \leq HRT \leq 19d$	95
3.7.2.4.2	Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για $19d \leq HRT \leq 25d$	96
3.7.2.4.3	Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για $25d \leq HRT \leq 30d$	97
3.7.2.4.4	Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για $30d \leq HRT \leq 35d$	98
3.7.2.4.5	Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για $HRT > 35d$	99
3.7.3	Αξιοποίηση βιοαερίου.....	100
3.7.4	Απαιτήσεις θέρμανσης και θερμικές απώλειες χωνευτή	101
3.8	Μονάδα αφυδάτωσης ιλύος	101
3.8.1	Εισαγωγή	101
3.8.2	Προσομοίωση αφυδάτωσης ιλύος.....	102
3.8.2.1	Θέση 37 – Είσοδος σταθεροποιημένης ιλύος	102
3.8.2.2	Θέση 40 – Έξοδος αφυδατωμένης ιλύος	102
3.8.2.3	Θέση 38 – Έξοδος στραγγιδίων αφυδάτωσης	103
3.8.2.3.1	Απαιτούμενη ποσότητα πολυηλεκτρολύτη για την μηχανική αφυδάτωση	103
3.9	Στραγγίδια ιλύος.....	103
3.9.1	Προσομοίωση γραμμής στραγγιδίων	104
3.10	Κατανάλωση ενέργειας	104
3.10.1	Συστήματα προεπεξεργασίας	104
3.10.2	Δεξαμενές πρωτοβάθμιας και τελικής καθίζησης	105
3.10.3	Βιολογικός αντιδραστήρας.....	105
3.10.3.1	Σύστημα ανάμιξης.....	105
3.10.3.2	Σύστημα αερισμού	105
3.10.4	Μονάδες πάχυνσης πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος.....	105
3.10.5	Μονάδα αναερόβιας χώνευσης.....	106
3.10.6	Μονάδα αφυδάτωσης ιλύος.....	106
3.10.7	Ενέργεια άντλησης	106
3.11	Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου	107

3.11.1	Εισαγωγή	107
3.11.2	Άμεσες εκπομπές.....	107
3.11.2.1	Εκπομπές βιολογικού αντιδραστήρα.....	107
3.11.2.1.1	Παραγωγή CO ₂ κατά την ανάπτυξη ετεροτροφικής βιομάζας.....	107
3.11.2.1.2	Παραγωγή CO ₂ κατά την απονιτροποίηση	108
3.11.2.1.3	Κατανάλωση CO ₂ κατά την ανάπτυξη αυτοτροφικής βιομάζας.....	108
3.11.2.1.4	Παραγωγή N ₂ O (ισοδύναμο CO ₂)	108
3.11.2.2	Εκπομπές καύσης βιοαερίου	108
3.11.2.3	Εκπομπές κατανάλωσης πολυηλεκτρολύτη	109
3.11.3	Έμμεσες εκπομπές.....	109
3.11.3.1	Εκπομπές καταναλισκόμενης ενέργειας	109
3.11.3.2	Εκπομπές διάθεσης ιλύος	109
3.12	Δείκτες ελέγχου λειτουργίας	110
3.12.1	Δείκτες κατανάλωσης ενέργειας.....	110
3.12.1.1	Απαιτούμενη ενέργεια προς παροχή εισόδου	110
3.12.1.2	Απαιτούμενη ενέργεια προς COD που απομακρύνεται.....	110
3.12.1.3	Απαιτούμενη ενέργεια προς άζωτο που απομακρύνεται	110
3.12.2	Δείκτες αερίων θερμοκηπίου	110
3.12.2.1	Εκπεμπόμενα αέρια θερμοκηπίου σε όρους CO ₂ προς παροχή εισόδου	110
3.12.2.2	Εκπεμπόμενα αέρια θερμοκηπίου προς COD που απομακρύνεται	110
3.12.2.3	Εκπεμπόμενα αέρια θερμοκηπίου προς άζωτο που απομακρύνεται.....	110
3.12.2.4	Εκπεμπόμενο υποξείδιο του αζώτου προς εισερχόμενο άζωτο	111
3.12.3	Δείκτες στραγγιδίων	111
3.12.3.1	Μάζα COD στραγγιδίων προς το ολικό COD ανάντι της ΔΠΚ.....	111
3.12.3.1	Ολικό άζωτο στραγγιδίων προς το ολικό άζωτο ανάντι της ΔΠΚ.....	111
3.12.3.2	Αμμωνιακό άζωτο στραγγιδίων προς το αμμωνιακό άζωτο ανάντι της ΔΠΚ.....	111
3.12.3.1	Ολικά στερεά στραγγιδίων προς τα ολικά στερεά ανάντι της ΔΠΚ.....	111
3.13	Εκτίμηση απόδοσης.....	111
3.13.1	Δείκτης ποιότητας εκροής.....	111
Κεφάλαιο 4:	Εφαρμογές μοντέλου προσομοίωσης και ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων	
λειτουργίας	113
4.1	Προσομοιούμενο σύστημα.....	113
4.2	Λειτουργικές παράμετροι εγκατάστασης.....	113
4.3	Αρχικές συνθήκες.....	114

4.4	Ανάλυση ευαισθησίας	115
4.4.1	Εισαγωγή	115
4.4.2	Μέθοδος ανάλυσης.....	116
4.4.3	Στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι.....	116
4.4.4	Μεταβλητές και δείκτες ελέγχου	122
4.5	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας	122
4.5.1	Εισαγωγή	122
4.5.2	1 ^η σειρά σεναρίων: Σταθερή φόρτιση με SRT=10d.....	123
4.5.2.1	Δεδομένα προσομοίωσης	123
4.5.2.2	Στόχος σεναρίου.....	124
4.5.2.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης	124
4.5.3	2 ^η σειρά σεναρίων: Σταθερή φόρτιση με SRT=4.5d.....	139
4.5.3.1	Δεδομένα προσομοίωσης	139
4.5.3.2	Στόχος σειράς σεναρίων	139
4.5.3.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης	140
4.5.4	3 ^η σειρά σεναρίων: Δυναμική φόρτιση με SRT=10d.....	153
4.5.4.1	Δεδομένα προσομοίωσης	153
4.5.4.2	Στόχος σειράς σεναρίων	155
4.5.4.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης	156
Κεφάλαιο 5:	Συμπεράσματα.....	166
Βιβλιογραφία.....		171
Ελληνικές αναφορές		171
Ξενόγλωσσες αναφορές		172

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2.1 Μεταβλητές μοντέλου ASM1. (Πηγή: Henze et al., 2000).....	5
Πίνακας 2.2 Διεργασίες, κινητικές και στοιχειομετρία μοντέλου ASM1. (Πηγή: Henze et al., 2000)	8
Πίνακας 2.3 Μεταβλητές μοντέλου ASM2. (Πηγή: Henze et al., 2000).....	10
Πίνακας 2.4 Στοιχειομετρία διαλυτών συστατικών μοντέλου ASM2. (Πηγή: Henze et al., 2000)	14
Πίνακας 2.5 Στοιχειομετρία σωματιδιακών συστατικών μοντέλου ASM2. (Πηγή: Henze et al., 2000).....	15
Πίνακας 2.6 Εξισώσεις ρυθμού διεργασιών μοντέλου ASM2. (Πηγή: Henze et al., 2000)	16
Πίνακας 2.7 Μεταβλητές μοντέλου ASM2d. (Πηγή: Henze et al., 2000).....	19
Πίνακας 2.8 Στοιχειομετρία διαλυτών συστατικών μοντέλου ASM2d. (Πηγή: Henze et al., 2000)	22
Πίνακας 2.9 Στοιχειομετρία σωματιδιακών συστατικών μοντέλου ASM2d. (Πηγή: Henze et al., 2000).....	23
Πίνακας 2.10 Εξισώσεις ρυθμού διεργασιών μοντέλου ASM2d. (Πηγή: Henze et al., 2000)	24
Πίνακας 2.11 Μεταβλητές μοντέλου ASM3. (Πηγή: Henze et al., 2000).....	26
Πίνακας 2.12 Στοιχειομετρία μοντέλου ASM3. (Πηγή: Henze et al., 2000).....	29
Πίνακας 2.13 Εξισώσεις ρυθμού διεργασιών μοντέλου ASM3. (Πηγή: Henze et al., 2000)	30
Πίνακας 2.14 Παράμετροι διπλής εκθετικής εξίσωσης που υπολογίζει την ταχύτητα καθίζησης. (Alex et al., 2008).....	36
Πίνακας 2.15 Όρια επεξεργασμένης εκροής μοντέλου BSM1 (Πηγή: Alex et al., 2008).....	39
Πίνακας 2.16 Στοιχειομετρία και ρυθμοί διεργασιών διαλυτών συστατικών ADM1. (Πηγή: Batstone et al., 2002 και Κολλιινιάτης, 2013)	45
Πίνακας 2.17 Στοιχειομετρία και ρυθμοί διεργασιών σωματιδιακών συστατικών ADM1. (Πηγή: Batstone et al., 2002 και Κολλιινιάτης, 2013)	46
Πίνακας 2.18 Στοιχειομετρία μοντέλου χημικής διάσπασης (Πηγή: Pocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)	53
Πίνακας 2.19 Ρυθμοί διεργασιών μοντέλου χημικής διάσπασης (Πηγή: Pocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)	53
Πίνακας 2.20 Στοιχειομετρία μοντέλου νιτροποίησης νιτροποιητών (Πηγή: Pocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)	53
Πίνακας 2.21 Ρυθμοί διεργασιών μοντέλου νιτροποίησης νιτροποιητών (Πηγή: Pocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)	54
Πίνακας 2.22 Στοιχειομετρία μοντέλου απονιτροποίησης νιτροποιητών (Πηγή: Pocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)	54

Πίνακας 2.23 Ρυθμοί διεργασιών μοντέλου απονιτροποίησης νιτροποιητών (Πηγή: Rocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)	54
Πίνακας 2.24 Στοιχειομετρία και ρυθμοί διεργασιών μοντέλου ASMN (Πηγή: Pan et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)	55
Πίνακας 3.1 Μεταβλητές του μοντέλου προσομοίωσης	61
Πίνακας 3.2 Ερμηνεία και τιμές στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων μοντέλου	68
Πίνακας 3.3 Εξισώσεις ρυθμού διεργασιών μοντέλου προσομοίωσης.	82
Πίνακας 3.4 Τιμές των σταθερών V_0 και n , συναρτήσεων των δεικτών SVI, DSVI και SSVI (Πηγή: Μπούκας, 2008; Σαραντόπουλος, 2015; επεξεργασία από Γκόβα, 2017)	85
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά προεπεξεργασμένων λυμάτων πριν την πρωτοβάθμια επεξεργασία.	114
Πίνακας 4.2: Αρχικές συγκεντρώσεις συστατικών σε σημαντικές θέσεις του συστήματος ενεργού λύου.	115
Πίνακας 4.3: Παράμετροι ανάλυσης ευαισθησίας.	116
Πίνακας 4.4: Μεταβλητές και δείκτες ελέγχου ανάλυσης ευαισθησίας.	122
Πίνακας 4.5: Τιμές αναφοράς σεναρίου σταθερής φόρτισης για $SRT=10d$	123
Πίνακας 4.6: Τιμές αναφοράς σεναρίου σταθερής φόρτισης για $SRT=4,5d$	139
Πίνακας 4.7 Υδρογράφημα παροχής εισόδου σεναρίων δυναμικής φόρτισης.	153
Πίνακας 4.8: Τιμές αναφοράς σεναρίου δυναμικής φόρτισης για $SRT=10$	155

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 2.1 Σχηματοποίηση διεργασιών ASM1 (Πηγή: Alex et al., 2008)	6
Σχήμα 2.2 Ροή COD στα ASM1 και ASM3 (Πηγή: Henkel et al., 2000).....	25
Σχήμα 2.2 Γενική διάταξη της ΕΕΛ του BSM1 (Πηγή: Alex et al., 2008).....	34
Σχήμα 2.4 Στρωματοποίηση δεξαμενής τελικής καθίζησης (Πηγή: Takacs et al., 1991).....	35
Σχήμα 2.5 Διάγραμμα ταχύτητας καθίζησης – συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών (Πηγή: Takacs et al., 1991)	36
Σχήμα 2.6 Εξισώσεις υπολογισμού της ροής στερεών στη ΔTK (Πηγή: Takacs et al., 1991).....	37
Σχήμα 2.7 Δομή εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων μοντέλου BSM2 (Πηγή Opens et al., 2010)	41
Σχήμα 2.8 Οι βιοχημικές διεργασίες του αναερόβιου μοντέλου: (1) οξεοπαραγωγή από σάκχαρα, (2) οξεοπαραγωγή από αμινοξέα, (3) οξεοπαραγωγή από λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας, (4) ακετοπαραγωγή από προπιονικό οξύ, (5) ακετοπαραγωγή από βουτυρικό οξύ και βαλερικό οξύ, (6) μεθανοπαραγωγή. (Πηγή: Batstone et al., 2002)	43
Σχήμα 2.9 Τυπική δεξαμενή αναερόβιας χώνευσης (q = παροχή σε $m^3.d^{-1}$, V = όγκος σε m^3 , S = συγκέντρωση διαλυτών συστατικών σε $kg COD.m^{-3}$, X = συγκέντρωση σωματιδιακών συστατικών σε $kg COD.m^{-3}$). (Πηγή: Batstone et al., 2002).	44
Σχήμα 2.10 Παραγωγή N_2O κατά τις διεργασίες απομάκρυνσης του αζώτου (Πηγή: Rocquet, 2015).....	50
Σχήμα 2.11 Παραγωγή N_2O κατά τις διεργασίες απομάκρυνσης του αζώτου (Πηγή: Massara et al., 2017)	50
Σχήμα 2.12 Σχηματική αναπαράσταση των διεργασιών που επιτελούν οι AOB (Πηγή: Rocquet, 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)	51
Σχήμα 2.13 Μοντέλο ASMN (Pan et al., 2015)	55
Σχήμα 3.1 Διάταξη εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων και θέσεις υπολογισμού των μεταβλητών του μοντέλου (Πηγή: Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία).....	58
Σχήμα 3.2 Θέσεις εισόδου και εξόδου, λυμάτων και ιλύος δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης (Πηγή: Σαραντόπουλος,2015 και Koumaki et al., 2017)	62
Σχήμα 3.3 Διακριτοποίηση δεξαμενής τελικής καθίζησης (Πηγή: Σαραντόπουλος,2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία).....	86
Σχήμα 3.4 Θέσεις εισόδου και εξόδου, ιλύος και στραγγιδίων μονάδας πάχυνσης βαρύτητας (Πηγή: Σαραντόπουλος,2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία)	89
Σχήμα 3.5 Θέσεις εισόδου και εξόδου, ιλύος και στραγγιδίων μονάδας μηχανικής πάχυνσης (Πηγή: Σαραντόπουλος,2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία)	91
Σχήμα 3.6 Θέσεις εισόδου και εξόδου της ιλύος στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης (Πηγή: Σαραντόπουλος,2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία).....	94

Σχήμα 3.7 Θέσεις εισόδου και εξόδου, ιλύος και στραγγιδίων μονάδας αφυδάτωσης (Πηγή: Σαραντόπουλος,2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία).....	102
Σχήμα 4.1 Σταθερή ωριαία εισερχόμενη παροχή σεναρίων σταθερής φόρτισης.....	123
Σχήμα 4.2 Ευαισθησία της μεταβλητής COD _{e,tot} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	125
Σχήμα 4.3 Ευαισθησία της μεταβλητής COD _{e,sol} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	126
Σχήμα 4.4 Ευαισθησία της μεταβλητής TN _e στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	127
Σχήμα 4.5 Ευαισθησία της μεταβλητής SN _{He} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος. .	128
Σχήμα 4.6 Ευαισθησία της μεταβλητής W στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	129
Σχήμα 4.7 Ευαισθησία της μεταβλητής SOTR _{tot_d} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	130
Σχήμα 4.8 Ευαισθησία της μεταβλητής BIOGAS στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	131
Σχήμα 4.9 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_EN_consumption στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	132
Σχήμα 4.10 Ευαισθησία της μεταβλητής recon_elec στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	132
Σχήμα 4.11 Ευαισθησία της μεταβλητής recon_therm στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	133
Σχήμα 4.12 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O_bioreact_tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	134
Σχήμα 4.13 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O_tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	134
Σχήμα 4.14 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_GHG_CO2eq στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	135
Σχήμα 4.15 Ευαισθησία του δείκτη kgCO ₂ _kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	135
Σχήμα 4.16 Ευαισθησία του δείκτη kgCO ₂ _kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	136
Σχήμα 4.17 Ευαισθησία του δείκτη kgN2O_kgTN _{in} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	136
Σχήμα 4.18 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	137
Σχήμα 4.19 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος. .	137
Σχήμα 4.20 Ευαισθησία του δείκτη EQI στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	138

Σχήμα 4.21 Ευαισθησία της μεταβλητής CODE,tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	140
Σχήμα 4.22 Ευαισθησία της μεταβλητής CODE,sol στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	141
Σχήμα 4.23 Ευαισθησία της μεταβλητής TNe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος..	142
Σχήμα 4.24 Ευαισθησία της μεταβλητής SNHe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	143
Σχήμα 4.25 Ευαισθησία της μεταβλητής W στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.....	143
Σχήμα 4.26 Ευαισθησία της μεταβλητής SOTR_tot_d στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	144
Σχήμα 4.27 Ευαισθησία της μεταβλητής BIOGAS στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	145
Σχήμα 4.28 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_EN_consumption στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	146
Σχήμα 4.29 Ευαισθησία της μεταβλητής recon_elec στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	147
Σχήμα 4.30 Ευαισθησία της μεταβλητής recon_therm στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	148
Σχήμα 4.31 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O_bioreact_tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	148
Σχήμα 4.32 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O_tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	149
Σχήμα 4.33 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_GHG_CO2eq στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	149
Σχήμα 4.34 Ευαισθησία του δείκτη Total_GHG_CO2eq στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	150
Σχήμα 4.35 Ευαισθησία του δείκτη kgCO2_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	150
Σχήμα 4.36 Ευαισθησία του δείκτη kgN2O_kgTNin στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	151
Σχήμα 4.37 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	152
Σχήμα 4.38 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος..	152
Σχήμα 4.39 Ευαισθησία του δείκτη EQI στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	153
Σχήμα 4.40 Υδρογράφημα παροχής εισόδου σεναρίων δυναμικής φόρτισης.	154
Σχήμα 4.41 Μεταβαλλόμενη παροχή εισόδου σεναρίων δυναμικής φόρτισης.	155
Σχήμα 4.42 Ευαισθησία της μεταβλητής CODE,tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	156

Σχήμα 4.43 Ευαισθησία της μεταβλητής CODE _{sol} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	157
Σχήμα 4.44 Ευαισθησία της μεταβλητής TNe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος...	157
Σχήμα 4.45 Ευαισθησία της μεταβλητής SNHe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	158
Σχήμα 4.46 Ευαισθησία της μεταβλητής w στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	159
Σχήμα 4.47 Ευαισθησία της μεταβλητής SOTR _{tot_d} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	159
Σχήμα 4.48 Ευαισθησία της μεταβλητής BIOGAS στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	160
Σχήμα 4.49 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_EN_consumption στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	161
Σχήμα 4.50 Ευαισθησία της μεταβλητής recon _{therm} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	161
Σχήμα 4.51 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O _{bioreact_tot} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	162
Σχήμα 4.52 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O _{tot} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	162
Σχήμα 4.53 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_GHG_CO2 _{eq} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	162
Σχήμα 4.54 Ευαισθησία του δείκτη kgCO ₂ _kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	163
Σχήμα 4.55 Ευαισθησία του δείκτη kgCO ₂ _kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	163
Σχήμα 4.56 Ευαισθησία του δείκτη kgN2O_kgTN _{in} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	163
Σχήμα 4.57 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	164
Σχήμα 4.58 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος..	164
Σχήμα 4.59 Ευαισθησία του δείκτη EQI στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.	165

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Κάθε εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων είναι ένα πολύπλοκο μη γραμμικό σύστημα, αποτελούμενο από πολλές υπομονάδες, οι οποίες πρέπει να συλλειτουργήσουν αρμονικά για την επίτευξη ενός κοινού αποτελέσματος. Ταυτόχρονα, οι εισερχόμενες παροχές και τα φορτία παρουσιάζουν έντονη μεταβλητότητα στο χρόνο, κατά τρόπο που τόσο η ίδια η σύσταση, όσο και οι μάζες των συστατικών των λυμάτων που καλείται μια εγκατάσταση να επεξεργαστεί και να διαχειριστεί, είναι ασταθείς και αβέβαιες. Παρόλα αυτά το αποτέλεσμα της επεξεργασίας πρέπει να είναι σταθερό και οι επεξεργασμένες ροές να ανταποκρίνονται στα όρια της νομοθεσίας πληρώνοντας τα χαρακτηριστικά ποιότητας που προβλέπονται.

Πέραν της ανάγκης συμμόρφωσης με τα προβλεπόμενα από τη νομοθεσία κριτήρια, μια εγκατάσταση μπορεί να επιτελέσει πολλαπλούς σκοπούς, η επίτευξη των οποίων στηρίζεται στην ανάπτυξη και εφαρμογή προτύπων λειτουργίας και καινοτόμων στρατηγικών ελέγχου. Η εφαρμογή στην πράξη εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης και η εκτίμηση της απόδοσής τους καθίσταται δύσκολη, γεγονός που οδήγησε στη δημιουργία και εξέλιξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας ενός ολοκληρωμένου μοντέλου μαθηματικής προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Ακολουθεί η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας:

Στο κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχθηκε η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου το οποίο εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία. Αρχικά παρουσιάζονται τα σημαντικότερα μοντέλα ενεργού ιλύος, ακολουθούν τα μοντέλα ολοκληρωμένης προσομοίωσης εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, στη συνέχεια μοντέλα καθίζησης, μοντέλα αναερόβιας χώνευσης και κλείνει το κεφάλαιο με τη θεωρία εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται λεπτομερώς το μαθηματικό μοντέλο που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας της εγκατάστασης. Για κάθε υποσύστημα της εγκατάστασης γίνεται αναλυτική περιγραφή του ρόλου του μέσα στο σύστημα επεξεργασίας, των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό και παρατίθενται οι μαθηματικές εξισώσεις με τις οποίες προσομοιώνεται η λειτουργία του, για τον υπολογισμό των μεταβλητών του μοντέλου κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, σε κάθε θέση ενδιαφέροντος. Επιπλέον, παρατίθενται οι μαθηματικές σχέσεις με τις οποίες υπολογίζονται η απαίτηση οξυγόνου, το παραγόμενο βιοαέριο, η κατανάλωση ενέργειας, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και οι δείκτες ελέγχου λειτουργίας και εκτίμησης της απόδοσης της εγκατάστασης.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για τις στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους της λειτουργίας του συστήματος ενεργού ιλύος. Αρχικά, για κάθε σειρά σεναρίων, παρατίθενται το σενάριο αναφοράς, με το οποίο συγκρίνονται τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων και εκτιμάται η ευαισθησία επιλεγμένων μεταβλητών και δεικτών λειτουργίας της εγκατάστασης ως προς την ευαισθησία τους στη μεταβολή των στοιχειομετρικών και λειτουργικών παραμέτρων. Ακολουθεί ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων κάθε σειράς σεναρίων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω εφαρμογών, και διατυπώνονται τα συμπεράσματα. Η εργασία κλείνει με προτάσεις περαιτέρω εμβάθυνσης στο θέμα.

Κεφάλαιο 2: Συστήματα προσομοίωσης λειτουργίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.)

2.1 Μοντέλα ενεργού ιλύος (Active Sludge Models – ASM)

2.1.1 Εισαγωγή

Μπορεί η μαθηματική προσομοίωση των διεργασιών ενός συστήματος ενεργού ιλύος να αποτελεί σήμερα συνήθη διαδικασία κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, πριν από 40 χρόνια όμως, ήταν εξαιρετικά περιορισμένη λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της μειωμένης εμπιστοσύνης στα πολύπλοκα μοντέλα που υπήρχαν. Έτσι, το 1982 η Διεθνής Ένωση για την Έρευνα και τον Έλεγχο της Ρύπανσης των Υδάτων (International Association on Water Pollution Research and Control - IAWPRC) συγκρότησε Ομάδα Εργασίας με σκοπό την ανάπτυξη ενός κοινού κώδικα, ο οποίος έπρεπε να είναι απλός, ώστε να αποτελέσει τη βάση για τη μελλοντική ανάπτυξη των μοντέλων απομάκρυνσης αζώτου.

Το 1987 δημοσιεύθηκε το Μοντέλο Ενεργού Ιλύος No. 1 (ASM1) (Henze et al., 1987) που περιλάμβανε, μεταξύ άλλων, οδηγίες για το χαρακτηρισμό των λυμάτων, κώδικα για τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου, που η εφαρμογή τους οδηγούσε σε ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Το 1995 δημοσιεύθηκε το Μοντέλο Ενεργού Ιλύος No. 2 (ASM1) (Henze et al., 1995) ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης εφαρμογής της βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου που περιλάμβανε τις εξισώσεις για τη βιολογική και χημική απομάκρυνσή του.

Στη συνέχεια, το 1999 το ASM2 βελτιώθηκε με τη δημοσίευση του Μοντέλου Ενεργού Ιλύος No. 2d (ASM2d) (Henze et al., 2000) στο οποίο συνυπολογιζόταν ο ρόλος της απονιτροποίησης των πολυφωσφορικών βακτηρίων κατά τη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου.

Τέλος, το 1999 αναπτύχθηκε το Μοντέλο Ενεργού Ιλύος No. 3 (ASM3) (Gujer et al., 1999) το οποίο βασίστηκε στις τελευταίες επιστημονικές γνώσεις σχετικά με τη λειτουργία των συστημάτων αυτών, όπως για παράδειγμα το ρόλο των αποθηκευμένων χημικών ενώσεων στο μεταβολισμό της βιομάζας και την προσομοίωση της ενδογενούς αναπνοής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα τέσσερα (4) Μοντέλα Ενεργού Ιλύος.

2.1.2 Μοντέλο ενεργού ιλύος No. 1 (ASM1)

2.1.2.1 Εισαγωγή

Είναι γεγονός ότι το ASM1 έχει επεκταθεί και τροποποιηθεί από την αρχική παρουσίασή του, ως αποτέλεσμα των πλούσιων πειραματικών δεδομένων που υπάρχουν, έτσι ώστε να περιλαμβάνει περισσότερα κλάσματα του COD και να περιγράφει περισσότερες διεργασίες που

λαμβάνουν χώρα μέσα σε ένα σύστημα ενεργού ιλύος, εντούτοις εξακολουθεί το αρχικό μοντέλο να είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο για την προσομοίωση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων σε παγκόσμια κλίμακα.

Έως σήμερα έχει αποδειχθεί ότι η συγκέντρωση της διαλυμένης βιοδιασπάσιμης τροφής στην έξοδο της εγκατάστασης λίγο διαφοροποιείται μεταξύ των συστημάτων επεξεργασίας, καθώς οι περισσότερες εγκαταστάσεις λειτουργούν με μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών και χαμηλές ταχυότητες ανάπτυξης. Οι διαφορές παρατηρούνται στη συγκέντρωση της ενεργού ιλύος και στην απαίτηση για αποδέκτη ηλεκτρονίων κάτι που τέθηκε στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος κατά το σχεδιασμό του μοντέλου. Επομένως, κύριος στόχος υπήρξε η πρόβλεψη της συγκέντρωσης της ενεργού ιλύος, κατά την ανάπτυξη της στοιχειομετρίας του μοντέλου, και η εκτίμηση της απαίτησης για αποδέκτη ηλεκτρονίων κατά την ανάπτυξη των ρυθμών έκφρασης των διεργασιών.

Επισημαίνεται ότι για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των διεργασιών χρησιμοποιήθηκαν 'διακόπτες' που λαμβάνουν τιμές μεταξύ του μηδέν (0) και του (1), ώστε να αποτυπωθεί η εξάρτηση των κινητικών από τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

2.1.2.2 Μεταβλητές μοντέλου

Οι μεταβλητές του ASM1 κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα διαλυτά ή εύκολα διασπάσιμα συστατικά (S) και τα σωματιδιακά ή δύσκολα-αργά διασπάσιμα (X).

Συνολικά, η οργανική ύλη υποδιαιρείται σε βιοδιασπάσιμο COD, μη βιοδιασπάσιμο COD και βιομάζα. Το βιοδιασπάσιμο COD διαιρείται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (S_s), η οποία αποτελείται από απλά διαλυτά μόρια που απορροφούν και μεταβολίζουν άμεσα οι οργανισμοί, και δύσκολα-αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (X_s), η οποία αποτελείται από σωματιδιακά-κολλοειδή-σύνθετα οργανικά μόρια που προσροφούν οι οργανισμοί στην επιφάνειά τους και τα διασπούν μέσω ενζύμων πριν τα απορροφήσουν. Το μη βιοδιασπάσιμο COD διαιρείται σε διαλυτή (S_i) και σωματιδιακή οργανική ύλη (X_i) και καμία εκ των δύο μορφών του δεν συμμετέχει στις βιολογικές διεργασίες του συστήματος.

Η βιομάζα χωρίζεται σε ετεροτροφικούς (X_{BH}) και αυτοτροφικούς μικροοργανισμούς (X_{BA}), ενώ το μοντέλο περιλαμβάνει και μεταβλητή για τα αδρανή προϊόντα που προκύπτουν απ' την αποσύνθεση/λύση της βιομάζας (X_p).

Στο ASM1 δεν υπολογίζεται το διαλυτό μη βιοδιασπάσιμο τμήμα της αζωτούχας ύλης, ενώ το μη βιοδιασπάσιμο σωματιδιακό τμήμα συσχετίζεται με το αντίστοιχο μη βιοδιασπάσιμο σωματιδιακό COD. Η βιοδιασπάσιμη αζωτούχα ύλη διακρίνεται σε αμμωνιακό άζωτο (S_{NH}), διαλυμένο οργανικό άζωτο (S_{ND}) και σωματιδιακό οργανικό άζωτο (X_{ND}). Το σωματιδιακό οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνιακό κατά τη διεργασία της αμμωνιοποίησης και το αμμωνιακό άζωτο μετατρέπεται σε νιτρικό (S_{NO}) κατά τη διεργασία της νιτροποίησης.

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις μεταβλητές του μοντέλου ASM1.

Πίνακας 2.1 Μεταβλητές μοντέλου ASM1. (Πηγή: Henze et al., 2000)

α/α	Συστατικά i	Ερμηνεία
1	S_i	Αδρανής Διαλυμένη Οργανική Ύλη
2	S_s	Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη
3	X_i	Αδρανής Σωματιδιακή Οργανική Ύλη
4	X_s	Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη
5	X_{BH}	Ετεροτροφική Βιομάζα
6	X_{BA}	Αυτοτροφική Βιομάζα
7	X_p	Σωματιδιακά Αδρανή Προϊόντα Αποσύνθεσης Βιομάζας
8	S_o	Διαλυμένο Οξυγόνο
9	S_{NO}	Διαλυμένο Νιτρικό Άζωτο
10	S_{NH}	Διαλυμένο Αμμωνιακό Άζωτο
11	S_{ND}	Διαλυμένο Οργανικό Άζωτο
12	X_{ND}	Σωματιδιακό Βιοδιασπάσιμο Οργανικό Άζωτο
13	S_{ALK}	Αλκαλικότητα

2.1.2.3 Διεργασίες μοντέλου

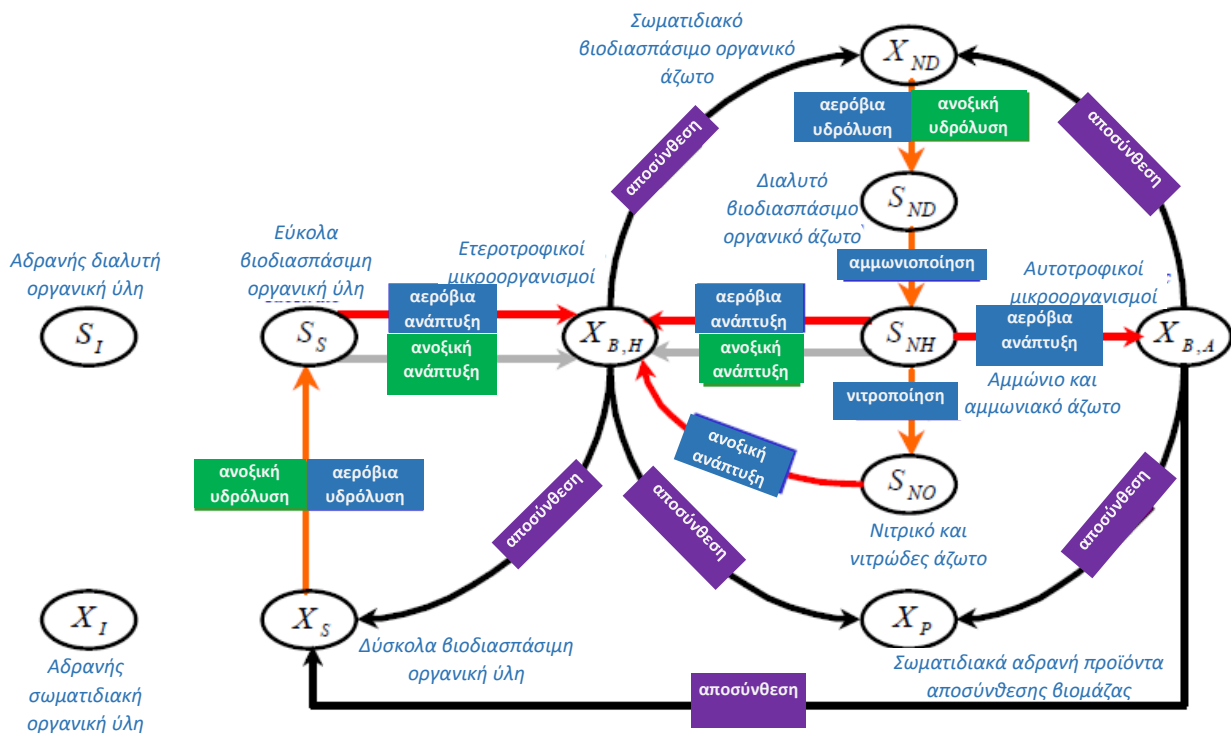
Το μοντέλο περιγράφεται αδρά από τέσσερις (4) διεργασίες: την ανάπτυξη και αποσύνθεση της βιομάζας, την αμμωνιοποίηση του οργανικού αζώτου μετά τη λύση του κυττάρου και την υδρόλυση των σωματιδιακών οργανικών που παγιδεύονται στη βιοκροκίδα.

Αναλυτικά οι διεργασίες του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

1. Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικής βιομάζας: ενεργοποιείται με την κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (S_s) και οδηγεί στην παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας (X_{BH}). Η ταχύτητα των κινητικών εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις του S_s και του διαλυμένου οξυγόνου (S_o).
2. Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικής βιομάζας: ενεργοποιείται με την κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (S_s) και του νιτρικού αζώτου (S_{NO}) και οδηγεί στην παραγωγή ετεροτροφικής βιομάζας (X_{BH}). Η ταχύτητα των κινητικών εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των S_s και S_{NO} ενώ η παρουσία του διαλυμένου οξυγόνου (S_o) αναστέλλει τη διεργασία .
3. Αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικής βιομάζας: ενεργοποιείται με την κατανάλωση αμμωνιακού αζώτου (S_{NH}) και οδηγεί στην παραγωγή αυτοτροφικής βιομάζας (X_{BA}). Οι κινητικές καθορίζονται από τις συγκεντρώσεις του S_{NH} και του διαλυμένου οξυγόνου (S_o), ενώ το pH των λυμάτων επηρεάζει τη διεργασία.
4. Αποσύνθεση ετεροτροφικής βιομάζας: η λύση του κυττάρου των ετερότροφων μικροοργανισμών (X_{BH}) παράγει βιοδιασπάσιμα (X_s) και αδρανή (X_i) σωματιδιακά προϊόντα.
5. Αποσύνθεση αυτοτροφικής βιομάζας: η φθορά των αυτότροφων μικροοργανισμών παράγει βιοδιασπάσιμα (X_s) και αδρανή (X_i) και σωματιδιακά προϊόντα.

6. Αμμωνιοποίηση διαλυμένου οργανικού αζώτου (S_{ND}): η διεργασία πραγματοποιείται παράλληλα με την αποσύνθεση της βιομάζας.
7. Υδρόλυση αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης: καταναλώνεται η αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (X_S) και παράγεται η εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (S_S), η μορφή της οποίας επιτρέπει την απορρόφησή της εντός του κυττάρου των μικροοργανισμών για την πραγματοποίηση αντιδράσεων.
8. Υδρόλυση παγιδευμένου οργανικού αζώτου: καταναλώνεται το σωματιδιακό οργανικό άζωτο (X_{ND}) και παράγεται αμμωνιακό άζωτο (S_{NH}).

Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει τις μεταβλητές και διεργασίες του ASM1.



Σχήμα 2.1 Σχηματοποίηση διεργασιών ASM1 (Πηγή: Alex et al., 2008)

2.1.2.4 Στοιχειομετρία και κινητικές μοντέλου

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι διεργασίες, οι κινητικές και η στοιχειομετρία του μοντέλου. Ο δείκτης i εκφράζει το συστατικό και ο δείκτης j τη διεργασία. Το ρ_j αντιστοιχεί στο ρυθμό των διεργασιών και το ν_{ij} τις σχέσεις μαζών ανάμεσα στα συστατικά στις αντίστοιχες διεργασίες.

Η βασική εξίσωση ισορροπίας της μάζας που εφαρμόζεται στους υπολογισμούς είναι η ακόλουθη:

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

Από το άθροισμα των γινομένων των στοιχειομετρικών συντελεστών v_{ij} και των εκφράσεων των ρυθμών των διεργασιών ρ_j για κάθε συστατικό i υπολογίζεται ο όρος της αντίδρασης r_i που προστίθεται στη συνέχεια στην εξίσωση ισορροπίας μάζας.

Η ακόλουθη εξίσωση δίνει τον υπολογισμό του όρου της αντίδρασης r_i :

$$r_i = \sum V_{ij} \cdot \rho_j$$

(Πηγή: Henze et al., 2000)

2.1.2.5 Υποθέσεις και περιορισμοί μοντέλου

Η εφαρμογή του μοντέλου στηρίζεται στις παρακάτω υποθέσεις:

- Το σύστημα λειτουργεί υπό σταθερή θερμοκρασία. Με εξίσωση υπολογίζονται ενδεχόμενες μεταβολές της θερμοκρασίας μέσα σε συγκεκριμένο εύρος τιμών.
- Το pH είναι σταθερό, κοντά στο ουδέτερο. Η μεταβλητή της αλκαλικότητας προσομοιώνει ενδεχόμενες μεταβολές του pH και την επίδρασή τους.
- Οι συντελεστές στις εξισώσεις ρυθμού των διεργασιών έχουν σταθερές τιμές και οι μεταβολές στα χαρακτηριστικά των λυμάτων δεν μπορούν να αποτυπωθούν στο μοντέλο.
- Η επίδραση του περιορισμού των θρεπτικών συστατικών στην απομάκρυνση της οργανικής ύλης και την κυτταρική σύνθεση δεν συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο και, κατά συνέπεια, η παρουσία ικανής ποσότητας ανόργανων συστατικών για τη σύνθεση βιομάζας πρέπει να ελέγχεται.
- Οι διορθωτικοί συντελεστές της απονιτροποίησης είναι σταθεροί για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων και στις τιμές του συνυπολογίζουν τις ανασταλτικές επιδράσεις των χαρακτηριστικών στην επεξεργασία.
- Η ετεροτροφική βιομάζα είναι ομοιογενής, δεν μεταβάλλεται στο χρόνο, άρα δεν επηρεάζει με κάποιο τρόπο την καθιζησιμότητα της λύσης.
- Η παγίδευση της σωματιδιακής οργανικής ύλης εντός της βιομάζας συμβαίνει στιγμιαία.
- Η υδρόλυση της οργανικής ύλης και του οργανικού αζώτου συμβαίνουν στιγμιαία, συνδυαστικά και με τον ίδιο ρυθμό.
- Το είδος του αποδέκτη ηλεκτρονίων δεν επηρεάζει τη διεργασία της φθοράς βιομάζας.

Πίνακας 2.2 Διεργασίες, κινητικές και στοιχειομετρία μοντέλου ASM1. (Πηγή: Henze et al., 2000)

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

2.1.3 Μοντέλο ενεργού ιλύος No. 2 (ASM2)

2.1.3.1 Εισαγωγή

Το ASM2 αποτελεί επέκταση του ASM1, στηρίζεται στις αρχικές εξισώσεις αλλά περιγράφει περισσότερες μεταβλητές και βιολογικές διεργασίες για τον υπολογισμό της βιολογικής απομάκρυνσης οργανικού άνθρακα και αζώτου και τη βιολογική και χημική απομάκρυνση φωσφόρου. Η τελευταία περιγράφεται ως κατακρήμνιση από δύο (2) χημικές διεργασίες.

Η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντέλων είναι στην περιγραφή της βιομάζας. Συγκεκριμένα το ASM2 αποτυπώνει την εσωτερική δομή των κυττάρων των μικροοργανισμών καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση περισσότερων από μία (1) μεταβλητών για την περιγραφή της συγκέντρωσης της ίδιας βιομάζας.

Άλλη σημαντική διαφορά των δύο μοντέλων είναι ότι το ASM1 είναι στημένο κατά τρόπο που υπολογίζει τη σωματιδιακή οργανική ύλη όσο και τη συγκέντρωση της βιομάζας με όρους COD, ενώ το ASM2 περιλαμβάνει τα πολυ-φωσφορικά, ένα κλάσμα της ενεργούς ιλύος το οποίο δεν μπορεί υπολογιστεί σε όρους COD και η ενσωμάτωσή του στο μοντέλο απαιτεί την χρήση του όρου των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS). Σε μονάδες TSS συμμετέχουν στους υπολογισμούς τα ανόργανα στερεά που περιλαμβάνονται στα εισερχόμενα λύματα της ΕΕΛ και υπολογίζονται εκείνα τα οποία παράγονται από τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου.

2.1.3.2 Μεταβλητές μοντέλου

Οι μεταβλητές του ASM2 κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα διαλυτά ή εύκολα διασπάσιμα συστατικά (S) και τα σωματιδιακά ή δύσκολα-αργά διασπάσιμα (X).

Η οργανική ύλη υποδιαιρείται σε βιοδιασπάσιμο COD, μη βιοδιασπάσιμο COD και βιομάζα.

Το βιοδιασπάσιμο COD περιλαμβάνει τα διαλυτά προϊόντα αναερόβιας ζύμωσης (S_A) και τη διαλυτή ζυμώσιμη οργανική ύλη (S_F), το άθροισμα των οποίων ισούται με τη διαλυτή οργανική ύλη (S_S) του ASM1 και τη δύσκολα-αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (X_S), η οποία απαιτεί προσρόφηση από τους μικροοργανισμούς ώστε να διασπαστεί μέσω ενζύμων πριν την απορρόφησή της στο εσωτερικό του κυττάρου. Το μη βιοδιασπάσιμο COD διαιρείται σε διαλυτή (S_i) και σωματιδιακή οργανική ύλη (X_i).

Η βιομάζα διακρίνεται σε ετεροτροφικούς (X_H), αυτοτροφικούς (X_{AUT}) μικροοργανισμούς και πολυ-φωσφορικά βακτήρια (X_{PAO}). Τα τελευταία έχουν εσωτερική αποθηκευτική ικανότητα στο κύτταρό τους, που περιγράφεται δύο νέες μεταβλητές, τα πολύ-υδροξυ-αλκανοϊκά (X_{PHA}), σε όρους COD, και τα πολυ-φωσφορικά (X_{PP}), σε όρους φωσφόρου.

Το ASM2 δεν περιλαμβάνει μεταβλητή για το σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο αλλά θεωρείται ότι το X_S και το S_F περιλαμβάνουν σταθερά κλάσματα αζώτου και φωσφόρου. Η βιοδιασπάσιμη αζωτούχα ύλη περιλαμβάνει το αμμωνιακό άζωτο (S_{NH4}), το διαλυμένο νιτρικό άζωτο (S_{NO3}) και το διαλυμένο αέριο άζωτο (X_{N2}).

Για την περιγραφή της βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου χρησιμοποιείται η μεταβλητή του ανόργανου διαλυτού φωσφόρου (S_{PO4}), που υπολογίζει τα ορθο-φωσφορικά, ενώ για τη χημική απομάκρυνσή του χρησιμοποιούνται δύο (2) νέες μεταβλητές, για το υδροξείδιο μετάλλου (X_{MeOH}) που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση και το φωσφορικό μέταλλο (X_{MeP}) που είναι προϊόν της αντίδρασης.

Οι μεταβλητές του ASM2 παρατίθενται τον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 Μεταβλητές μοντέλου ASM2. (Πηγή: Henze et al., 2000)

α/α	Συστατικά i	Ερμηνεία
1	S_{O2}	Διαλυμένο Οξυγόνο
2	S_F	Διαλυτή Ζυμώσιμη Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη
3	S_A	Διαλυτά Βιοδιασπάσιμα Προϊόντα Αναερόβιας Ζύμωσης (Οξικό Άλας)
4	S_{NH4}	Διαλυμένο Αμμωνιακό Άζωτο
5	S_{NO3}	Διαλυμένο Νιτρικό Άζωτο
6	S_{PO4}	Ανόργανος Διαλυτός Φώσφορος (Ορθοφωσφορικά)
7	S_I	Αδρανής Διαλυμένη Οργανική Ύλη
8	S_{ALK}	Αλκαλικότητα
9	S_{N2}	Διαλυμένο Αέριο Άζωτο
10	X_I	Αδρανής Σωματιδιακή Οργανική Ύλη
11	X_S	Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη
12	X_H	Ετεροτροφική Βιομάζα
13	X_{PAO}	Πολυ-φωσφορικοί Μικροοργανισμοί
14	X_{PP}	Εσωκυτταρικά Προϊόντα Αποθήκευσης των Πολυ-φωσφορικών Μικροοργανισμών (Πολυ-φωσφορικά)
15	X_{PHA}	Εσωκυτταρικά Προϊόντα Αποθήκευσης των Πολυ-φωσφορικών Μικροοργανισμών (Πολυ-υδροξυ-αλκανοϊκά)
16	X_{AUT}	Αυτοτροφική Βιομάζα (Νιτροποιητές)

17	X_{TSS}	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά
18	X_{MeOH}	Υδροξείδιο Μετάλλου
19	X_{MeP}	Φωσφορικό Μέταλλο

2.1.3.3 Διεργασίες μοντέλου

Το μοντέλο ASM2 περιγράφει δεκαεννέα (19) διεργασίες που χωρίζονται σε πέντε (5) βασικές κατηγορίες:

1. Διεργασίες υδρόλυσης: η υδρόλυση καταλύεται μέσω της δράσης ενζύμων κατά την προσρόφηση στην επιφάνεια του κυττάρου της βιομάζας, με αποτέλεσμα να καταναλώνεται η μεγάλη μοριακού βάρους, κολλοειδής ή σωματιδιακή οργανική ύλη (S_F) από τους μικροοργανισμούς. Τρεις (3) εξισώσεις περιγράφουν τις διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος στις οποίες λαμβάνει χώρα η συγκεκριμένη διεργασία και διαφοροποιείται, κάθε φορά, ο αποδέκτης ηλεκτρονίων.

- Διεργασία 1 – αερόβια υδρόλυση: πραγματοποιείται σε αερόβιες συνθήκες ($S_{O_2} > 0$).
- Διεργασία 2 – ανοξική υδρόλυση: πραγματοποιείται σε ανοξικές συνθήκες ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} > 0$) με ταχύτητα αντίδρασης μικρότερη από εκείνη των αερόβιων συνθηκών.
- Διεργασία 3 – αναερόβια υδρόλυση: πραγματοποιείται σε αναερόβιες συνθήκες ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} \approx 0$) με ταχύτητα αντίδρασης μικρότερη από την ταχύτητα της αερόβιας υδρόλυσης.

Με την υδρόλυση, η αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (X_S) καταναλώνεται και παράγονται διαλυτή βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (S_F) και ένα μικρό κλάσμα (f_{Si}) αδρανούς διαλυτής οργανικής ύλης (S_i).

Οι στοιχειομετρικοί συντελεστές για το αμμωνιακό άζωτο (S_{NH_4}), το φωσφορικό (S_{PO_4}) και την αλκαλικότητα (S_{ALK}) υπολογίζονται από την εξίσωση συνέχειας.

2. Διεργασίες ετεροτροφικών μικροοργανισμών:

- Διεργασίες 4 & 5 – αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_H) από κατανάλωση διαλυτών βιοδιασπάσιμων προϊόντων αναερόβιας ζύμωσης (S_A) και διαλυτής βιοδιασπάσιμης ζυμώσιμης οργανικής ύλης (S_F): οι διεργασίες κινούνται παράλληλα, παρουσία οξυγόνου (S_{O_2}), θρεπτικών συστατικών (S_{NH_4} , S_{PO_4}), αλκαλικότητας (S_{ALK}). Παράγονται μικροοργανισμοί σε όρους αιωρούμενων στερεών (X_{TSS}).
- Διεργασίες 6 & 7 – ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_H) από κατανάλωση διαλυτών βιοδιασπάσιμων προϊόντων αναερόβιας ζύμωσης (S_A) και διαλυτής βιοδιασπάσιμης ζυμώσιμης οργανικής ύλης (S_F): απονιτροποίηση: πρόκειται για δύο (2) διεργασίες που λαμβάνουν χώρα παρουσία νιτρικών (S_{NO_3}), τα οποία απονιτροποιούνται και παράγεται αέριο άζωτο (S_{N_2}) και αλκαλικότητα (S_{ALK}). Η διεργασία δεν πραγματοποιείται παρουσία οξυγόνου.

- Διεργασία 8 – ζύμωση: πραγματοποιείται σε αναερόβιες συνθήκες, δηλαδή απουσία οξυγόνου και νιτρικών ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} \approx 0$), όπου καταναλώνεται διαλυτή ζυμώσιμη βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (S_F) και παράγονται διαλυτά βιοδιασπάσιμα προϊόντα (S_A).
 - Διεργασία 9 – λύση ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_H): ο ρυθμός της διεργασίας είναι σταθερός και δεν σχετίζεται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες.
3. Διεργασίες πολυ-φωσφορικών βακτηρίων (PAO): γίνεται η θεώρηση ότι η συγκεκριμένη βιομάζα δεν απονιτροποιεί και συντίθεται μόνο από την οργανική ύλη που αποθηκεύεται στο εσωτερικό του κυττάρου (X_{PHA}).
- Διεργασία 10 – αποθήκευση X_{PHA} : τα PAO καταναλώνουν πολυ-φωσφορικά (X_{PP}) που έχουν αποθηκευμένα στο κύτταρό τους και παράγουν φωσφορικά (S_{PO_4}). Η παραγόμενη ενέργεια από τη διεργασία καταναλώνεται για την αποθήκευση των διαλυτών βιοδιασπάσιμων προϊόντων αναερόβιας ζύμωσης (S_A) σε μορφή X_{PHA} .
 - Διεργασία 11 – αποθήκευση πολυ-φωσφορικών (X_{PP}): η αποθήκευση των ορθο-φωσφορικών (S_{PO_4}) στη μορφή των πολύ-φωσφορικών (X_{PP}) εντός του κυττάρου απαιτεί απ' τους PAO ενέργεια που μπορεί να αποκτηθεί απ' την κατανάλωση των X_{PHA} . Η αναγέννηση των πολύ-φωσφορικών είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των PAO, καθώς η οργανική ύλη S_A αποθηκεύεται μόνο κατά την απελευθέρωση πολύ-φωσφορικών. Η αποθήκευση των X_{PP} εντός των PAO αναστέλλεται όταν αυξηθεί πολύ η συγκέντρωση φωσφόρου στο εσωτερικό των κυττάρων του.
 - Διεργασία 12 – ανάπτυξη των πολυ-φωσφορικών βακτηρίων (PAO): πραγματοποιείται μόνο εις βάρος του εσωτερικά αποθηκευμένου X_{PHA} . Καθώς ο φώσφορος απελευθερώνεται συνεχώς από τη λύση των πολύ-φωσφορικών (X_{PP}), οι PAO καταναλώνουν ορθο-φωσφορικά (S_{PO_4}) ως θρεπτικό συστατικό για την παραγωγή βιομάζας. Η διεργασία πραγματοποιείται αυστηρά υπό αερόβιες συνθήκες.
 - Διεργασίες 13, 14 & 15 – λύση των πολύ-φωσφορικών βακτηρίων (X_{PAO}) και των προϊόντων αποθήκευσής τους (X_{PHA} , X_{PP}): τα κλάσματα των PAO υπόκεινται σε ξεχωριστές διεργασίες φθοράς και χάνονται με τη λύση του κυττάρου.
4. Διεργασίες νιτροποίησης: καταναλώνεται αμμωνιακό άζωτο (S_{NH_4}) και παράγεται νιτρικό άζωτο (S_{NO_3}) σε μία διεργασία.
- Διεργασία 16 – ανάπτυξη αυτοτροφικών μικροοργανισμών (X_{AUT}): σε αερόβιο περιβάλλον καταναλώνεται αμμωνιακό άζωτο (S_{NH_4}) ως θρεπτικό συστατικό και παράγονται νιτρικά (S_{NO_3}) κατά τη σύνθεση της αυτοτροφικής βιομάζας.
 - Διεργασία 17 – λύση αυτοτροφικών μικροοργανισμών: περιγράφεται αντίστοιχα με τη λύση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Από τα προϊόντα της λύσης (X_S το οποίο υδρολύεται σε S_F) αναπτύσσονται οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί και, κατά συνέπεια, η ενδογενής αναπνοή των αυτοτροφικών αυξάνει την ανάπτυξη και την κατανάλωση οξυγόνου των ετεροτροφικών.
5. Διεργασίες χημικής κατακρήμνισης φωσφόρου: η παρουσία μετάλλων στα λύματα και η υψηλή συγκέντρωση διαλυτών ορθο-φωσφορικών (S_{PO_4}) προκαλεί τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου. Η διεργασία ενισχύεται από την προσθήκη άλατος

σιδήρου και σε συνδυασμό με τη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή αιωρούμενων στερεών (X_{TSS}) και η κατανάλωση αλκαλικότητας.

- Διεργασίες 18 & 19 – κατακρήμνιση και επαναδιάλυση ορθο-φωσφορικών (S_{PO_4}): οι δύο (2) διεργασίες κινούνται αντίστροφα και σε σταθερές συνθήκες βρίσκονται σε ισορροπία. Τα X_{MEOH} και X_{MEP} περιγράφουν το υδροξείδιο του σιδήρου ($Fe(OH)_3$) και το φωσφορικό σίδηρος ($FePO_4$) αντίστοιχα.

2.1.3.4 Στοιχειομετρία μοντέλου

Στους Πίνακες 2.4, 2.5 και 2.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η στοιχειομετρία του μοντέλου για τα διαλυτά και τα σωματιδιακά συστατικά και οι ρυθμοί των διεργασιών του μοντέλου αντίστοιχα. Ο δείκτης i εκφράζει το συστατικό και ο δείκτης j τη διεργασία. Το ρ_j αντιστοιχεί στο ρυθμό των διεργασιών και το v_{ij} τις σχέσεις μαζών ανάμεσα στα συστατικά στις αντίστοιχες διεργασίες.

Η βασική εξίσωση ισορροπίας της μάζας που εφαρμόζεται στους υπολογισμούς είναι η ακόλουθη:

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

Από το άθροισμα των γινομένων των στοιχειομετρικών συντελεστών v_{ij} και των εκφράσεων των ρυθμών των διεργασιών ρ_j για κάθε συστατικό i υπολογίζεται ο όρος της αντίδρασης r_i που προστίθεται στη συνέχεια στην εξίσωση ισορροπίας μάζας.

Η ακόλουθη εξίσωση δίνει τον υπολογισμό του όρου της αντίδρασης r_i :

$$r_i = \sum V_{ij} \cdot \rho_j$$

(Πηγή: Henze et al., 2000)

Πίνακας 2.4 Στοιχειομετρία διαλυτών συστατικών μοντέλου ASM2. (Πηγή: Henze et al., 2000)

Στοιχειομετρικός πίνακας για διαλυτά συστατικά									
Μεταβλητές i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Διεργασίες j	S_{O_2}	S_F	S_A	S_{NH_4}	S_{NO_3}	S_{PO_4}	S_I	S_{ALK}	S_{N_2}
Υδρόλυση									
1. Αερόβια υδρόλυση		$1 - f_{S_I}$		v_{1,NH_4}		v_{1,PO_4}	f_{S_I}	$v_{1,ALK}$	
2. Ανοξική υδρόλυση		$1 - f_{S_I}$		v_{2,NH_4}		v_{2,PO_4}	f_{S_I}	$v_{2,ALK}$	
3. Αναερόβια υδρόλυση		$1 - f_{S_I}$		v_{3,NH_4}		v_{3,PO_4}	f_{S_I}	$v_{3,ALK}$	
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί: X_H									
4. Αερόβια ανάπτυξη με S_F	$1 - \frac{1}{Y_H}$	$-\frac{1}{Y_H}$							
5. Αερόβια ανάπτυξη με S_A	$1 - \frac{1}{Y_H}$		$-\frac{1}{Y_H}$						
6. Ανοξική ανάπτυξη με S_F - απονιτροποίηση		$-\frac{1}{Y_H}$			$-\frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$				$\frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$
7. Ανοξική ανάπτυξη με S_A - απονιτροποίηση			$-\frac{1}{Y_H}$		$-\frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$				$\frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$
8. Αναερόβια ζύμωση		-1	1						
9. Λύση									
Πολυ-φωσφορικά βακτήρια (PAO): X_{PAO}									
10. Αποθήκευση των X_{PHA}			-1			Y_{PO_4}			
11. Αποθήκευση των X_{PP}	$-Y_{PHA}$					-1			
12. Αερόβια ανάπτυξη	$1 - \frac{1}{Y_{PAO}}$					$-i_{PBM}$			
13. Λύση των X_{PAO}						v_{13,PO_4}			
14. Λύση των X_{PP}						1			
15. Λύση των X_{PHA}			1						
Νιτροποιητές (αυτοτροφικοί οργανισμοί): X_{AUT}									
16. Αερόβια ανάπτυξη	$-\frac{4,57 - Y_A}{Y_A}$			$-i_{NBM} - \frac{1}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{PBM}$			
17. Λύση				v_{17,NH_4}		v_{17,PO_4}			
Χημική κατακρήμνιση φωσφόρου με υδροξείδιο του σιδήρου ($Fe(OH)_3$):									
18. Κατακρήμνιση						-1		$v_{18,ALK}$	
19. Επαναδιάλυση						1		$v_{19,ALK}$	

Πίνακας 2.5 Στοιχειομετρία σωματιδιακών συστατικών μοντέλου ASM2. (Πηγή: Henze et al., 2000)

Στοιχειομετρικός πίνακας για σωματιδιακά συστατικά										
Μεταβλητές i	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Διεργασίες j	X_I	X_S	X_H	X_{PAO}	X_{PP}	X_{PHA}	X_{AUT}	X_{TSS}	X_{MeOH}	X_{MeP}
Υδρόλυση										
1. Αερόβια υδρόλυση		-1						$V_{1,TSS}$		
2. Ανοξική υδρόλυση		-1						$V_{2,TSS}$		
3. Αναερόβια υδρόλυση		-1						$V_{3,TSS}$		
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί: X_H										
4. Αερόβια ανάπτυξη με S_F			1							
5. Αερόβια ανάπτυξη με S_A			1							
6. Ανοξική ανάπτυξη με S_F - απονιτροποίηση			1							
7. Ανοξική ανάπτυξη με S_A - απονιτροποίηση			1							
8. Αναερόβια ζύμωση			1							
9. Λύση	f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$	-1							
Πολυ-φωσφορικά βακτήρια (PAO): X_{PAO}										
10. Αποθήκευση των X_{PHA}					$-Y_{PO_4}$	1				
11. Αποθήκευση των X_{PP}					1	$-Y_{PHA}$				
12. Αερόβια ανάπτυξη				1		$-\frac{1}{Y_H}$				
13. Λύση των X_{PAO}	f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$	-1							
14. Λύση των X_{PP}					-1					
15. Λύση των X_{PHA}						-1				
Νιτροποιητές (αυτοτροφικοί οργανισμοί): X_{AUT}										
16. Αερόβια ανάπτυξη							1			
17. Λύση	f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$					-1			
Χημική κατακρήμνιση φωσφόρου με υδροξείδιο του σιδήρου ($Fe(OH)_3$):										
18. Κατακρήμνιση								1,42	-3,45	4,87
19. Επαναδιάλυση								-1,42	3,45	-4,87

Πίνακας 2.6 Εξισώσεις ρυθμού διεργασιών μοντέλου ASM2. (Πηγή: Henze et al., 2000)

Διεργασίες j	Εξίσωση ρυθμού ρ
Υδρόλυση	
1. Αερόβια υδρόλυση	$K_h \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
2. Ανοξική υδρόλυση	$K_h \cdot n_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
3. Αναερόβια υδρόλυση	$K_h \cdot n_{fe} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί: X_H	
4. Αερόβια ανάπτυξη με S_F	$\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_F}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
5. Αερόβια ανάπτυξη με S_A	$\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_A}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
6. Ανοξική ανάπτυξη με S_F - απονιτροποίηση	$\mu_H \cdot n_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_F}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot X_H$
7. Ανοξική ανάπτυξη με S_A - απονιτροποίηση	$\mu_H \cdot n_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_A}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot X_H$
8. Αναερόβια ζύμωση	$q_{fe} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
9. Λύση	$b_H \cdot X_H$
Πολυ-φωσφορικά βακτήρια (PAO): X_{PAO}	
10. Αποθήκευση των X_{PHA}	$q_{PHA} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP} + X_{PP}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
11. Αποθήκευση των X_{PP}	$q_{PP} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} \cdot \frac{K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}}{K_{IPP} + K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
12. Αερόβια ανάπτυξη	$\mu_{PAO} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
13. Λύση των X_{PAO}	$b_{PAO} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{PAO}$
14. Λύση των X_{PP}	$b_{PP} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{PP}$
15. Λύση των X_{PHA}	$b_{PHA} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{PHA}$
Νιτροποιητές (αυτοτροφικοί οργανισμοί): X_{AUT}	
16. Αερόβια ανάπτυξη	$\mu_{AUT} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AUT}$
17. Λύση	$b_{AUT} \cdot X_{AUT}$
Χημική κατακρήμνιση φωσφόρου με υδροξείδιο του σιδήρου ($Fe(OH)_3$):	
18. Κατακρήμνιση	$k_{PRE} \cdot S_{PO_4} \cdot X_{MeOH}$
19. Επαναδιάλυση	$k_{RED} \cdot X_{MeP} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$

2.1.3.5 Υποθέσεις και περιορισμοί μοντέλου

Οι υποθέσεις και οι περιορισμοί του ASM1 ισχύουν γενικά και για το ASM2. Πιο εξειδικευμένα, συγκεκριμένες υποθέσεις του ASM1 έχουν επεκταθεί έτσι ώστε να εφαρμόζονται και στη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου. Επιπλέον, η παρουσία των μεταβλητών για τα πολυ-φωσφορικά βακτήρια (PAO) διαφοροποιεί και επεκτείνει τις παραδοχές που έγιναν για το μοντέλο. Συγκεντρωτικά όλες οι υποθέσεις του μοντέλου παρατίθενται παρακάτω:

- Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί και τα πολυ-φωσφορικά βακτήρια είναι ομοιογενείς πληθυσμοί με χαρακτηριστικά σταθερά στο χρόνο, άρα οι κινητικές τους περιλαμβάνουν σταθερές παραμέτρους.
- Η υδρόλυση της οργανικής ύλης, του οργανικού αζώτου και του οργανικού φωσφόρου που πραγματοποιούνται παράλληλα και στιγμιαία.
- Οι PAO προσλαμβάνουν μόνο διαλυτά προϊόντα αναερόβιας ζύμωσης (S_A), όπως το οξικό άλας, ενώ οι άλλοι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί προσλαμβάνουν τόσο ζυμώσιμη οργανική ύλη (S_F) όσο και διαλυτά προϊόντα αναερόβιας ζύμωσης (S_A).
- Οι PAO αναπτύσσονται σε αερόβιες συνθήκες χρησιμοποιώντας τα αποθηκευμένα PHA αποκλειστικά και όχι απευθείας τα S_A , παρά το γεγονός ότι προσλαμβάνουν S_A σε αερόβιες συνθήκες απελευθερώνοντας φωσφορικά, αλλά δεν τα χρησιμοποιούν για την ανάπτυξή τους. Συνεπώς στις αερόβιες συνθήκες υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των PAO και των άλλων ετεροτροφικών ως προς την κατανάλωση S_A , με αποτέλεσμα την επικράτηση των δεύτερων λόγω υψηλότερων ρυθμών ανάπτυξης σε αυτό το περιβάλλον.
- Οι PAO δεν απονιτροποιούν, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται οι εξής συσχετισμοί μέσα στο σύστημα:
 - Αναερόβια δεξαμενή: υπάρχουν τρεις (3) μηχανισμοί με τους οποίους η είσοδος νιτρικού αζώτου (NO_3-N) μειώνει την ικανότητα απομάκρυνσης φωσφόρου:
 1. Ο ανταγωνισμός μεταξύ των PAO και των ετεροτροφικών μικροοργανισμών που απονιτροποιούν, για κατανάλωση S_A έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη αποθήκευση της συγκεκριμένης μεταβλητής ως PHA απ' τους PAO.
 2. Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί που απονιτροποιούν δεν πραγματοποιούν ζύμωση των S_F σε S_A με αποτέλεσμα η μειωμένη διαθεσιμότητα των τελευταίων να οδηγεί σε μειωμένη πρόσληψη τους απ' τους PAO και αποθήκευση τους ως PHA.
 3. Αφού ένα κλάσμα των PAO απονιτροποιεί σε πραγματικές συνθήκες, η διαθεσιμότητα νιτρικών τους στερεί την ανάγκη να καταναλώσουν πολυ-φωσφορικά για την παραγωγή ενέργειας, συνθήκη που δεν αποτυπώνεται με κάποιο τρόπο, εξίσωση ή παράμετρο, στο μοντέλο.
 - Ανοξική δεξαμενή: η υπόθεση ότι οι PAO δεν απονιτροποιούν σημαίνει ότι η ανοξική δεξαμενή είναι αναερόβια για τους PAO με αποτέλεσμα να απελευθερώνουν φώσφορο.
- Επειδή τα πολυ-υδροξυ-αλκανοϊκά (PHA) αποτελούν τη μορφή της οργανικής ύλης που αποθηκεύουν οι PAO στα κύτταρά τους, σε αναερόβιες συνθήκες, η ενέργεια που

απαιτείται για τη σύνθεσή των ΡΗΑ είναι μειωμένη (Mino et al., 1987; Satoh et al., 1992), σχετικά με τις άλλες μορφές οργανικής ύλης.

- Δεν λαμβάνεται υπόψη κλάσμα βιομάζας που να αποθηκεύει ΡΗΑ χωρίς την παράλληλη απελευθέρωση φωσφορικών.
- Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί, όπως έχει συνταχθεί το εν λόγω μοντέλο, αναπτύσσονται σε αερόβιες συνθήκες, απονιτροποιούν σε ανοξικές συνθήκες και κάνουν ζύμωση σε αναερόβιες συνθήκες, διεργασίες που δεν ανταποκρίνονται πάντα στις τυπικές που αναμένονται σε πραγματικές συνθήκες.
- Η συνεχής παρουσία θρεπτικών συστατικών δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένη, καθώς το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό τους, ούτε τους μηχανισμούς περιορισμού την ανάπτυξης σε συνθήκες στέρησης. Η ανάπτυξη της βιομάζας με κινητική Monod απαιτεί την επάρκεια θρεπτικών, συνθήκη η οποία θα πρέπει να εξασφαλίζεται κάθε φορά.
- Τα κλάσματα της οργανικής ύλης S_A , S_F και X_S αποτυπώνονται ως ομογενή με σταθερά χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτός ο υπολογισμός διεργασιών που λαμβάνουν χώρα όταν εισέρχονται μη τυπικά αστικά λύματα σε ένα σύστημα ενεργού ιλύος. Μάλιστα, το ίδιο το μοντέλο έχει σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των αστικών οικιακών λυμάτων και δεν εφαρμόζεται σε λύματα που περιέχουν σημαντικές ποσότητες βιομηχανικών αποβλήτων.
- Δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της μειωμένης συγκέντρωσης καλίου (K) και μαγνησίου (Mg) στη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου.
- Δεν λαμβάνεται υπόψη η ανασταλτική επίδραση της παρουσίας του μονοξειδίου του αζώτου (NO) και των νιτρωδών (NO_2^-) στη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου.
- Οι φυσική διεργασία της καθίζησης δεν προσομοιώνεται με κάποιο τρόπο.
- Το pH των λυμάτων πρέπει να είναι σχεδόν ουδέτερο, μεταξύ 6.3 και 7.8.
- Η θερμοκρασία των λυμάτων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25°C λόγω έλλειψης επαρκών γνώσεων για τη συμπεριφορά των πολυφωσφορικών βακτηρίων εκτός αυτού του εύρους.

2.1.4 Μοντέλο ενεργού ιλύος No. 2d (ASM2d)

2.1.4.1 Εισαγωγή

Το Μοντέλο Ενεργού Ιλύος No. 2d αποτελεί βελτίωση του ASM2 (Henze et al., 1995) και του ASM1 (Henze et al., 1987). Ήδη από τη δημοσίευση του ASM2 ήταν γνωστό (Mino et al., 1995, Meinhold et al., 1999, Kerrn-Jespersen and Henze, 1993) ότι οι ΡΑΟ περιλαμβάνουν δύο κατηγορίες μικροοργανισμών, όπου η μία έχει τη δυνατότητα απονιτροποίησης. Είχε, λοιπόν, διαφανεί η ανάγκη επέκτασης του ASM2 και ανάπτυξης του ASM2d. Το ASM2d κάλυψε το κενό στην ανάπτυξη των ΡΑΟ με τη διατύπωση δύο (2) επιπρόσθετων διεργασιών για να προσομοιωθεί η χρησιμοποίηση εσωκυτταρικών προϊόντων αποθήκευσης για την απονιτροποίηση. Άρα οι ΡΑΟ αναπτύσσονται υπό αερόβιες και υπό ανοξικές συνθήκες.

Πέραν της διαφοράς στα χαρακτηριστικά των ΡΑΟ, το ASM2d είναι πανομοιότυπο με το ASM2d.

2.1.4.2 Μεταβλητές μοντέλου

Οι μεταβλητές του ASM2sd παρατίθενται στον πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7 Μεταβλητές μοντέλου ASM2d. (Πηγή: Henze et al., 2000)

α/α	Συστατικά i	Ερμηνεία
1	S _{O2}	Διαλυμένο Οξυγόνο
2	S _F	Διαλυτά Βιοδιασπάσιμα Προϊόντα Αναερόβιας Ζύμωσης
3	S _A	Διαλυτή Ζυμώσιμη Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη (Οξικό Άλας)
4	S _{NH4}	Διαλυμένο Αμμωνιακό Άζωτο
5	S _{N03}	Διαλυμένο Νιτρικό Άζωτο
6	S _{P04}	Ανόργανος Διαλυτός Φώσφορος (Ορθοφωσφορικά)
7	S _I	Αδρανής Διαλυμένη Οργανική Ύλη
8	S _{ALK}	Αλκαλικότητα
9	S _{N2}	Διαλυμένο Αέριο Άζωτο
10	X _I	Αδρανής Σωματιδιακή Οργανική Ύλη
11	X _S	Αργά Βιοδιασπάσιμη Οργανική Ύλη
12	X _H	Ετεροτροφική Βιομάζα
13	X _{PAO}	Πολυ-φωσφορικοί Μικροοργανισμοί
14	X _{PP}	Εσωκυτταρικά Προϊόντα Αποθήκευσης των Πολυ-φωσφορικών Μικροοργανισμών (Πολυ-φωσφορικά)
15	X _{PHA}	Εσωκυτταρικά Προϊόντα Αποθήκευσης των Πολυ-φωσφορικών Μικροοργανισμών (Πολυ-υδροξυ-αλκανοϊκά)
16	X _{AUT}	Αυτοτροφική Βιομάζα (Νιτροποιητές)
17	X _{TSS}	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά
18	X _{MeOH}	Υδροξείδια Μετάλλων

19	X_{MeP}	Φωσφορικά Μέταλλα
----	-----------	-------------------

2.1.4.3 Διεργασίες μοντέλου

Το μοντέλο ASM2d περιγράφει πέντε (5) κατηγορίες διεργασιών, συνολικά είκοσι μία (21), εκ των οποίων οι δεκαεννέα (19) είναι ίδιες με τις διεργασίες του ASM2:

1. Διεργασίες υδρόλυσης:
 - Διεργασία 1 – αερόβια υδρόλυση.
 - Διεργασία 2 – ανοξική υδρόλυση.
 - Διεργασία 3 – αναερόβια υδρόλυση.
2. Διεργασίες ετεροτροφικών μικροοργανισμών:
 - Διεργασίες 4 & 5 – αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_H).
 - Διεργασίες 6 & 7 – ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_H).
 - Διεργασία 8 – ζύμωση.
 - Διεργασία 9 – λύση ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_H).
3. Διεργασίες πολυ-φωσφορικών βακτηρίων (PAO): οι PAO αναπτύσσονται τόσο σε αερόβιες ($S_{O_2} > 0$) όσο και σε ανοξικές συνθήκες ($S_{O_2} \approx 0, S_{NO_3} > 0$) αλλά σε κάθε περίπτωση μόνο από την οργανική ύλη που αποθηκεύουν στο εσωτερικό του κυττάρου τους (X_{PHA}).
 - Διεργασία 10 – αποθήκευση X_{PHA} : τα PAO απελευθερώνουν φωσφορικά (S_{PO_4}) από πολυ-φωσφορικά (X_{PP}) που έχουν αποθηκευμένα μέσα στο κύτταρό τους και αξιοποιούν την ενέργεια από την υδρόλυση των X_{PP} για την αποθήκευση των διαλυτών βιοδιασπάσιμων προϊόντων αναερόβιας ζύμωσης (S_A) σε μορφή X_{PHA} . Η διεργασία πραγματοποιείται καλύτερα σε αναερόβιες συνθήκες αλλά δεν σταματάει πλήρως σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες.
 - Διεργασίες 11 & 12 – αερόβια και ανοξική αποθήκευση πολυ-φωσφορικών (X_{PP}): η αποθήκευση των ορθο-φωσφορικών (S_{PO_4}) στη μορφή των πολύ-φωσφορικών (X_{PP}) εντός του κυττάρου απαιτεί απ' τους PAO ενέργεια που μπορεί να αποκτηθεί απ' την κατανάλωση των X_{PHA} . Η αναγέννηση των πολύ-φωσφορικών είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των PAO, καθώς η οργανική ύλη S_A αποθηκεύεται μόνο κατά την απελευθέρωση πολύ-φωσφορικών. Η αποθήκευση των X_{PP} στα κύτταρα των PAO αναστέλλεται όταν αυξηθεί πολύ η συγκέντρωση φωσφόρου. Σε ανοξικές συνθήκες η διεργασία πραγματοποιείται αλλά με μικρότερη ταχύτητα λόγω απονιτροποίησης μέρους και όχι όλης της βιομάζας αλλά και λόγω συνθηκών περιβάλλοντος.
 - Διεργασίες 13 & 14 – αερόβια και ανοξική ανάπτυξη των πολυ-φωσφορικών βακτηρίων (PAO): πραγματοποιείται μόνο εις βάρος του εσωτερικά αποθηκευμένου X_{PHA} . Καθώς ο φώσφορος απελευθερώνεται συνεχώς από τη λύση των πολύ-φωσφορικών (X_{PP}), οι PAO καταναλώνουν ορθο-φωσφορικά (S_{PO_4}) ως θρεπτικό συστατικό για την παραγωγή βιομάζας. Σε ανοξικές συνθήκες η διεργασία πραγματοποιείται αλλά με μικρότερη ταχύτητα λόγω απονιτροποίησης μέρους και όχι όλης της βιομάζας αλλά και λόγω συνθηκών περιβάλλοντος.

- Διεργασίες 15, 16 & 17 – λύση των πολύ-φωσφορικών βακτηρίων (X_{PAO}) και των προϊόντων αποθήκευσής τους (X_{PHA} , X_{PP}).
4. Διεργασίες νιτροποίησης:
- Διεργασία 18 – ανάπτυξη αυτοτροφικών μικροοργανισμών (X_{AUT}).
 - Διεργασία 19 – λύση αυτοτροφικών μικροοργανισμών.
5. Διεργασίες χημικής κατακρήμνισης φωσφόρου:
- Διεργασίες 20 & 21 – κατακρήμνιση και επαναδιάλυση ορθο-φωσφορικών (S_{PO4}).

2.1.4.4 Στοιχειομετρία μοντέλου

Στους Πίνακες 2.8, 2.9 και 2.10 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η στοιχειομετρία του μοντέλου για τα διαλυτά και τα σωματιδιακά συστατικά και οι ρυθμοί των διεργασιών του μοντέλου αντίστοιχα. Ο δείκτης i εκφράζει το συστατικό και ο δείκτης j τη διεργασία. Το ρ_j αντιστοιχεί στο ρυθμό των διεργασιών και το v_{ij} τις σχέσεις μαζών ανάμεσα στα συστατικά στις αντίστοιχες διεργασίες.

Η βασική εξίσωση ισορροπίας της μάζας που εφαρμόζεται στους υπολογισμούς είναι η ακόλουθη:

Εφαρμόζεται η βασική εξίσωση ισορροπίας της μάζας:

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

Από το άθροισμα των γινομένων των στοιχειομετρικών συντελεστών v_{ij} και των εκφράσεων των ρυθμών των διεργασιών ρ_j για κάθε συστατικό i υπολογίζεται ο όρος της αντίδρασης r_i που προστίθεται στη συνέχεια στην εξίσωση ισορροπίας μάζας.

Η ακόλουθη εξίσωση δίνει τον υπολογισμό του όρου της αντίδρασης r_i :

$$r_i = \sum V_{ij} \cdot \rho_j$$

(Πηγή: Henze et al., 2000)

2.1.4.5 Υποθέσεις και περιορισμοί μοντέλου

Στη συνέχεια παρατίθενται οι υποθέσεις και περιορισμοί του μοντέλου ASM2d:

- Το μοντέλο εφαρμόζεται μόνο για αστικά λύματα.
- Το pH των λυμάτων πρέπει να είναι σχεδόν ουδέτερο.
- Η θερμοκρασία των λυμάτων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25°C.
- Τα λύματα πρέπει να είναι πλούσια σε κάλιο και μαγνήσιο.
- Το μοντέλο δεν μπορεί να περιγράψει τις διεργασίες που οφείλονται σε αυξημένη εισροή S_A στη δεξαμενή αερισμού.

Πίνακας 2.8 Στοιχειομετρία διαλυτών συστατικών μοντέλου ASM2d. (Πηγή: Henze et al., 2000)

Στοιχειομετρικός πίνακας για διαλυτά συστατικά									
Μεταβλητές i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Διεργασίες j	S_{O_2}	S_F	S_A	S_{NH_4}	S_{NO_3}	S_{PO_4}	S_I	S_{ALK}	S_{N_2}
Υδρόλυση									
1. Αερόβια υδρόλυση		$1 - f_{S_I}$		v_{1,NH_4}		v_{1,PO_4}	f_{S_I}	$v_{1,ALK}$	
2. Ανοξική υδρόλυση		$1 - f_{S_I}$		v_{2,NH_4}		v_{2,PO_4}	f_{S_I}	$v_{2,ALK}$	
3. Αναερόβια υδρόλυση		$1 - f_{S_I}$		v_{3,NH_4}		v_{3,PO_4}	f_{S_I}	$v_{3,ALK}$	
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί: X_H									
4. Αερόβια ανάπτυξη με S_F	$1 - \frac{1}{Y_H}$	$-\frac{1}{Y_H}$							
5. Αερόβια ανάπτυξη με S_A	$1 - \frac{1}{Y_H}$		$-\frac{1}{Y_H}$						
6. Ανοξική ανάπτυξη με S_F - απονιτροποίηση		$-\frac{1}{Y_H}$			$-\frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$				$\frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$
7. Ανοξική ανάπτυξη με S_A - απονιτροποίηση			$-\frac{1}{Y_H}$		$-\frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$				$\frac{1 - Y_H}{2,86 \cdot Y_H}$
8. Αναερόβια ζύμωση		-1	1						
9. Λύση									
Πολυ-φωσφορικά βακτήρια (PAO): X_{PAO}									
10. Αποθήκευση των X_{PHA}			-1			Y_{PO_4}			
11. Αποθήκευση των X_{PP}	$-Y_{PHA}$					-1			
12. Αερόβια ανάπτυξη	$1 - \frac{1}{Y_{PAO}}$					$-i_{PBM}$			
13. Λύση των X_{PAO}						v_{13,PO_4}			
14. Λύση των X_{PP}						1			
15. Λύση των X_{PHA}			1						
Νιτροποιητές (αυτοτροφικοί οργανισμοί): X_{AUT}									
16. Αερόβια ανάπτυξη	$-\frac{4,57 - Y_A}{Y_A}$			$-i_{NBM} - \frac{1}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{PBM}$			
17. Λύση				v_{17,NH_4}		v_{17,PO_4}			
Χημική κατακρήμνιση φωσφόρου με υδροξείδιο του σιδήρου ($Fe(OH)_3$):									
18. Κατακρήμνιση						-1		$v_{18,ALK}$	
19. Επαναδιάλυση						1		$v_{19,ALK}$	

Πίνακας 2.9 Στοιχειομετρία σωματιδιακών συστατικών μοντέλου ASM2d. (Πηγή: Henze et al., 2000)

Στοιχειομετρικός πίνακας για σωματιδιακά συστατικά										
Μεταβλητές i	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Διεργασίες j	X_I	X_S	X_H	X_{PAO}	X_{PP}	X_{PHA}	X_{AUT}	X_{TSS}	X_{MeOH}	X_{MeP}
Υδρόλυση										
1. Αερόβια υδρόλυση		-1						$V_{1,TSS}$		
2. Ανοξική υδρόλυση		-1						$V_{2,TSS}$		
3. Αναερόβια υδρόλυση		-1						$V_{3,TSS}$		
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί: X_H										
4. Αερόβια ανάπτυξη με S_F			1							
5. Αερόβια ανάπτυξη με S_A			1							
6. Ανοξική ανάπτυξη με S_F - απονιτροποίηση			1							
7. Ανοξική ανάπτυξη με S_A - απονιτροποίηση			1							
8. Αναερόβια ζύμωση			1							
9. Λύση	f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$	-1							
Πολυ-φωσφορικά βακτήρια (PAO): X_{PAO}										
10. Αποθήκευση των X_{PHA}					$-Y_{PO_4}$	1				
11. Αποθήκευση των X_{PP}					1	$-Y_{PHA}$				
12. Αερόβια ανάπτυξη				1		$-\frac{1}{Y_{PAO}}$				
13. Λύση των X_{PAO}	f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$	-1							
14. Λύση των X_{PP}					-1					
15. Λύση των X_{PHA}						-1				
Νιτροποιητές (αυτοτροφικοί οργανισμοί): X_{AUT}										
16. Αερόβια ανάπτυξη							1			
17. Λύση	f_{X_I}	$1 - f_{X_I}$					-1			
Χημική κατακρήμνιση φωσφόρου με υδροξείδιο του σιδήρου ($Fe(OH)_3$):										
18. Κατακρήμνιση								1,42	-3,45	4,87
19. Επαναδιάλυση								-1,42	3,45	-4,87

Πίνακας 2.10 Εξισώσεις ρυθμού διεργασιών μοντέλου ASM2d. (Πηγή: Henze et al., 2000)

Διεργασίες j	Εξίσωση ρυθμού ρ
Υδρόλυση	
1. Αερόβια υδρόλυση	$K_h \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
2. Ανοξική υδρόλυση	$K_h \cdot n_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
3. Αναερόβια υδρόλυση	$K_h \cdot n_{fe} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί: X_H	
4. Αερόβια ανάπτυξη με S_F	$\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_F}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
5. Αερόβια ανάπτυξη με S_A	$\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_A}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
6. Ανοξική ανάπτυξη με S_F - απονιτροποίηση	$\mu_H \cdot n_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_F}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
7. Ανοξική ανάπτυξη με S_A - απονιτροποίηση	$\mu_H \cdot n_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_A}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
8. Αναερόβια ζύμωση	$q_{fe} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$
9. Λύση	$b_H \cdot X_H$
Πολυ-φωσφορικά βακτήρια (PAO): X_{PAO}	
10. Αποθήκευση των X_{PHA}	$q_{PHA} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP} + X_{PP}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
11. Αερόβια αποθήκευση των X_{PP}	$q_{PP} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_{PS} + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} \cdot \frac{K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP} + K_{MAX} - X_{PP}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
12. Ανοξική αποθήκευση των X_{PP}	$\rho_{12} = \rho_{11} \cdot n_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}}$
13. Αερόβια ανάπτυξη	$\mu_{PAO} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$
14. Ανοξική ανάπτυξη	$\rho_{14} = \rho_{13} \cdot n_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}}$
15. Λύση των X_{PAO}	$b_{PAO} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{PAO}$
16. Λύση των X_{PP}	$b_{PP} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{PP}$
17. Λύση των X_{PHA}	$b_{PHA} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{PHA}$
Νιτροποιητές (αυτοτροφικοί οργανισμοί): X_{AUT}	
18. Αερόβια ανάπτυξη	$\mu_{AUT} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AUT}$
19. Λύση	$b_{AUT} \cdot X_{AUT}$
Χημική κατακρήμνιση φωσφόρου με υδροξείδιο του σιδήρου ($Fe(OH)_3$):	
20. Κατακρήμνιση	$k_{PRE} \cdot S_{PO_4} \cdot X_{MeOH}$
21. Επαναδιάλυση	$k_{RED} \cdot X_{MeP} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$

2.1.5 Μοντέλο ενεργού ιλύος No. 3 (ASM3)

2.1.5.1 Εισαγωγή

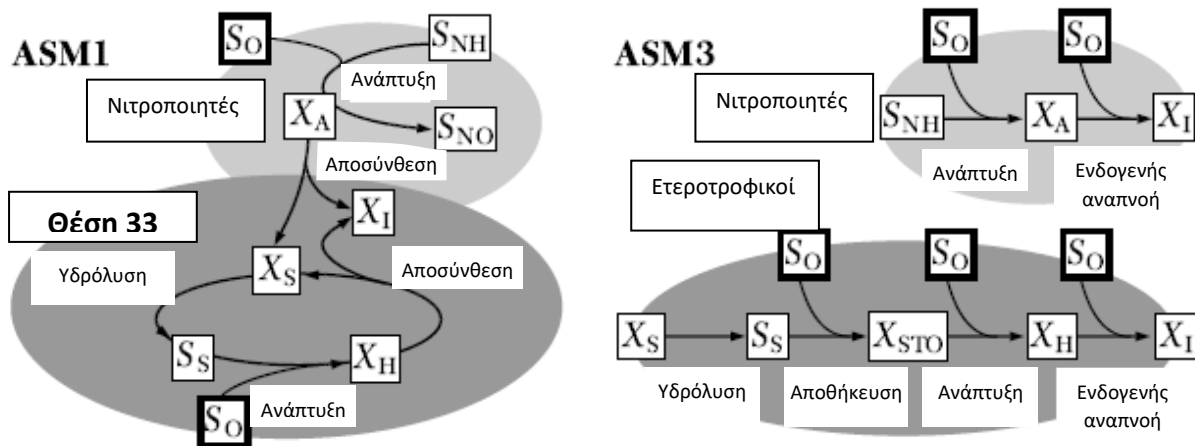
Το ASM3 παρουσιάστηκε το 1999 (Gujer et al., 1999) για τη διόρθωση των μειονεκτημάτων του ASM1, όπως είχαν παρατηρηθεί μετά από δέκα (10) χρόνια εφαρμογής του. Το ASM3 περιγράφει τις ίδιες κύριες διεργασίες με το ASM1, δηλαδή την κατανάλωση οξυγόνου, την παραγωγή ιλύος, τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση, έχοντας λάβει υπόψη όμως τη συσσωρευμένη γνώση, ύστερα από τα χρόνια εφαρμογής του ASM1, σχετικά με την αποθήκευση της οργανικών συστατικών εντός των κυττάρων της βιομάζας.

Το ASM3 αναπτύχθηκε ώστε να αποτελέσει τη βάση πολλών διαφορετικών μοντέλων, καθώς διαθέτει πρόσφορο περιβάλλον για να δεχθεί την προσθήκη υπομοντέλων υπολογισμού της βιολογικής και χημικής απομάκρυνσης φωσφόρου, της ανάπτυξης νηματοειδών οργανισμών και του υπολογισμού του pH.

2.1.5.2 Σύγκριση μοντέλων ASM1 και ASM3

Στο ASM1 περιγράφεται η διεργασία της αποσύνθεσης με μία (1) εξίσωση, ανεξάρτητα από τις συνθήκες περιβάλλοντος, αερόβιες ή ανοξικές, στις οποίες πραγματοποιείται. Αντίθετα, στο ASM3 το φαινόμενο περιγράφεται πιο ρεαλιστικά, μέσω της διεργασίας της ενδογενούς αναπνοής.

Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει τη ροή του COD συγκριτικά στα δύο μοντέλα.



Σχήμα 2.2 Ροή COD στα ASM1 και ASM3 (Πηγή: Henkel et al., 2000)

Στο ASM1 η ροή του COD είναι πολύπλοκη, καθώς ο κύκλος αποσύνθεσης-αναγέννησης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών και των νιτροποιητών συνδέονται μέσω των μεταβλητών και των διεργασιών τους. Απ' την άλλη πλευρά, στο ASM3 όλες οι διεργασίες κατανάλωσης και παραγωγής συστατικών είναι ανεξάρτητες μεταξύ των διαφορετικών μικροοργανισμών, ενώ οι διεργασίες φθοράς περιγράφονται με την ίδια διαδικασία.

Επίσης, το ASM3 περιγράφει την εσωτερική δομή της βιομάζας, όπως ξεκίνησε στο ASM2, γεγονός που μεταφέρθηκε και στην περιγραφή της διεργασίας φθοράς, η οποία περιλαμβάνει όλα τα κλάσματα της βιομάζας. Συνεπώς, το μοντέλο περιλαμβάνει τέσσερις (4) διεργασίες αποσύνθεσης ενώ οι κινητικές τους προκύπτουν από την αναλογία μεταξύ των εσωτερικών προϊόντων και της βιομάζας.

2.1.5.3 Μεταβλητές μοντέλου

Ακολουθεί ο πίνακας 2.11 που παρουσιάζει τις μεταβλητές του ASM3.

Πίνακας 2.11 Μεταβλητές μοντέλου ASM3. (Πηγή: Henze et al., 2000)

α/α	Συστατικά i	Ερμηνεία
1	S_{O_2}	Διαλυμένο Οξυγόνο
2	S_i	Αδρανής Διαλυμένη Οργανική Ύλη
3	S_s	Εύκολα Βιοδιασπασίμη Οργανική Ύλη
4	S_{NH_4}	Διαλυμένο Αμμωνιακό Άζωτο
5	S_{N_2}	Διαλυμένο Αέριο Άζωτο
6	S_{NOX}	Διαλυμένο Νιτρικό Άζωτο
7	S_{ALK}	Αλκαλικότητα
8	X_i	Αδρανής Σωματιδιακή Οργανική Ύλη
9	X_s	Αργά Βιοδιασπασίμη Οργανική Ύλη
10	X_H	Ετεροτροφική Βιομάζα
11	X_{STO}	Εσωκυτταρικά Προϊόντα Αποθήκευσης των Ετεροτροφικών Μικροοργανισμών (Πολυ-υδροξυ-βουτυρικό)
12	X_A	Αυτοτροφική Βιομάζα (Νιτροποιητές)
13	X_{SS}	Αιωρούμενα Στερεά

2.1.5.4 Διεργασίες μοντέλου

Το μοντέλο ASM3 περιλαμβάνει εννέα (9) βασικές διεργασίες:

1. Υδρόλυση: καταναλώνει τη βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη X_S , ανεξάρτητα από τον δότη ηλεκτρονίων, δηλαδή τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται και την καθιστά διαθέσιμη προς κατανάλωση από τους μικροοργανισμούς.
2. Αερόβια αποθήκευση της άμεσα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (S_S): η S_S αποθηκεύεται στο εσωτερικό του κυττάρου με τη μορφή πολύ-υδροξυ-βουτυρικού (X_{STO}) με την κατανάλωση ενέργειας που παράγεται από την αερόβια αναπνοή.
3. Ανοξική αποθήκευση της άμεσα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (S_S): η S_S αποθηκεύεται στο εσωτερικό του κυττάρου με τη μορφή πολύ-υδροξυ-βουτυρικού (X_{STO}) με την κατανάλωση ενέργειας που παράγεται από την απονιτροποίηση. Καθώς δεν απονιτροποιούν όλοι οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί (X_H), ο ρυθμός της διεργασίας αυτής είναι μικρότερος απ' της αντίστοιχης αερόβιας.
4. Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_H): το υπόστρωμα για την ανάπτυξη των X_H είναι το αποθηκευμένο X_{STO} .
5. Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_H): η αναπνοή βασίζεται στην απονιτροποίηση, η οποία πραγματοποιείται μόνο από ένα μέρος, της ετεροτροφικής βιομάζας. Κατά τα υπόλοιπα προσομοιάζει με την αερόβια ανάπτυξη.
6. Αερόβια ενδογενής αναπνοή: περιγράφει όλες τις μορφές απώλειας βιομάζας και τις ενεργειακές απαιτήσεις που δεν συνδέονται με την ανάπτυξη σε αερόβιο περιβάλλον.
7. Ανοξική ενδογενής αναπνοή: αυτή η διεργασία μοιάζει με την αντίστοιχη αερόβια αλλά πραγματοποιείται με μικρότερη ταχύτητα σε ανοξικό περιβάλλον.
8. Αερόβια αναπνοή των προϊόντων αποθήκευσης: τα προϊόντα αποθήκευσης X_{STO} φθείρονται όπως η βιομάζα.
9. Ανοξική αναπνοή των προϊόντων αποθήκευσης: αντίστοιχη διεργασία με την αερόβια αλλά πραγματοποιείται σε ανοξικό περιβάλλον.

2.1.5.5 Στοιχειομετρία μοντέλου

Στους Πίνακες 2.12 και 2.13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η στοιχειομετρία και οι ρυθμοί των διεργασιών του μοντέλου αντίστοιχα. Ο δείκτης i εκφράζει το συστατικό και ο δείκτης j τη διεργασία. Το r_j αντιστοιχεί στο ρυθμό των διεργασιών και το v_{ij} τις σχέσεις μαζών ανάμεσα στα συστατικά στις αντίστοιχες διεργασίες.

Η βασική εξίσωση ισορροπίας της μάζας που εφαρμόζεται στους υπολογισμούς είναι η ακόλουθη:

Εφαρμόζεται η βασική εξίσωση ισορροπίας της μάζας:

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

2.1.5.6 Υποθέσεις και περιορισμοί μοντέλου

Ακολουθούν οι υποθέσεις στις οποίες στηρίζεται το μοντέλο και οι περιορισμοί του:

- Το μοντέλο αναπτύχθηκε για την προσομοίωση αερόβιων και ανοξικών διεργασιών σε συστήματα ενεργού ιλύος που επεξεργάζονται αστικά λύματα, οπότε δεν προσομοιώνει διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αναερόβιο περιβάλλον.

- Η θερμοκρασία των λυμάτων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 8 και 23°C.
- Το pH των λυμάτων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6.5 και 7.5.
- Δεν λειτουργεί σε υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών.
- Δεν υπολογίζει συστήματα με υψηλές φορτίσεις ή μικρούς χρόνους παραμονής στερεών (< 1 ημέρα).

Πίνακας 2.12 Στοιχειομετρία μοντέλου ASM3. (Πηγή: Henze et al., 2000)

Μεταβλητή $i \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
↓ Διεργασία j	S_{O_2}	S_I	S_S	S_{NH_4}	S_{N_2}	S_{NOX}	S_{ALK}	X_I	X_S	X_H	X_{STO}	X_A	X_{SS}
Εκφράζεται σε όρους \rightarrow	O_2	COD	COD	N	N	N	Mole	COD	COD	COD	COD	COD	SS
1. Υδρόλυση		f_{S_I}	x_1	y_1			z_1		-1				$-i_{x_S}$
<i>Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί, αερόβια και απονιτροποιητική δραστηριότητα</i>													
2. Αερόβια αποθήκευση του S_S	x_2		-1	y_2			z_2				Y_{STO,O_2}		t_2
3. Ανοξική αποθήκευση του S_S			-1	y_3	$-x_3$	x_3	z_3				$Y_{STO,NOX}$		t_3
4. Αερόβια ανάπτυξη των X_H	x_4			y_4			z_4		1	$-1/Y_{H,O_2}$			t_4
5. Ανοξική ανάπτυξη (απονιτροποίηση)				y_5	$-x_5$	x_5	z_5		1	$-1/Y_{H,NOX}$			t_5
6. Αερόβια ενδογενής αναπνοή	x_6			y_6			z_6	f_I		-1			t_6
7. Ανοξική ενδογενής αναπνοή				y_7	$-x_7$	x_7	z_7	f_I		-1			t_7
8. Αερόβια αναπνοή των X_{STO}	x_8										-1		t_8
9. Ανοξική αναπνοή των X_{STO}					$-x_9$	x_9	z_9				-1		t_9
<i>Αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί, νιτροποιητική δραστηριότητα</i>													
10. Αερόβια ανάπτυξη των X_A	x_{10}			y_{10}		$1/Y_A$	z_{10}					1	t_{10}
11. Αερόβια ενδογενής αναπνοή	x_{11}			y_{11}			z_{11}	f_I				-1	t_{11}
12. Ανοξική ενδογενής αναπνοή				y_{12}	$-x_{12}$	x_{12}	z_{12}	f_I				-1	t_{12}
<i>Στοιχειομετρικός πίνακας $i_{k,l}$</i>													
<i>k Συντηρητικά</i>													
1. ThOD	g ThOD	-1	1	1		-1.71	-4.57		1	1	1	1	1
2. Άζωτο	g N		i_{N,S_I}	i_{N,S_S}	1	1	1		i_{N,X_I}	i_{N,X_S}	$i_{N,BM}$		$i_{N,BM}$
3. Φορτίο ιόντων	Mole +				1/14		-1/14	-1					
<i>Παρατηρήσιμα</i>													
4. SS	g SS								i_{SS,X_I}	i_{SS,X_S}	$i_{SS,BM}$	0.60	$i_{SS,BM}$

Πίνακας 2.13 Εξισώσεις ρυθμού διεργασιών μοντέλου ASM3. (Πηγή: Henze et al., 2000)

j	Διεργασία	Εξίσωση ρυθμού διεργασίας ρ_j με $\rho_j \geq 0$
1	Υδρόλυση	$k_H \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
<i>Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί, αερόβια και απονιτροποιητική δραστηριότητα</i>		
2	Αερόβια αποθήκευση του S_S	$k_{STO} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot X_H$
3	Ανοξική αποθήκευση του S_S	$k_{STO} \cdot n_{NOX} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NOX}}{K_{NOX} + S_{NOX}} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot X_H$
4	Αερόβια ανάπτυξη των X_H	$\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{STO}/X_H}{K_{STO} + X_{STO}/X_H} \cdot X_H$
5	Ανοξική ανάπτυξη (απονιτροποίηση)	$\mu_H \cdot n_{NOX} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NOX}}{K_{NOX} + S_{NOX}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{X_{STO}/X_H}{K_{STO} + X_{STO}/X_H} \cdot X_H$
6	Αερόβια ενδογενής αναπνοή	$b_{H,O_2} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot X_H$
7	Ανοξική ενδογενής αναπνοή	$b_{H,NOX} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NOX}}{K_{NOX} + S_{NOX}} \cdot X_H$
8	Αερόβια αναπνοή των X_{STO}	$b_{STO,O_2} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot X_{STO}$
9	Ανοξική αναπνοή των X_{STO}	$b_{STO,NOX} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NOX}}{K_{NOX} + S_{NOX}} \cdot X_{STO}$
<i>Αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί, νιτροποιητική δραστηριότητα</i>		
10	10. Αερόβια ανάπτυξη των X_A	$\mu_A \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{A,O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{A,NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{A,ALK} + S_{ALK}} \cdot X_A$
11	11. Αερόβια ενδογενής αναπνοή	$b_{A,O_2} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{A,O_2} + S_{O_2}} \cdot X_A$
12	12. Ανοξική ενδογενής αναπνοή	$b_{A,NOX} \cdot \frac{K_{A,O_2}}{K_{A,O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NOX}}{K_{A,NOX} + S_{NOX}} \cdot X_A$

2.2 Μοντέλα ολοκληρωμένης προσομοίωσης ΕΕΛ (Benchmark Simulation Models – BSM)

2.2.1 Εισαγωγή

Κάθε εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων είναι ένα πολύπλοκο μη γραμμικό σύστημα, αποτελούμενο από πολλές υπομονάδες, οι οποίες πρέπει να συλλειτουργήσουν αρμονικά για την επίτευξη ενός κοινού αποτελέσματος. Ταυτόχρονα, οι εισερχόμενες παροχές και τα φορτία παρουσιάζουν έντονη μεταβλητότητα στο χρόνο, κατά τρόπο που τόσο η ίδια η σύσταση, όσο και οι μάζες των συστατικών των λυμάτων που καλείται μια εγκατάσταση να επεξεργαστεί και να διαχειριστεί, είναι ασταθείς και αβέβαιες. Παρόλα αυτά το αποτέλεσμα της επεξεργασίας πρέπει να είναι σταθερό και οι επεξεργασμένες ροές να ανταποκρίνονται στα όρια της νομοθεσίας πληρώνοντας τα χαρακτηριστικά ποιότητας που προβλέπονται.

Πέραν της ανάγκης συμμόρφωσης με τα προβλεπόμενα από τη νομοθεσία κριτήρια, μια εγκατάσταση μπορεί να επιτελέσει πολλαπλούς σκοπούς, η επίτευξη των οποίων στηρίζεται στην ανάπτυξη και εφαρμογή προτύπων λειτουργίας και καινοτόμων στρατηγικών ελέγχου. Έτσι δημιουργήθηκαν ολοκληρωμένα εργαλεία, τα Μοντέλα Ολοκληρωμένης Προσομοίωσης (BSM), για την εκτίμηση των στρατηγικών ελέγχου των εγκαταστάσεων ενεργού ιλύος.

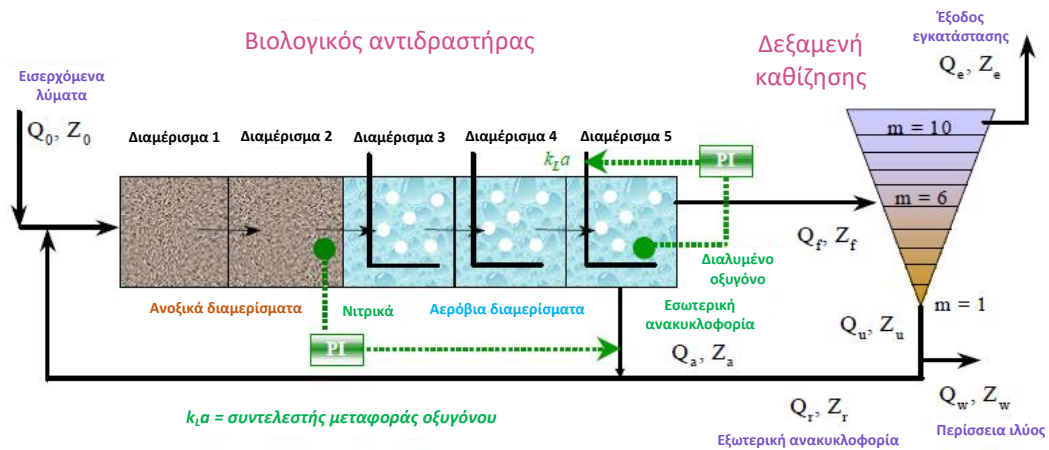
Κάθε Μοντέλο Ολοκληρωμένης Προσομοίωσης περιγράφει συγκεκριμένη διάταξη των μονάδων της εγκατάστασης, το μοντέλο προσομοίωσης, τα εισερχόμενα φορτία, τις διαδικασίες ελέγχου και τελικά, τα κριτήρια αξιολόγησης της λειτουργίας. Ακολουθεί η παρουσίαση τριών (3) μοντέλων ολοκληρωμένης προσομοίωσης, του BSM1, του BSM1_LT και του BSM2.

2.2.2 Μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης Νο. 1 (BSM1)

2.2.2.1 Εισαγωγή

Η διάταξη του BSM1 περιλαμβάνει μόνο το βιολογικό αντιδραστήρα και τη δεξαμενή τελικής καθίζησης. Το μοντέλο προτείνει την ακόλουθη στρατηγική ελέγχου: ο έλεγχος του διαλυμένου οξυγόνου στο τελευταίο διαμέρισμα της δεξαμενής αερισμού πραγματοποιείται με τη ρύθμιση του συντελεστή μεταφοράς οξυγόνου και ο έλεγχος του επιπέδου νιτρικών στην τελευταία ανοξική δεξαμενή πραγματοποιείται με τη ρύθμιση της εσωτερικής ανακυκλοφορίας. Ένα τυπικό σύστημα BSM1 παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2.

Το μοντέλο προβλέπει μέση παροχή εισερχόμενων λυμάτων $18.446 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ και μέση συγκέντρωση βιοδιασπώμενου COD στα εισερχόμενα λύματα $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής HRT υπολογίζεται στις 14.4 ώρες. Ο όγκος τόσο του βιολογικού αντιδραστήρα, όσο και της δεξαμενής καθίζησης είναι 6.000 m^3 . Η περίσσεια ιλύος που απομακρύνεται φτάνει τα $385 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Άρα ο χρόνος παραμονής στερεών Θ_c της εγκατάστασης φτάνει τις 9 ημέρες περίπου.



Σχήμα 2.2 Γενική διάταξη της ΕΕΛ του BSM1 (Πηγή: Alex et al., 2008)

Το μοντέλο προσομοιώνει τη δυναμική λειτουργία του συστήματος για τρία διαφορετικά σενάρια ως προς την εισερχόμενη φόρτιση: περίοδο ξηρασίας, συνδυασμό περιόδου ξηρασίας με μακρά περίοδο βροχόπτωσης και συνδυασμό περιόδου ξηρασίας με δύο πλημμυρικά γεγονότα.

2.2.2.2 Προσομοιούμενο σύστημα

2.2.2.2.1 Μοντέλο βιολογικών διεργασιών

Τα βιολογικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο BSM1 περιγράφονται από το ASM1 που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.1.2.3 και το σχήμα 2.1.

2.2.2.2.2 Βιολογικός αντιδραστήρας

Ο βιολογικός αντιδραστήρας αποτελείται από πέντε (5) διαμερίσματα που παρουσιάζουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Διαμερίσματα 1-2: ανοξικά, πλήρους μίξης, όγκου 1000 m^3 , συνολικού όγκου 2000 m^3 .
- Διαμερίσματα 3-5: αερόβια, όγκου 1333 m^3 , συνολικού όγκου 3999 m^3 .
- Διαμερίσματα 3-4: συνεχής εισροή οξυγόνου με σταθερό συντελεστή μεταφοράς, $K_{La} = 10 \text{ h}^{-1}$.
- Διαμέρισμα 5: σταθερή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.
- Εσωτερική ανακυκλοφορία νιτρικών που ξεκινάει από την 5^η δεξαμενή και καταλήγει στην 1^η, με παροχή $q_{in} = 55338 \text{ m}^3/\text{d}$.
- Εξωτερική ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος που ξεκινάει από τον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης και καταλήγει στην είσοδο της εγκατάστασης, με παροχή $Q_{ex} = 18446 \text{ m}^3/\text{d}$.

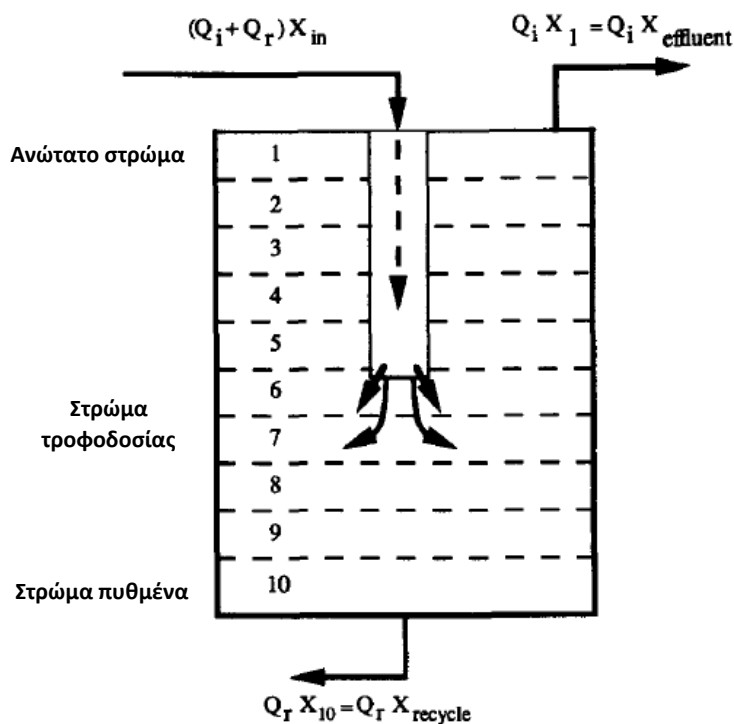
2.2.2.2.3 Δεξαμενή τελικής καθίζησης (ΔΤΚ)

Η δεξαμενή τελικής καθίζησης είναι η μονάδα του συστήματος, στην οποία πραγματοποιούνται μόνο οι φυσικές διαδικασίες της διαύγασης και καθίζησης. Προσομοιώνεται ως μια δεξαμενή

με συνολικό εμβαδόν επιφάνειας 1500 m², αποτελούμενη από δέκα (10) στρώματα ύψους 0.4 m το καθένα, δηλαδή το ύψος της φτάνει τα 4 m και ο όγκος της ισούται με 6000 m³.

Η τροφοδοσία της δεξαμενής με το ανάμικτο υγρό του βιολογικού αντιδραστήρα γίνεται στο μέσον του 6^{ου} στρώματος, ενώ η ιλύς εξέρχεται απ' τον πυθμένα της δεξαμενής και το διαυγασμένο υγρό απ' την επιφάνειά της. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η στρωματοποίηση της ΔTK, η είσοδοι και έξοδοι του ανάμικτου υγρού, της ιλύος και της επεξεργασμένης εκροής.

Η καθίζηση των στερεών ακολουθεί το μοντέλο καθίζησης των Takacs et al. (1991) σύμφωνα με το οποίο τα εισερχόμενα αιωρούμενα στερεά του ανάμικτου υγρού διανέμονται στιγμιαία και ομοιόμορφα σε ολόκληρη επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του στρώματος τροφοδοσίας και στη συνέχεια η ροή είναι μόνο κατακόρυφη.



Σχήμα 2.4 Στρωματοποίηση δεξαμενής τελικής καθίζησης (Πηγή: Takacs et al., 1991)

Η διπλή εκθετική εξίσωση που περιγράφει την ταχύτητα καθίζησης βασίζεται στη θεωρία της ροής στερεών. Στον πίνακα 2.14 παρατίθενται οι παράμετροι της εξίσωσης.

$$v_{sj} = v_0 * e^{-r_h * X_j^*} - v_0 * e^{-r_p * X_j^*}$$

$$0 \leq v_{sj} \leq v_0'$$

(Πηγή: Takacs et al., 1991)

Όπου, V_{sj} : ταχύτητα καθίζησης στο στρώμα j (m/d)

X_j : συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στο στρώμα j (g·m⁻³)

X_j^* : συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στο στρώμα j (g·m⁻³) με τον περιορισμό

$$X_j^* = X_j - X_{\min}$$

X_{\min} : ελάχιστη εφικτή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) που υπολογίζεται απ' τον τύπο $X_{\min} = f_{ns} - X_{in}$

X_{in} : συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών του ανάμικτου υγρού που εισέρχεται στη δεξαμενή καθίζησης

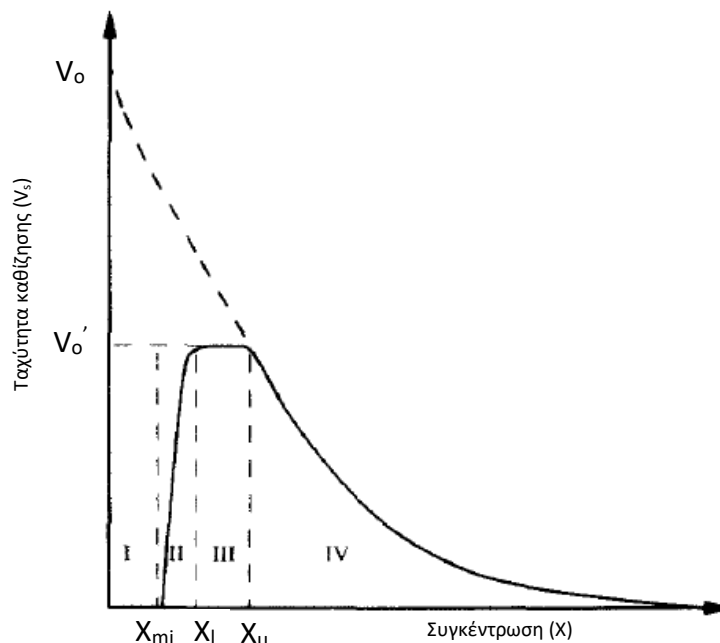
f_{ns} : το κλάσμα αιωρούμενων στερεών που δεν καθιζάνει

Πίνακας 2.14 Παράμετροι διπλής εκθετικής εξίσωσης που υπολογίζει την ταχύτητα καθίζησης. (Alex et al., 2008)

Περιγραφή Παραμέτρου	Σύμβολο Παραμέτρου	Τιμή	Μονάδες
Μέγιστη ταχύτητα καθίζησης	v'_0	250	$\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$
Μέγιστη κατά Vesilind ταχύτητα καθίζησης	v_0	474	$\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$
Παράμετρος ζωνικής καθίζησης	r_h	0,000576	$\text{m}^3\cdot(\text{gSS})^{-1}$
Παράμετρος συσσωματούμενης καθίζησης	r_p	0,00286	$\text{m}^3\cdot(\text{gSS})^{-1}$
Συντελεστής μη καθιζόντων στερεών	f_{ns}	0,00228	αδιάστατος

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης ($v_0 * e^{-r_h * X_j^*}$) υπολογίζει την ταχύτητα καθίζησης των μεγάλων, καλά κροκιδωμένων σωματιδίων, ενώ ο δεύτερος όρος ($v_0 * e^{-r_p * X_j^*}$) αποτελεί παράγοντα διόρθωσης της ταχύτητας λόγω των μικρότερων σωματιδίων που καθιζάνουν πιο αργά.

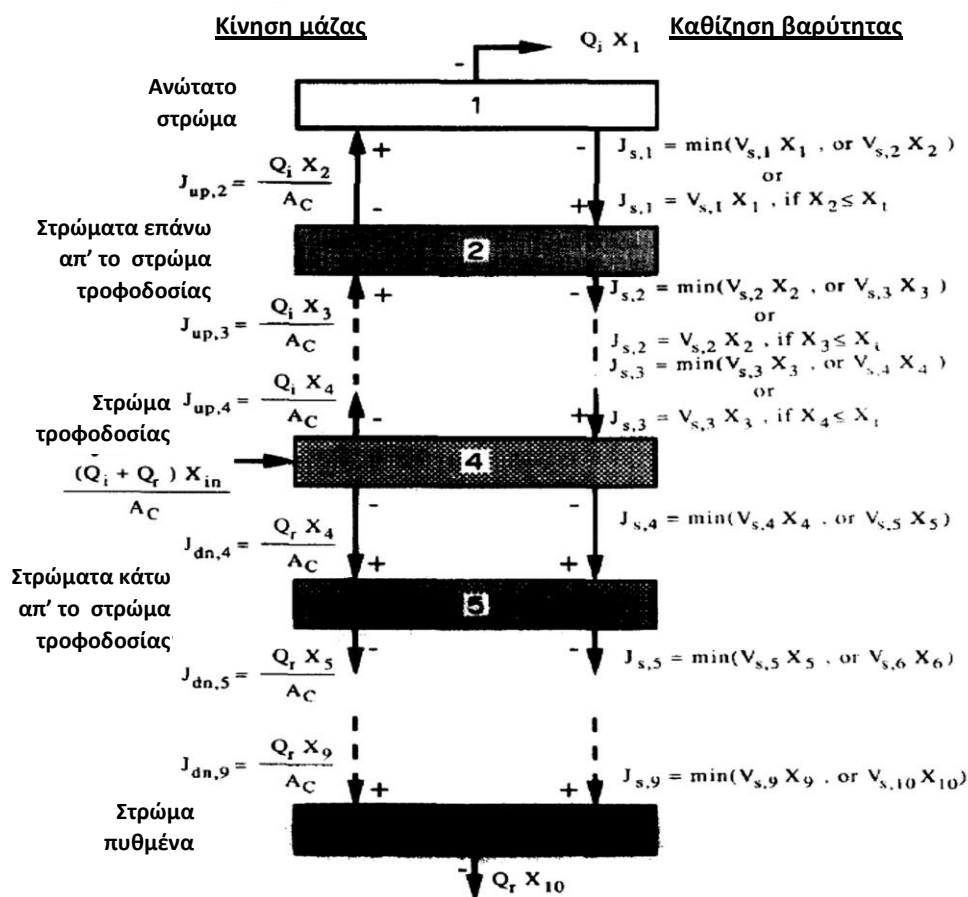
Κατά τον υπολογισμό της ταχύτητας καθίζησης παρατηρούνται τέσσερις (4) περιοχές ενδιαφέροντος (Takacs et al., 1991) οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα ταχύτητας καθίζησης – συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών (Πηγή: Takacs et al., 1991)

- Περιοχή I, $X < X_{\min}$: η ταχύτητα καθίζησης ορίζεται ως μηδενική (0) όταν η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών φτάνει τη μικρότερη δυνατή τιμή της.
- Περιοχή II, $X_{\min} < X < X_l$: η ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται κυρίως από τα σωματίδια που καθιζάνουν αργά και είναι περισσότερο ευαίσθητη στις μεταβολές της παραμέτρου r_p .
- Περιοχή III, $X_l < X < X_u$: για συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών μεταξύ 200 – 2000 g/m^3 , η ταχύτητα καθίζησης είναι ανεξάρτητη της συγκέντρωσης και σταθερή στη μέγιστη τιμή της, καθώς οι κροκίδες έχουν αποκτήσει τη μέγιστη διάστασή τους.
- Περιοχή IV, $X > X_u$: η ταχύτητα καθίζησης δεν επηρεάζεται από τα σωματίδια που καθιζάνουν αργά και η ταχύτητα καθίζησης είναι περισσότερο ευαίσθητη στις μεταβολές της παραμέτρου r_h .

Στις δεξαμενές καθίζησης συνεχούς ροής η ροή στερεών απ' την επιφάνεια προς τον πυθμένα είναι το αποτέλεσμα της ροής λόγω της βαρύτητας και της ροής λόγω της κίνησης της μάζας του υγρού. Το σχήμα 2.6 απεικονίζει το σχετικό υπολογισμό της ροής στερεών μεταξύ των στρωμάτων της ΔΤΚ.



Σχήμα 2.6 Εξισώσεις υπολογισμού της ροής στερεών στη ΔΤΚ (Πηγή: Takacs et al., 1991)

2.2.2.3 Διαδικασία προσομοίωσης

Η ολοκληρωμένη προσομοίωση πραγματοποιείται σε δύο (2) στάδια. Αρχικά προσομοιώνεται η λειτουργία υπό σε σταθερές συνθήκες και στη συνέχεια προσομοιώνεται η δυναμική λειτουργία του συστήματος σε περιπτώσεις αντιμετώπισης έκτακτων συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχονται τρία (3) σενάρια καιρικών συνθηκών: σενάριο ξηρασίας, ένα γεγονός καταιγίδας και ένα γεγονός βροχής.

Οι παροχές των σεναρίων της δυναμικής φόρτισης περιλαμβάνονται σε αρχεία που εισάγουν και τα στοιχεία για τις αρχικές συγκεντρώσεις των συστατικών των εισερχόμενων λυμάτων σε 15-λεπτα χρονικά διαστήματα, για συνολική χρονική διάρκεια 14 ημερών. Το σενάριο ξηρασίας περιλαμβάνει φυσιολογικές διακυμάνσεις της παροχής και του φορτίου COD. Το σενάριο της καταιγίδας ενσωματώνει δύο (2) γεγονότα καταιγίδας στο αρχικό σενάριο ξηρασίας. Το πρώτο γεγονός χαρακτηρίζεται από υψηλή ένταση και μικρή διάρκεια και αναμένεται να κατακλύσει την αποχέτευση με σωματιδιακό υλικό που αυξάνει τα βιοδιασπάσιμα και αδρανή αιωρούμενα στερεά στην είσοδο. Το δεύτερο γεγονός υποθέτει ότι οι αποχετεύσεις έχουν ξεπλυθεί από σωματιδιακό υλικό κατά την πρώτη καταιγίδα και μόνο μια μέτρια αύξηση στο φορτίο COD παρατηρείται κατά τη διάρκειά του. Το τρίτο αρχείο περιλαμβάνει ένα γεγονός βροχής μεγάλης διάρκειας που αυξάνει την εισερχόμενη παροχή για μεγάλη χρονική διάρκεια χωρίς αύξηση στο φορτίο COD που δέχεται η εγκατάσταση.

Σε κάθε προσομοίωση τρέχει αρχικά το στατικό μοντέλο για 100 ημέρες, ακολουθεί η δυναμική προσομοίωση με τα δεδομένα εισροής που αντιστοιχούν στη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες ξηρού καιρού για 14 ημέρες και ακολουθεί η δυναμική προσομοίωση για άλλες 14 ημέρες με τα δεδομένα εισροής που αντιστοιχούν σε ένα απ' τα τρία σενάρια: ξηρού καιρού, γεγονός καταιγίδας ή γεγονός βροχής. Κατά συνέπεια, τις 100 ημέρες σταθερής κατάστασης ακολουθούν 28 ημέρες μεταβαλλόμενων συνθηκών καιρού.

2.2.2.4 Εκτίμηση απόδοσης

Η απόδοση της εγκατάστασης υπολογίζεται με τους ακόλουθους προτεινόμενους δείκτες.

2.2.2.4.1 Δείκτης ποιότητας εκροής (Effluent Quality Index – EQI)

Ο δείκτης ποιότητας εκροής υπολογίζεται απ' τα αποτελέσματα των 7 τελευταίων ημερών της δυναμικής προσομοίωσης σε kg μονάδων ρύπανσης ανά ημέρα.

$$EQI = \frac{1}{T * 1000} \int_{t=21 \text{ days}}^{t=28 \text{ days}} \left(2 * SS_e(t) + 1 * COD_e(t) + 30 * S_{Nkj,e}(t) + 10 * S_{NO,e}(t) + 2 * BOD_e(t) \right) * Q_e(t) * dt$$

$$S_{Nkj,e} = S_{NH,e} + S_{ND,e} + X_{ND,e} + i_{XB} * (X_{B,H,e} + X_{B,A,e}) + i_{XP} * (X_{P,e} + X_{I,e})$$

$$SS_e = 0.75 * (X_{S,e} + X_{I,e} + X_{B,H,e} + X_{B,A,e} + X_{P,e})$$

$$BOD_{5,e} = 0.25 * (S_{S,e} + X_{S,e} + (1 - f_P) * (X_{B,H,e} + X_{B,A,e}))$$

$$COD_e = S_{S,e} + S_{I,e} + X_{S,e} + X_{I,e} + X_{B,H,e} + X_{B,A,e} + X_{P,e}$$

(Πηγή: Alex et al., 2008)

2.2.2.4.2 Παραβιάσεις ορίων εκροής

Για την εκτίμηση της απόδοσης αναφέρεται ο αριθμός των παραβιάσεων και το ποσοστό του χρόνου που η εγκατάσταση παραβιάζει τα όρια εκροής. Οι παραβιάσεις υπολογίζονται για την αμμωνία, το ολικό άζωτο, το BOD₅, το ολικό COD και τα αιωρούμενα στερεά. Τα όρια εκροής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.15.

Πίνακας 2.15 Όρια επεξεργασμένης εκροής μοντέλου BSM1 (Πηγή: Alex et al., 2008)

Μεταβλητή		Όρια Εκροής	Μονάδες
Αμμωνία	$S_{NH,e}$	4	gN m ⁻³
Ολικό Άζωτο	$N_{tot,e}$	18	gN m ⁻³
BOD ₅	BOD_e	10	gBOD m ⁻³
Ολικό COD	COD_e	100	gBOD m ⁻³
Αιωρούμενα Στερεά	TSS_e	30	gSS m ⁻³

2.2.2.4.3 Ολικό λειτουργικό κόστος (Overall Cost Index – OCI)

Το ολικό λειτουργικό κόστος υπολογίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα του κόστους της ενέργειας αερισμού (AE), της ενέργειας άντλησης (PE), της συνολικής παραγόμενης ιλύος (SP), της κατανάλωσης εξωτερικής πηγής άνθρακα (EC) και της ενέργειας ανάμιξης (ME).

$$OCI = AE + PE + 5 * SP + 3 * EC + ME$$

(Πηγή: Alex et al., 2008)

2.2.3 Μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης No. 1_LT (BSM1_LT)

2.2.3.1 Εισαγωγή Επειδή η περίοδος αξιολόγησης του BSM1 περιορίζεται σε μία (1) εβδομάδα, χρόνος που σε πολλές περιπτώσεις δεν επαρκεί για την ανάπτυξη φαινομένων, διεργασιών και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής δράσεων ελέγχου μιας εγκατάστασης προτάθηκε το BSM1_LT για να διορθώσει αυτό το μειονέκτημα του μοντέλου.

2.2.3.2 Διαφορές BSM1 και BSM1_LT

Οι διαφορές των δύο μοντέλων συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία:

- Η περίοδος αξιολόγησης έχει επεκταθεί στο ένα (1) έτος ώστε να συμπεριλάβει συνήθη φαινόμενα που επηρεάζουν τη λειτουργία μιας εγκατάστασης, όπως είναι εποχικά γεγονότα και τυπικές βλάβες εξοπλισμού ή προβλήματα στις διεργασίες του

συστήματος. Η έναρξη και ο τερματισμός της αξιολόγησης προβλέπονται για την αρχή Ιουλίου και το τέλος Ιουνίου αντίστοιχα, λόγω επιθυμητών καιρικών συνθηκών.

- Επιπλέον, ο ικανός χρόνος αξιολόγησης του ενός (1) έτους επιτρέπει την προσομοίωση εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης του συστήματος, όπως είναι η χρήση δεξαμενών αποθήκευσης ιλύος, ο έλεγχος του ρυθμού απομάκρυνσης της περίσσειας ιλύος και η μεταβολή του υδραυλικού χρόνου παραμονής στερεών.
- Τα δεδομένα εισόδου του BSM1_LT αναφέρονται στα χαρακτηριστικά των λυμάτων στην είσοδο της εγκατάστασης, ενώ τα δεδομένα εισόδου του BSM1 στην είσοδο του βιολογικού αντιδραστήρα, μετά την προεπεξεργασία και την πρωτοβάθμια καθίζηση. Οι συγκεντρώσεις των συστατικών προκύπτουν από τα δεδομένα εισόδου της εγκατάστασης του BSM2 τα οποία εισάγονται στην πρωτοβάθμια καθίζηση του ίδιου μοντέλου και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου του BSM1_LT.
- Το μοντέλο παρέχει δεδομένα για τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του έτους, με την υψηλότερη θερμοκρασία να σημειώνεται στις αρχές Αυγούστου και τη χαμηλότερη στις αρχές Φεβρουαρίου. Η μεταβολή της θερμοκρασίας συμπαρασύρει και τις τιμές των παραμέτρων που, επίσης, μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους. Για τη θερμοκρασία των 15 °C συμπίπτουν με τις τιμές του BSM1 για την ίδια θερμοκρασία.
- Προβλέπονται σφάλματα αισθητήρων και προβλήματα διεργασιών, με τυχαία χρονική διάρκεια αποκατάστασης, που εκφράζονται μέσω αλγορίθμων (Rosen et al., 2008). Οι ίδιοι αλγόριθμοι επιτρέπουν την προσομοίωση συνθηκών όπως η αναστολή της νιτροποίησης λόγω τοξικότητας, οι διαταραχές της καθίζησης και οι μεταβολές της σύστασης της ιλύος λόγω της μεταβλητότητας της σύστασης των εισερχόμενων λυμάτων
- Τέλος, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των αισθητήρων απαιτεί δυναμικά δεδομένα (Rieger et al., 2003), όπως είναι τα επίπεδα θορύβου, η χρονική ανταπόκριση, η τάση, ο κορεσμός σήματος και ο χρόνος παύσης. Αυτό επιτρέπει τον περαιτέρω έλεγχο και παρακολούθηση της εγκατάστασης και καθιστά το σύστημα ικανό να ανταποκριθεί σε περιόδους με μηδενικά ή μη αντιπροσωπευτικά δεδομένα κατά τη βαθμονόμηση των αισθητήρων.

2.2.4 Μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης No. 2 (BSM2)

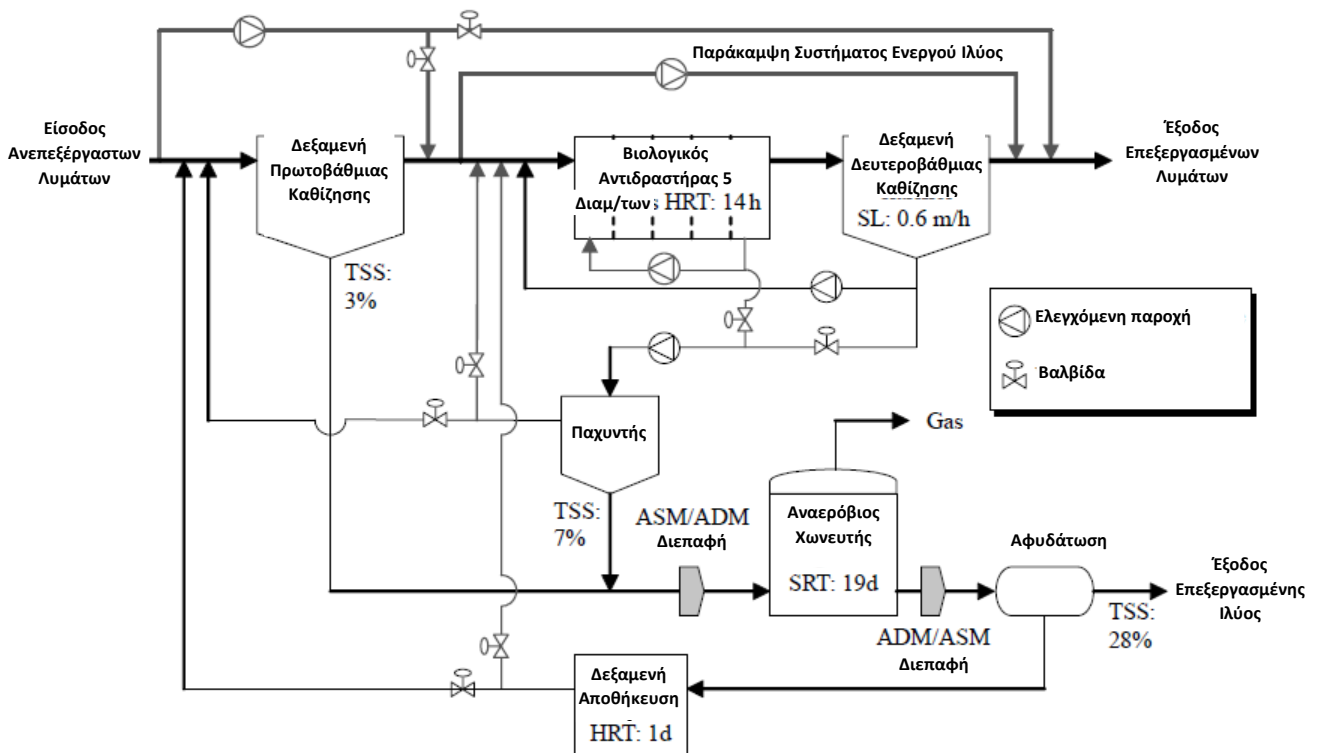
2.2.4.1 Εισαγωγή

Η ανάγκη να περιλαμβάνει η προσομοίωση πέραν του συστήματος ενεργού ιλύος, τις υπόλοιπες μονάδες επεξεργασίας που λειτουργούν σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων οδήγησε στη δημιουργία του BSM2. Το εν λόγω μοντέλο προσομοιώνει ολόκληρη τη λειτουργία της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, με τις δεξαμενές, τους αντιδραστήρες και τα υποσυστήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους, λειτουργούν και ελέγχονται όχι μόνο σε τοπικό επίπεδο ως ξεχωριστές διεργασίες, αλλά και μέσω εποπτικών συστημάτων ελέγχου τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστημάτων (Jeppsson et al., 2005). Το μοντέλο, εκτός των υπολοίπων μονάδων προσομοιώνει την προ-επεξεργασία λυμάτων και τη γραμμή επεξεργασίας της ιλύος.

Παρόλο που το BSM2 περιλαμβάνει ένα σύνολο υπομονάδων και συστημάτων της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, δεν αναπτύχθηκε για να υπολογίσει όλες τις μεταβλητές και λειτουργίες μια ΕΕΛ αλλά να αποτελέσει πλατφόρμα πειραματισμού σε εναλλακτικές στρατηγικές ελέγχου και την απόδοσή τους. Κατά συνέπεια δεν δημιουργήθηκε με στόχο να ικανοποιήσει τις επιταγές της νομοθεσίας και να πειθαρχήσει σε συγκεκριμένους κανόνες σχεδιασμού.

Ως περίοδος αξιολόγησης επιλέχθηκε ο ένας (1) χρόνος έτσι ώστε να μπορεί να προσομοιώσει εποχικά γεγονότα, την ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας και μεταβολές στη σύσταση και παροχή των εισερχόμενων λυμάτων, καθώς και να επιτρέψει στις διεργασίες του αναερόβιου χωνευτή να αναπτυχθούν.

Το σχήμα 2.7 παρουσιάζει το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης στα πρότυπα του BSM2 και τις συνδέσεις μεταξύ των δεξαμενών και των μηχανημάτων της.



Σχήμα 2.7 Δομή εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων μοντέλου BSM2 (Πηγή Opens et al., 2010)

2.2.4.2 Προσομοιούμενο σύστημα

2.2.4.2.1 Μοντέλο βιολογικών διεργασιών

Το BSM2 χρησιμοποιεί το μοντέλο διεργασιών ASM1 των Henze et al. (1987) που χρησιμοποιείται και στο BSM1 (ενότητες 2.1.2.3 και 2.2.2.1).

2.2.4.2.2 Δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (ΔΠΚ)

Η λειτουργία της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης βασίζεται στο μοντέλο των Otterpohl και Freund (1992) και Otterpohl et al. (1994), η απομάκρυνση στερεών φτάνει το 50% και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής HRT είναι 1h (Noprens et al., 2010).

2.2.4.2.3 Βιολογικός αντιδραστήρας

Ο βιολογικός αντιδραστήρας περιλαμβάνει σύστημα ενεργού ιλύος πέντε (5) διαμερισμάτων, (Henze et al., 1987) όπως και το BSM1, αλλά έχουν γίνει τροποποιήσεις στους όγκους των διαμερισμάτων και την παροχή της εσωτερικής ανακυκλοφορίας για να επιτευχθεί βελτιστοποίηση της απόδοσης (Noprens et al., 2010). Τα χαρακτηριστικά του είναι τα ακόλουθα:

- Διαμερίσματα 1-2: ανοξικά, πλήρους μίξης, όγκου 1500 m³, συνολικού όγκου 3000 m³.
- Διαμερίσματα 3-5: αερόβια, όγκου 3000 m³, συνολικού όγκου 9000 m³.
- Διαμερίσματα 3-4: συνεχής εισροή οξυγόνου με σταθερό συντελεστή μεταφοράς, $K_{La} = 120 \text{ d}^{-1}$.
- Διαμέρισμα 5: συνεχής εισροή οξυγόνου με σταθερό συντελεστή μεταφοράς, $K_{La} = 60 \text{ d}^{-1}$.
- Εσωτερική ανακυκλοφορία νιτρικών που ξεκινάει από την 5^η δεξαμενή και καταλήγει στην 1^η, με παροχή τρεις (3) φορές τη μέση παροχή εισερχόμενων λυμάτων, 61944 m³/d.
- Εξωτερική ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος που ξεκινάει από τον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης και καταλήγει στην είσοδο της εγκατάστασης, με παροχή 18446 m³/d.

2.2.4.2.4 Δεξαμενή τελικής καθίζησης (ΔΤΚ)

Η λειτουργία της δεξαμενής τελικής καθίζησης βασίζεται στο μοντέλο καθίζησης των Takacs et al. (1991) που χρησιμοποιείται και στο BSM1 (ενότητα 2.2.2.2.3). Δεν πραγματοποιούνται βιολογικές διεργασίες στη ΔΤΚ.

2.2.4.2.5 Πάχυνση βαρύτητας

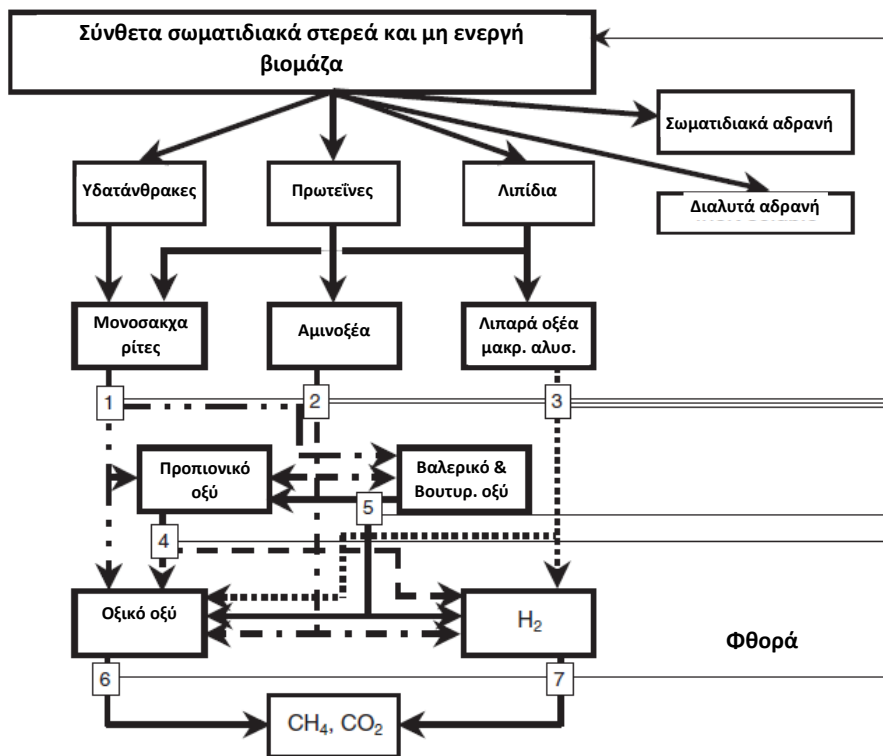
Κατά την πάχυνση βαρύτητας επιτυγχάνεται απομάκρυνση στερεών σε ποσοστό 98%. Καμία βιολογική διεργασία δεν λαμβάνει χώρα στη δεξαμενή.

2.2.4.2.6 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση βασίζεται στο μοντέλο ADM1 των Batstone et al. (2002) σύμφωνα με τους οποίους στον αναερόβιο χωνευτή πραγματοποιούνται δύο κατηγορίες παράλληλων αντιδράσεων:

- Βιοχημικές αντιδράσεις: καταλύονται από ένζυμα εντός ή εκτός κυττάρου. Το μοντέλο περιλαμβάνει συνολικά πέντε (5) βήματα, τα τρία (3) κυτταρικά βήματα, δηλαδή την οξεοπαραγωγή ή ζύμωση, την ακετοπαραγωγή ή αναερόβια οξείδωση των λιπαρών οξέων (VFA και LCFA) και τη μεθανοπαραγωγή, καθώς και ένα (1) εξωκυττάριο (μερικώς μη-βιολογικό) βήμα αποσύνθεσης και ένα (1) υδρόλυσης (Σχήμα 2.8).

- Φυσικοχημικές αντιδράσεις: δεν μεσολαβούν μικροοργανισμοί και χωρίζονται σε τρεις (3) κατηγορίες, υγρής φάσης, όπως γρήγορες αντιδράσεις οξέος-βάσης, ενδιάμεσης ταχύτητας αντιδράσεις μεταφοράς μάζας μεταξύ υγρής και αέριας φάσης και ενδιάμεσης ταχύτητας/αργές αντιδράσεις μετατροπής μεταξύ υγρής και στερεάς φάσης, όπως είναι η κατακρήμνιση και διαλυτοποίηση ιοντικών ενώσεων.



Σχήμα 2.8 Οι βιοχημικές διεργασίες του αναερόβιου μοντέλου: (1) οξεοπαραγωγή από σάκχαρα, (2) οξεοπαραγωγή από αμινοξέα, (3) οξεοπαραγωγή από λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας, (4) ακετοπαραγωγή από προπιονικό οξύ, (5) ακετοπαραγωγή από βουτυρικό οξύ και βαλερικό οξύ, (6) μεθανοπαραγωγή. (Πηγή: Batstone et al., 2002)

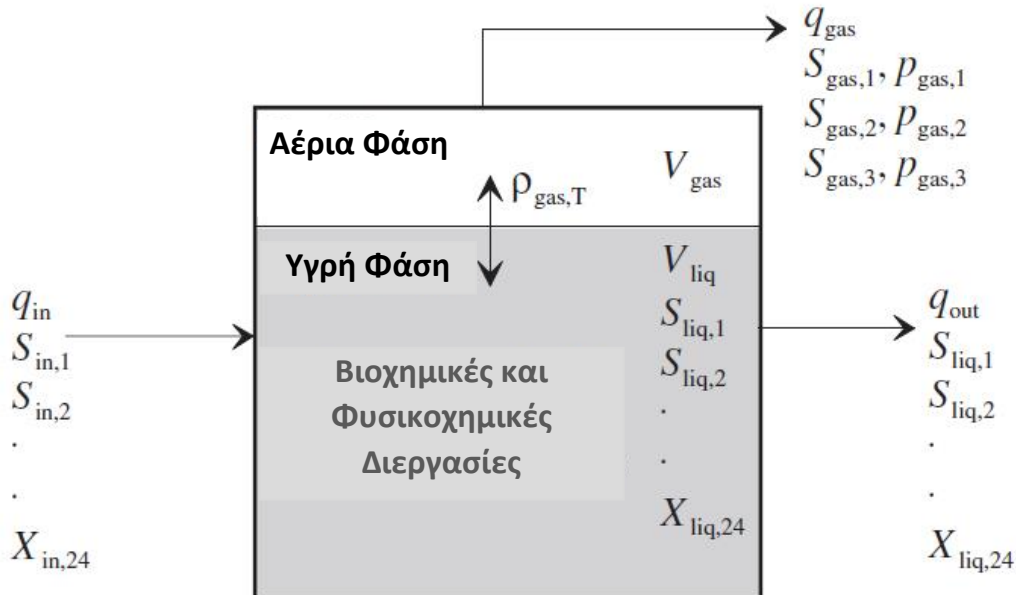
Η εφαρμογή του συγκεκριμένου φυσικοχημικού συστήματος επιτρέπει την έκφραση βιολογικών ανασταλτικών παραγόντων όπως το pH, τα ελεύθερα οξέα και βάσεις, και οι συγκεντρώσεις διαλυμένων αερίων. Επιπλέον, με τη σωστή εκτίμηση των φυσικοχημικών μετατροπών επιτρέπει τον υπολογισμό σημαντικών μεταβλητών της απόδοσης, όπως είναι η παραγωγή αερίου και η αλκαλικότητα.

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται ένα σύστημα συνεχούς ροής πλήρους μίξης. Η ισορροπία μάζας για κάθε συστατικό της υγρής φάσης παρουσιάζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dS_{liq,i}}{dt} = \frac{q_{in} * S_{in,i}}{V_{liq}} - \frac{q_{out} * S_{liq,i}}{V_{liq}} + \sum_{j=1-19} \rho_j * \nu_{i,j}$$

(Πηγή: Batstone et al., 2002)

όπου ο τελευταίος όρος είναι το άθροισμα των κινητικών ρυθμών για τη διεργασία j πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα $v_{i,j}$. Για την αέρια φάση εφαρμόζεται η εξίσωση ισορροπίας μάζας χωρίς να υπάρχει ρεύμα εισόδου, αλλά μόνο ρεύμα εξόδου των παραγόμενων αερίων.



Σχήμα 2.9 Τυπική δεξαμενή αναερόβιας χώνευσης (q = παροχή σε $m^3 \cdot d^{-1}$, V = όγκος σε m^3 , S = συγκέντρωση διαλυτών συστατικών σε $kg \text{ COD} \cdot m^{-3}$, X = συγκέντρωση σωματιδιακών συστατικών σε $kg \text{ COD} \cdot m^{-3}$). (Πηγή: Batstone et al., 2002).

Στους Πίνακες 2.16 και 2.17 που ακολουθούν από Batstone et al. (2002) και έχουν ανασκευαστεί από τον Κολλιλιάνη (2013), παρουσιάζονται η στοιχειομετρία και οι ρυθμοί των διεργασιών του μοντέλου για τα διαλυτά και τα σωματιδιακά συστατικά αντίστοιχα.

Το αρχικό ADM1 μοντέλο έχει τροποποιηθεί ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση της προσομοίωσης με το BSM2. Συγκεκριμένα, έχουν εισαχθεί λειτουργίες συνεχούς αναχαίτισης του pH ώστε να αποτραπούν προβλήματα που σχετίζονται με ασυνέχειες και έχει γίνει μια προσπάθεια που σχετίζεται με την πορεία του αζώτου και του COD στο μοντέλο, έτσι ώστε να επαληθεύονται οι ισορροπίες μαζών. Επιπλέον, από τους Rosen et al. (2006) και Rosen and Jerpson (2006) έχει εισαχθεί αλγεβρική λύση για το υδρογόνο.

2.2.4.2.7 Αφυδάτωση

Κατά την αφυδάτωση επιτυγχάνεται απομάκρυνση στερεών σε ποσοστό 98% και δεν πραγματοποιούνται βιολογικές διεργασίες.

2.2.4.2.8 Δεξαμενή αποθήκευσης

Υπάρχει δυνατότητα ελεγχόμενων αντλήσεων του περιεχομένου της δεξαμενής, ενώ δεν πραγματοποιούνται βιολογικές διεργασίες εντός αυτής.

Πίνακας 2.16 Στοιχειομετρία και ρυθμοί διεργασιών διαλυτών συστατικών ADM1. (Πηγή: Batstone et al., 2002 και Κολλιγιάνης, 2013)

Συστατικό →	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ρυθμός
j	Διεργασία ↓	S _{su}	S _{aa}	S _{fa}	S _{va}	S _{bu}	S _{pro}	S _{ac}	S _{h2}	S _{ch4}	S _{ic}	S _{in}	S _i	(ρ _i gCOD·L ⁻¹ ·d ⁻¹)
1	Αποσύνθεση												f _{sl,xc}	k _{dis} X _c
2	Υδρόλυση Υδατανθράκων	1												k _{hyd,ch} X _{ch}
3	Υδρόλυση Αμινοξέων		1											k _{hyd,pr} X _{pr}
4	Υδρόλυση Λιπιδίων	1-f _{fa,li}		f _{fa,li}										k _{hyd,li} X _{li}
5	Κατανάλωση Σακχάρων	-1				(1-Y _{su}) f _{bu,su}	(1-Y _{su}) f _{pro,su}	(1-Y _{su}) f _{ac,su}	(1-Y _{su}) f _{h2,su}		- ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5}	-Y _{su} N _{bac}		k _{m,su} ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5} / (K _s + S _{su}) X _{su} I ₁
6	Κατανάλωση Αμινοξέων		-1		(1-Y _{aa}) f _{va,aa}	(1-Y _{aa}) f _{bu,aa}	(1-Y _{aa}) f _{pro,aa}	(1-Y _{aa}) f _{ac,aa}	(1-Y _{aa}) f _{h2,aa}		- ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5}	N _{aa} - Y _{aa} N _{bac}		k _{m,aa} ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5} / (K _s + S _{aa}) X _{aa} I ₁
7	Κατανάλωση LCFA			-1				(1-Y _{fa}) 0,7	(1-Y _{fa}) 0,3			-Y _{fa} N _{bac}		k _{m,fa} ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5} / (K _s + S _{fa}) X _{fa} I ₂
8	Κατανάλωση Βαλερικού				-1		(1-Y _{c4}) 0,54	(1-Y _{c4}) 0,31	(1-Y _{c4}) 0,15			-Y _{c4} N _{bac}		k _{m,c4} ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5} / (K _s + S _{va}) X _{c4} 1 / (1 + S _{bu} / S _{va}) I ₂
9	Κατανάλωση Βουτυρικού					-1		(1-Y _{c4}) 0,8	(1-Y _{c4}) 0,2			-Y _{c4} N _{bac}		k _{m,c4} ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5} / (K _s + S _{bu}) X _{c4} 1 / (1 + S _{va} / S _{bu}) I ₂
10	Κατανάλωση Προπιονικού						-1	(1-Y _{pro}) 0,57	(1-Y _{pro}) 0,43		- ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5}	-Y _{pro} N _{bac}		k _{m,pro} ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5} / (K _s + S _{pro}) X _{pro} I ₂
11	Κατανάλωση Οξικού							-1		1-Y _{ac}	- ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5}	-Y _{ac} N _{bac}		k _{m,ac} ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5} / (K _s + S _{ac}) X _{ac} I ₃
12	Κατανάλωση Υδρογόνου								-1	1-Y _{h2}	- ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5}	-Y _{h2} N _{bac}		k _{m,h2} ∑ _{i=1-9,11-24} C _i V _{i,5} / (K _s + S _{h2}) X _{h2} I ₁
13	Φθορά X _{su}													k _{dec,su} X _{su}
14	Φθορά X _{aa}													k _{dec,aa} X _{aa}
15	Φθορά X _{fa}													k _{dec,fa} X _{fa}
16	Φθορά X _{c4}													k _{dec,c4} X _{c4}
17	Φθορά X _{pro}													k _{dec,pro} X _{pro}
18	Φθορά X _{ac}													k _{dec,ac} X _{ac}
19	Φθορά X _{h2}													k _{dec,h2} X _{h2}

Πίνακας 2.17 Στοιχειομετρία και ρυθμοί διεργασιών σωματιδιακών συστατικών ADM1. (Πηγή: Batstone et al., 2002 και Κολλιγιάνης, 2013)

Συστατικό →	i	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Ρυθμός
j	Διεργασία ↓	X_c	X_{ch}	X_{pr}	X_{li}	X_{su}	X_{aa}	X_{fa}	X_{c4}	X_{pro}	X_{ac}	X_{h2}	X_I	$(\rho_j, \text{gCOD} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
1	Αποσύνθεση	-1	$f_{ch, xc}$	$f_{pr, xc}$	$f_{li, xc}$								$f_{xl, xc}$	$k_{dis} X_c$
2	Υδρόλυση Υδατανθράκων		-1											$k_{hyd, ch} X_{ch}$
3	Υδρόλυση Αμινοξέων			-1										$k_{hyd, pr} X_{pr}$
4	Υδρόλυση Λιπιδίων				-1									$k_{hyd, li} X_{li}$
5	Κατανάλωση Σακχάρων					Y_{su}								$k_{m, su} \frac{S_{su}}{K_s + S_{su}} X_{su} I_1$
6	Κατανάλωση Αμινοξέων						Y_{aa}							$k_{m, aa} \frac{S_{aa}}{K_s + S_{aa}} X_{aa} I_1$
7	Κατανάλωση LCFA							Y_{fa}						$k_{m, fa} \frac{S_{fa}}{K_s + S_{fa}} X_{fa} I_2$
8	Κατανάλωση Βαλερικού								Y_{c4}					$k_{m, c4} \frac{S_{va}}{K_s + S_{va}} X_{c4} \frac{1}{1 + S_{bu}/S_{va}} I_2$
9	Κατανάλωση Βουτυρικού								Y_{c4}					$k_{m, c4} \frac{S_{bu}}{K_s + S_{bu}} X_{c4} \frac{1}{1 + S_{va}/S_{bu}} I_2$
10	Κατανάλωση Προπιονικού									Y_{pro}				$k_{m, pro} \frac{S_{pro}}{K_s + S_{pro}} X_{pro} I_2$
11	Κατανάλωση Οξικού										Y_{ac}			$k_{m, ac} \frac{S_{ac}}{K_s + S_{ac}} X_{ac} I_3$
12	Κατανάλωση Υδρογόνου											Y_{h2}		$k_{m, h2} \frac{S_{h2}}{K_s + S_{h2}} X_{h2} I_1$
13	Φθορά X_{su}	1				-1								$k_{dec, su} X_{su}$
14	Φθορά X_{aa}	1					-1							$k_{dec, aa} X_{aa}$
15	Φθορά X_{fa}	1						-1						$k_{dec, fa} X_{fa}$
16	Φθορά X_{c4}	1							-1					$k_{dec, c4} X_{c4}$
17	Φθορά X_{pro}	1								-1				$k_{dec, pro} X_{pro}$
18	Φθορά X_{ac}	1									-1			$k_{dec, ac} X_{ac}$
19	Φθορά X_{h2}	1										-1		$k_{dec, h2} X_{h2}$

2.2.4.3 Διαδικασία προσομοίωσης

Το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης εναλλακτικών στρατηγικών ελέγχου, ενώ προσομοιώνεται και η λειτουργία αισθητήρων σύμφωνα με τους Rieger et al. (2003) και, Jerrson et al. Συνολικά μπορούν να ελεγχθούν πάνω από 60 σημεία όπως τα ακόλουθα:

- Μικρές και μεγάλες παροχές
- Πρωτοβάθμια καθίζηση και/ή παράκαμψη συστήματος ενεργού ιλύος ή συνδυασμός των δύο.
- Βήμα προς βήμα τροφοδοσία του συστήματος.
- Προσθήκη εξωτερικής πηγής άνθρακα σε οποιοδήποτε διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα.
- Απομάκρυνση της περίσσειας ιλύος από το τελευταίο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα.
- Μεταβολές της παροχής εσωτερικής ανακυκλοφορίας εντός του βιοαντιδραστήρα.
- Οποιοσδήποτε συνδυασμός ανάμιξης και αερισμού εντός του βιοαντιδραστήρα.
- Ανακύκλωση λυμάτων παχυντή και επιστροφή των στραγγιδίων στην είσοδο της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης ή στην είσοδο του συστήματος ενεργού ιλύος ή συνδυασμός των δύο.
- Έλεγχος της παροχής επανακυκλοφορίας των στραγγιδίων με τη συγκέντρωσή τους σε δεξαμενή αποθήκευσης.

Η προσομοίωση ξεκινά με σταθερές συνθήκες για χρονικό διάστημα 200 ημερών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των σταθερών συνθηκών αποτελούν αρχικές τιμές για το δυναμικό μοντέλο. Τα σταθερά δεδομένα αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές των δυναμικών δεδομένων εισροής, χρονικής διάρκειας 609 ημερών.

Από την έναρξη της δυναμικής προσομοίωσης και για χρονική διάρκεια 63 ημερών, δηλαδή 9 εβδομάδων, επιτυγχάνεται μια ψευδοσταθερή κατάσταση μέσω της διαρκούς μεταβολής των σημείων ελέγχου του συστήματος. Ακολουθούν 182 ημέρες δυναμικής προσομοίωσης, δηλαδή 26 εβδομάδες, κατά τις οποίες το σύστημα προσαρμόζεται και γίνεται εκτίμηση των εσωτερικών παραμέτρων και των αλγορίθμων ελέγχου.

Η προσομοίωση τελειώνει με 364 ημέρες προσομοίωσης, δηλαδή 52 εβδομάδες, όπου τα αριθμητικά αποτελέσματα που αντιστοιχούν στην έξοδο της επεξεργασίας καταγράφονται ανά 15λεπτα διαστήματα για την εκτίμηση της απόδοσης της εγκατάστασης.

2.2.4.4 Εκτίμηση απόδοσης

Ακολουθούν οι δείκτες απόδοσης των Nopens et al. (2010).

2.2.4.4.1 Δείκτης ποιότητας εκροής (Effluent Quality Index – EQI)

Ο δείκτης ποιότητας εκροής υπολογίζεται απ' τα αποτελέσματα των 364 τελευταίων ημερών της δυναμικής προσομοίωσης σε kg μονάδων ρύπανσης ανά ημέρα.

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

(Πηγή: Nopens et al., 2010)

2.2.4.4.2 Παραβιάσεις ορίων εκροής

Για την εκτίμηση της απόδοσης αναφέρεται ο αριθμός των παραβιάσεων και το ποσοστό του χρόνου που η εγκατάσταση παραβιάζει τα όρια εκροής. Οι παραβιάσεις υπολογίζονται για την αμμωνία, το ολικό άζωτο, το BOD₅, το ολικό COD και τα αιωρούμενα στερεά και τα όρια εκροής είναι αυτά που ισχύουν και για το BSM1 και έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 2.15.

2.2.4.4.3 Ολικό λειτουργικό κόστος (Overall Cost Index – OCI)

Το ολικό λειτουργικό κόστος υπολογίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα του κόστους της ενέργειας αερισμού (AE), της ενέργειας άντλησης (PE) για την εσωτερική και εξωτερική ανακυκλοφορία, της συνολικής παραγόμενης ιλύος (SP), της κατανάλωσης εξωτερικής πηγής άνθρακα (EC), της ενέργειας ανάμιξης (ME), της καθαρής ενέργειας θέρμανσης της ιλύος στον αναερόβιο χωνευτή (HE^{net}), αφαιρώντας την ενέργεια του παραγόμενου μεθανίου (MP).

$$OCI = AE + PE + 3 * SP + 3 * EC + ME - 6 * MP + HE^{net}$$

(Πηγή: Nopens et al., 2010)

2.3 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse Gases Emissions – GHGs)

2.3.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 200 ετών οι συγκεντρώσεις των αερίων θερμοκηπίου της ατμόσφαιρας βαίνουν ολοένα αυξανόμενες, ως αποτέλεσμα της παραγωγής τους από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η γεωργία, η βιομηχανία, η απόρριψη αποβλήτων, η αποδάσωση και η χρήση ορυκτών καυσίμων. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) έχει αυξηθεί από 280 ppmv σε 372.3 ppmv από την προβιομηχανική εποχή μέχρι το 2001 και η αύξηση θα συνεχίζεται κατά 0.5% κάθε χρόνο (IPCC, 2001). Ταυτόχρονα, η συγκέντρωση μεθανίου (CH₄) αυξάνεται με ρυθμό 0.02 ppmv το χρόνο και οι ετήσιες πηγές υποξειδίου του αζώτου (N₂O) έχουν αυξηθεί κατά 40-50% σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) αντιδρά με το όζον της στρατόσφαιρας επιδεινώνοντας το φαινόμενο της μείωσης της ζώνης του όζοντος (Portmann et al., 2012). Ενδεχόμενη επίπτωση των μεταβολών που παρατηρούνται είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη που θα οδηγήσει σε ραγδαίες μεταβολές του κλίματος (Gurra et al., 2012).

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια Ε.Ε.Λ. έχουν ως προϊόντα τους το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου. Ο παραγόμενος ρύπος εξαρτάται από την τεχνολογία επεξεργασίας που εφαρμόζεται στην εγκατάσταση. Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2007) η επίδραση μεθανίου στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι 25 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του διοξειδίου του άνθρακα για χρονικό

ορίζοντα 100 ετών, όταν η αντίστοιχη επίδραση του υποξειδίου του αζώτου είναι 298 φορές μεγαλύτερη για ίση χρονική περίοδο (Gurra et al., 2012).

2.3.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Η παραγωγή CO₂ αποδίδεται στις διεργασίες επεξεργασίας και στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, κατά τις αναερόβιες διεργασίες, ο οργανικός άνθρακας των ανεπεξέργαστων λυμάτων είτε καταναλώνεται για την παραγωγή βιομάζας, είτε μετατρέπεται σε CO₂ και CH₄. Ποσοστό της βιομάζας, επίσης μετατρέπεται σε CO₂ και CH₄ μέσω της ενδογενούς αναπνοής. Κατά τις αερόβιες διαδικασίες το CO₂ παράγεται από τη διάσπαση του οργανικού άνθρακα μέσα στο σύστημα ενεργού ιλύος, ενώ μέρος του ρύπου παράγεται στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης. Άλλη πηγή είναι η χώνευση της ιλύος (Gurra et al., 2012).

2.3.3 Μεθάνιο (CH₄)

Η παραγωγή CH₄ συντελείται κατά την αναερόβια διάσπαση λυμάτων και ιλύος και εξαρτάται από την ποσότητα της βιοαποδομήσιμης οργανικής ύλης που περιέχεται στα λύματα, τη θερμοκρασία τους και τον τύπο της επεξεργασίας που εφαρμόζεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση στο ρυθμό παραγωγής του μεθανίου, γεγονός ιδιαίτερης σημασίας ειδικά σε μη ελεγχόμενα συστήματα και σε θερμά κλίματα (Gurra et al., 2012).

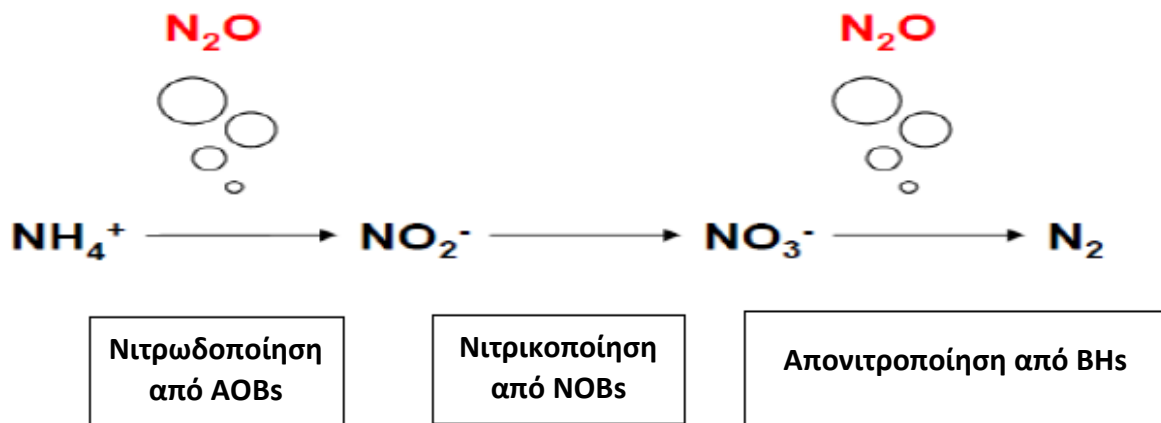
2.3.4 Υποξείδιο του αζώτου (N₂O)

Η παραγωγή του N₂O σχετίζεται με την αποδόμηση των αζωτούχων κλασμάτων των λυμάτων, όπως είναι η ουρία, τα νιτρικά και η πρωτεΐνη. Η συμβατική μέθοδος απομάκρυνσης του αζώτου N από τα ανεπεξέργαστα λύματα πραγματοποιείται μέσω των διεργασιών της νιτροποίησης – απονιτροποίησης. Η νιτροποίηση είναι αερόβια διεργασία κατά την οποία η αμμωνία και άλλα αζωτούχα συστατικά μετατρέπονται σε νιτρικά, ενώ η απονιτροποίηση πραγματοποιείται σε ανοξικές συνθήκες και περιλαμβάνει τη βιολογική μετατροπή των νιτρικών (NO₃) σε αέριο άζωτο (N₂). Μετά την επεξεργασία, η εκροή απορρίπτεται σε υδάτινο αποδέκτη. Οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου προκύπτουν είτε εντός της Ε.Ε.Λ., είτε μέσα στον αποδέκτη, καθώς το συγκεκριμένο αέριο αποτελεί ενδιάμεσο προϊόν και των δύο διεργασιών (Gurra et al., 2012; Massara et al., 2017).

2.3.5 Βιολογική απομάκρυνση αζώτου

2.3.5.1 Εισαγωγή

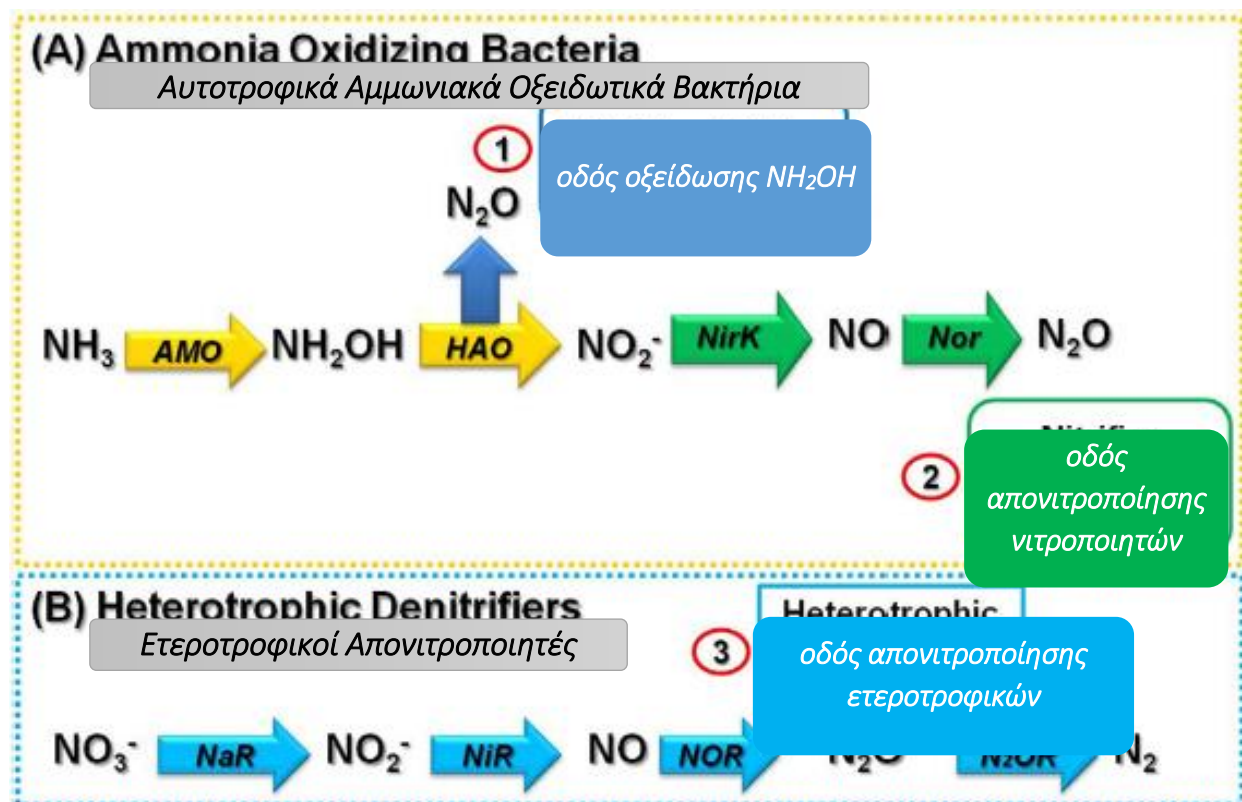
Η συμβατική διαδικασία βιολογικής απομάκρυνσης του αζώτου από τα ανεπεξέργαστα λύματα πραγματοποιείται σε τρία στάδια που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 Παραγωγή N₂O κατά τις διεργασίες απομάκρυνσης του αζώτου (Πηγή: Rocquet, 2015)

Αρχικά το αμμωνιακό άζωτο (NH₄⁺) οξειδώνεται σε νιτρώδες άζωτο (NO₂⁻) από τα αυτοτροφικά αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια (AOB) και στο επόμενο στάδιο οξειδώνεται σε νιτρικό άζωτο (NO₃⁻) από τα αυτοτροφικά νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια (NOB) σε αερόβιο περιβάλλον. Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η διεργασία της νιτροποίησης. Στη συνέχεια ακολουθεί η απονιτροποίηση, σε ανοξικό περιβάλλον, όπου το νιτρικό άζωτο μετατρέπεται σε αέριο άζωτο (N₂) από τα ετεροτροφικά βακτήρια.

Κατά τη βιολογική απομάκρυνση αζώτου παράγεται N₂O όταν λαμβάνουν χώρα οι τρεις (3) κύριες διεργασίες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.11:



Σχήμα 2.11 Παραγωγή N₂O κατά τις διεργασίες απομάκρυνσης του αζώτου (Πηγή: Massara et al., 2017)

- Οξείδωση υδροξυλαμίνης (NH_2OH): Η αμμωνία αρχικά οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη, από το ένζυμο της αμμωνίας μονοοξυγενάση (AMO), η οποία στη συνέχεια καταλύεται σε νιτρικά, από το περιπλασματικό ένζυμο της οξειδοαναγωγής της υδροξυλαμίνης (HAO). Η κατάλυση της υδροξυλαμίνης ολοκληρώνεται σε τρία (3) βήματα που περιλαμβάνουν της οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτροξύλιο (NOH), τη μετατροπή του νιτροξυλίου σε NO και την οξείδωσή του σε νιτρώδη (NO_2^-) (Pocquet, 2015).

Το N_2O παράγεται από την χημική αποσύνθεση του νιτροξυλίου, διεργασία που ονομάζεται «χημική διάσπαση».

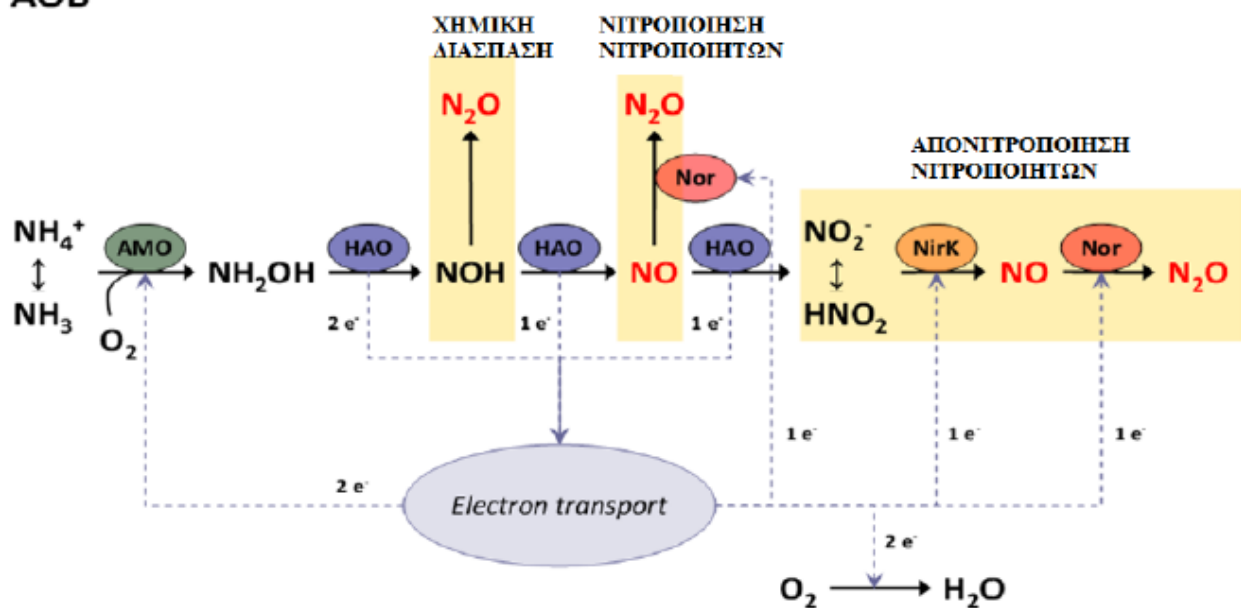
Επιπλέον, κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών η υδροξυλαμίνη μετατρέπεται σε οξείδιο του αζώτου και το NO σε N_2O από το ένζυμο νιτρική οξειδοαναγωγάση (Nor).

- Απονιτροποίηση από τους νιτροποιητές: Η ατελής οξείδωση της υδροξυλαμίνης από το HAO οδηγεί στη συγκέντρωση μονοξειδίου του αζώτου (NO) που στη συνέχεια μετατρέπεται σε υποξείδιο του αζώτου (N_2O) από το ένζυμο νιτρική οξειδοαναγωγάση (Nor).

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί παραγωγής υποξειδίου του αζώτου από τους AOBs.

- Απονιτροποίηση από τα ετεροτροφικά βακτήρια: Τα νιτρικά καταλύονται σε νιτρώδη μέσω της νιτρικής αναγωγής (NiR), στη συνέχεια σε μονοξείδιο του αζώτου μέσω της νιτρώδους αναγωγής (NiR) και, τέλος σε υποξείδιο του αζώτου μέσω της νιτρικής οξειδοαναγωγής (NOR) (Massara et al., 2017).

AOB



Σχήμα 2.12 Σχηματική αναπαράσταση των διεργασιών που επιτελούν οι AOB (Πηγή: Pocquet, 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)

2.3.5.2 Μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών παραγωγής υποξειδίου του αζώτου (N_2O)

Η ανάγκη ποσοτικού υπολογισμού του παραγόμενου υποξειδίου του αζώτου οδήγησε στη μοντελοποίηση των διεργασιών που αναλύθηκαν παραπάνω:

- Χημική διάσπαση: Κατά το μοντέλο, το N_2O παράγεται από τη χημική αποσύνθεση του NOH που αποτελεί παράγωγο της οξειδωσης του NH_2OH σε NO_2^- . Η αύξηση των AOB δεν λαμβάνεται υπόψη, ενώ το οξυγόνο είναι ο περιοριστικός παράγοντας ως δότης ηλεκτρονίων της αντίδρασης.
Οι Πίνακες 2.18 και 2.19 παρουσιάζουν τη στοιχειομετρία και τους ρυθμούς διεργασιών του μοντέλου της χημικής διάσπασης.
- Νιτροποίηση νιτροποιητών: Η NH_4^+ , αρχικά, οξειδώνεται σε NH_2OH , η οποία με τη σειρά της οξειδώνεται σε NO και έπειτα σε NO_2 . Μέρος του NO ανάγεται σε N_2O από το ένζυμο *Nor*, διεργασία που πραγματοποιείται μαζί με την απευθείας οξείδωση της NH_2OH σε NO_2^- . Η υδροξυλαμίνη είναι δότης ηλεκτρονίων, αποβάλλοντας τέσσερα (4) ηλεκτρόνια τα οποία καταναλώνονται από το NO που αποτελεί τον δέκτη ηλεκτρονίων. Όλες οι διεργασίες καταναλώνουν οξυγόνο εκτός της αναγωγής του NO σε N_2O .
Οι Πίνακες 2.20 και 2.21 παρουσιάζουν τη στοιχειομετρία και τους ρυθμούς των διεργασιών του μοντέλου της νιτροποίησης των νιτροποιητών.
- Απονιτροποίηση νιτροποιητών: Η NH_4^+ , αρχικά, οξειδώνεται σε NH_2OH , η οποία με τη σειρά της οξειδώνεται σε NO και έπειτα σε NO_2 με τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων το οξυγόνο. Η ανάπτυξη των AOB συνυπολογίζεται στο συγκεκριμένο μοντέλο. Τα NO_2^- μετατρέπονται σε NO με τη βοήθεια του ενζύμου *NirK* και το NO ανάγεται σε N_2O με το ένζυμο *Nor*.

Οι Πίνακες 2.22 και 2.23 παρουσιάζουν τη στοιχειομετρία και τους ρυθμούς των διεργασιών του μοντέλου της απονιτροποίησης των νιτροποιητών.

- Απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών: Στο μοντέλο ενεργού ιλύος για Άζωτο (ASMN) των Pan et. al (2015), οι διεργασίες οξείδωσης του άνθρακα και της αναγωγής του αζώτου είναι άμεσα συνδεδεμένες, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.13. Ο ρόλος της οξείδωσης του αζώτου έχει δύο πτυχές. Αρχικά, οι σχέσεις μεταξύ των σταθερών, για την πηγή του άνθρακα, μπορεί να διαφέρουν. Δεύτερον, η οξείδωση του άνθρακα υπολογίζεται ως το άθροισμα τεσσάρων βημάτων απονιτροποίησης.

Το μοντέλο θεωρεί ότι ο άνθρακας πάντα καλύπτει τις ανάγκες του μοντέλου σε ηλεκτρόνια, γεγονός που ενδεχομένως να μην ισχύει σε κάθε περίπτωση και κάποια από τα βήματα μπορεί να έχουν διαφορετικά αποτελέσματα στην πραγματικότητα.

Τέλος, ο Πίνακας 2.24 παρουσιάζει τη στοιχειομετρία και τους ρυθμούς των διεργασιών του μοντέλου ASMN.

Πίνακας 2.18 Στοιχειομετρία μοντέλου χημικής διάσπασης (Πηγή: Rosquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)

Διεργασίες	S_{O_2}	S_{NH}	S_{NH_2OH}	S_{NOH}	S_{NO_2}	S_{N_2O}
1	-1	-1	1	1		
2			-1	-1	1	
3				-1		0.5
4						
5	-1					

Πίνακας 2.19 Ρυθμοί διεργασιών μοντέλου χημικής διάσπασης (Πηγή: Rosquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)

Διεργασίες	Κινητικές εξισώσεις
1	$q_{AOB,1,max} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,1}} \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4,AOB}} * X_{AOB}$
2	$q_{AOB,2,max} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,2}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * X_{AOB}$
3	$q_{AOB,3,max} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,3}} \frac{S_{NOH}}{S_{NOH} + K_{NOH,AOB}} * X_{AOB}$
4	$q_{AOB,3,max} * S_{NOH} X_{AOB}$
5	$0.5R_2 + R_3 - R_1$

Πίνακας 2.20 Στοιχειομετρία μοντέλου νιτροποίησης νιτροποιητών (Πηγή: Rosquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)

Διεργασίες	S_{O_2}	S_{NH}	S_{NH_2OH}	S_{NO_2}	S_{NO}	S_{N_2O}	X_{AOB}
1	$-\frac{8}{7}$	-1	1				
2	$-\frac{\frac{12}{7} - Y_{AOB}}{Y_{AOB}}$	$-i_{N,AOB}$	$-\frac{1}{Y_{AOB}}$		$\frac{1}{Y_{AOB}}$		1
3	$-\frac{4}{7}$			1	-1		
4			-1	1	-4	4	

Πίνακας 2.21 Ρυθμοί διεργασιών μοντέλου νιτροποίησης νιτροποιητών (Πηγή: Rocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)

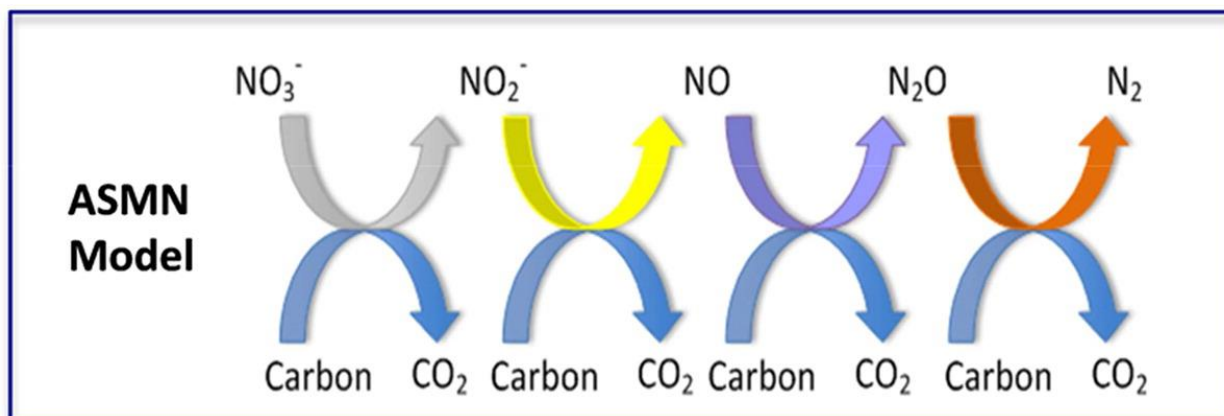
Διεργασίες	Κινητικές εξισώσεις
1	$\mu_{AOB,AMO} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,1}} \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4,AOB}} * X_{AOB}$
2	$\mu_{AOB,HAO,1} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,2}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * X_{AOB}$
3	$\mu_{AOB,HAO,2} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,2}} \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO,AOB}} * X_{AOB}$
4	$n_{AOB} * \mu_{AOB,HAO,1} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO,AOB}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * X_{AOB}$

Πίνακας 2.22 Στοιχειομετρία μοντέλου απονιτροποίησης νιτροποιητών (Πηγή: Rocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)

Διεργασίες	S_{O_2}	S_{NH}	S_{NH_2OH}	S_{NO_2}	S_{NO}	S_{N_2O}	X_{AOB}
1	$-\frac{8}{7}$	-1	1				
2	$-\frac{\frac{16}{7} - Y_{AOB}}{Y_{AOB}}$	$-i_{N,AOB}$	$-\frac{1}{Y_{AOB}}$	$\frac{1}{Y_{AOB}}$			1
3			-1	-3	4		
4			-1	1	-4	4	

Πίνακας 2.23 Ρυθμοί διεργασιών μοντέλου απονιτροποίησης νιτροποιητών (Πηγή: Rocquet et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)

Διεργασίες	Κινητικές εξισώσεις
1	$\mu_{AOB,AMO} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,1}} \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4,AOB}} * X_{AOB}$
2	$\mu_{AOB,HAO} * \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2,AOB,2}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * X_{AOB}$
3	$n_{AOB} * \mu_{AOB,HAO} * \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} \frac{S_{NO_2}}{S_{NO_2} + K_{NO_2,AOB}} * \frac{K_{I,O_2,AOB}}{K_{I,O_2,AOB} + S_{O_2}} X_{AOB}$
4	$n_{AOB} * \mu_{AOB,HAO} * \frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO,AOB}} \frac{S_{NH_2OH}}{S_{NH_2OH} + K_{NH_2OH,AOB}} * \frac{K_{I,O_2,AOB}}{K_{I,O_2,AOB} + S_{O_2}} X_{AOB}$



Σχήμα 2.13 Μοντέλο ASMN (Pan et al., 2015)

Πίνακας 2.24 Στοιχειομετρία και ρυθμοί διεργασιών μοντέλου ASMN (Πηγή: Pan et al., 2015 επεξεργασία από Δημητρίου, 2017)

Διεργασίες	Συστατικά Μοντέλου ASMN						Εξισώσεις	
	S_{NO3}	S_{NO2}	S_{NO}	S_{N2O}	S_{N2}	S_S		X
R1	-A	+A				$\frac{1}{Y_H * \eta_Y}$	1	$\mu_H * n_{g1} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_{S1}}\right) * \left(\frac{S_{NO3}}{S_{NO3} + K_{NO3}^{HB}}\right)$
R2		-B	+B			$\frac{1}{Y_H * \eta_Y}$	1	$\mu_H * n_{g2} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_{S2}}\right) * \left(\frac{S_{NO2}}{S_{NO2} + K_{NO2}^{HB}}\right) * \left(\frac{K_{NO,2}}{S_{NO} + K_{NO,2}}\right)$
R3			-B	+B		$\frac{1}{Y_H * \eta_Y}$	1	$\mu_H * n_{g3} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_{S3}}\right) * \left(\frac{S_{NO}}{S_{NO} + K_{NO}^{HB} + S_{NO}^2/K_{NO3}}\right)$
R4				-B	+B	$\frac{1}{Y_H * \eta_Y}$	1	$\mu_H * n_{g4} * X * \left(\frac{S_S}{S_S + K_{S4}}\right) * \left(\frac{S_{N2O}}{S_{N2O} + K_{N2O}^{HB}}\right) * \left(\frac{K_{NO,4}}{S_{NO} + K_{NO,4}}\right)$

$$A = \frac{1 - Y_H * n_Y}{1.143 Y_H * n_Y} \quad B = \frac{1 - Y_H * n_Y}{0.571 + Y_H * n_Y}$$

Κεφάλαιο 3: Μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) με απομάκρυνση Θρεπτικών

3.1 Εισαγωγή

Η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα που περιλαμβάνει μονάδες πρωτοβάθμιας/δευτεροβάθμιας καθίζησης, βιολογικό αντιδραστήρα, αναερόβιο χωνευτή, παχυντές βαρύτητας/μηχανικούς, συστήματα αφυδάτωσης και άλλες υπομονάδες, των οποίων η συνδυασμένη λειτουργία στοχεύει στην επεξεργασία των εισερχόμενων λυμάτων, τη διαχείριση και επεξεργασία της παραγόμενης ιλύος, των επεξεργασμένων λυμάτων και των παραγόμενων στραγγιδίων. Κάθε σύστημα λειτουργεί και ελέγχεται τόσο ως μεμονωμένη διαδικασία, όσο και ως μέρος της συνολικής εγκατάστασης η οποία παρακολουθείται μέσω εποπτικών συστημάτων που λαμβάνουν και επεξεργάζονται δεδομένα για όλες τις βιολογικές διεργασίες και τις φυσικοχημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα εντός των δεξαμενών του συστήματος και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους συστημάτων.

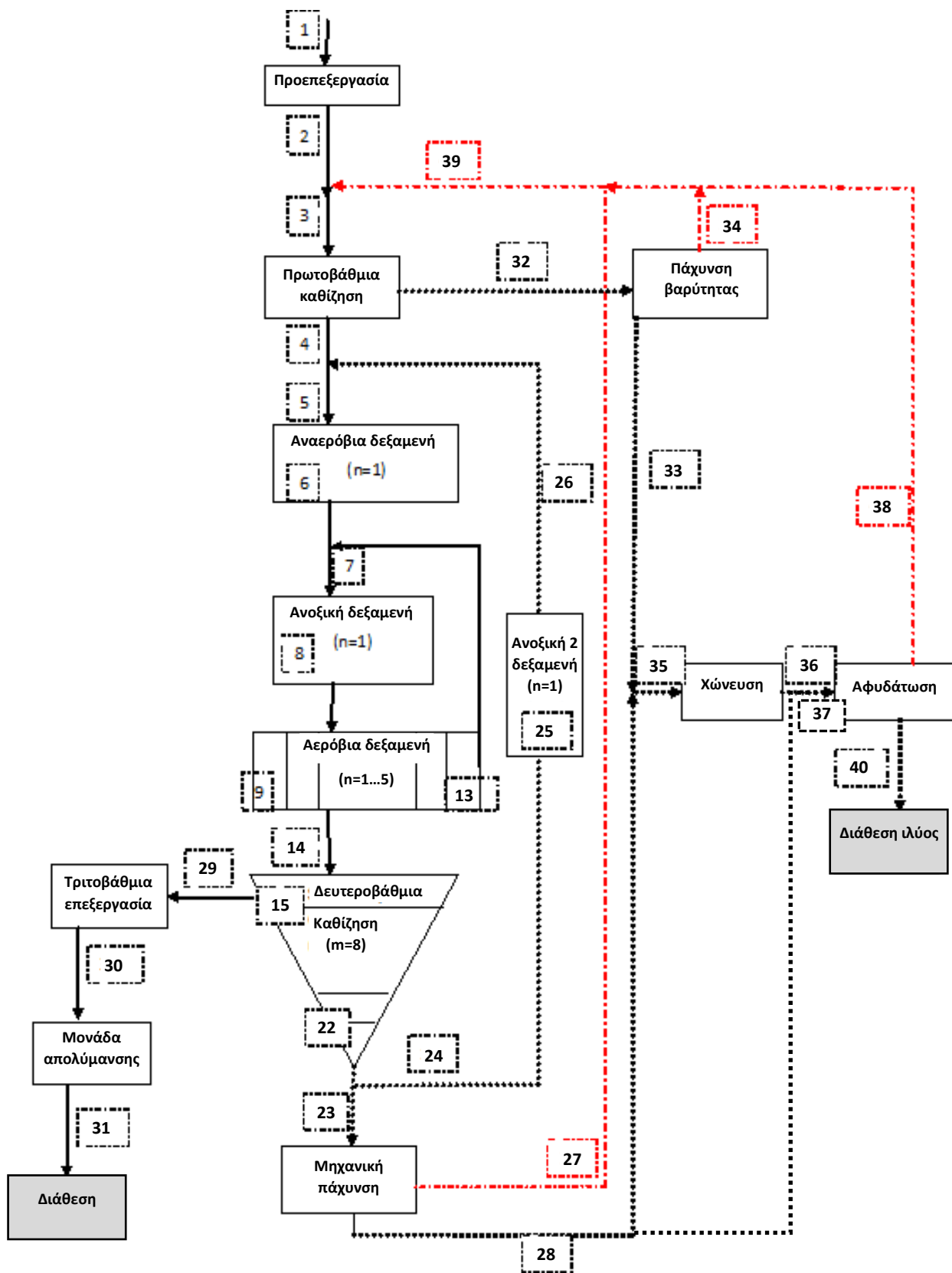
Ταυτόχρονα, οι εισερχόμενες παροχές και τα φορτία παρουσιάζουν έντονη μεταβλητότητα στο χρόνο, κατά τρόπο που τόσο η ίδια η σύσταση, όσο και οι μάζες των συστατικών των λυμάτων που καλείται μια εγκατάσταση να επεξεργαστεί και να διαχειριστεί, είναι ασταθείς και αβέβαιες. Παρόλα αυτά το αποτέλεσμα της επεξεργασίας πρέπει να είναι σταθερό και οι επεξεργασμένες ροές να ανταποκρίνονται στα όρια της νομοθεσίας πληρώντας τα χαρακτηριστικά ποιότητας που προβλέπονται.

Πέραν της ανάγκης συμμόρφωσης με τα προβλεπόμενα από τη νομοθεσία κριτήρια, μια εγκατάσταση μπορεί να επιτελέσει πολλαπλούς σκοπούς, η επίτευξη των οποίων στηρίζεται στην ανάπτυξη και εφαρμογή προτύπων λειτουργίας και καινοτόμων στρατηγικών ελέγχου. Η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους και της παραγόμενης ιλύος, η μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου, η μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και η ενεργειακή αυτονομία της εγκατάστασης είναι μερικά από τα σενάρια, στα οποία ενδεχομένως να δοκιμαστεί η λειτουργία της ΕΕΛ και να αξιολογηθεί η ποιότητα των εκροών ταυτόχρονα με την επίτευξη των στόχων. Η διαδικασία αυτή απαιτεί την εφαρμογή μοντέλων προσομοίωσης και την εις βάθος γνώση του τρόπου που ανταποκρίνεται το σύστημα στις μεταβολές των παραμέτρων του.

Για το σκοπό αυτό, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εφαρμόστηκε το μοντέλο των Σαραντόπουλου (2015) και Koumakı et al. (2017), το οποίο αναπτύχθηκε για τις ερευνητικές ανάγκες του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας και το οποίο βασίστηκε στο ASM1 για την προσομοίωση των διεργασιών του βιοαντιδραστήρα και την απομάκρυνση αζώτου. Το μοντέλο ενσωματώνει κατάλληλες εξισώσεις για τον υπολογισμό των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου, υπολογίζει τη ζήτηση οξυγόνου στο σύστημα και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Επιπλέον, για την προσομοίωση των διεργασιών του αναερόβιου χωνευτή χρησιμοποιεί το μοντέλο που ανέπτυξε ο Κόκκινος (2015), αντί του συμβατικού ADM1 μοντέλου.

Σημειώνεται ότι, η διάταξη και τα χαρακτηριστικά των μονάδων της προσομοιούμενης ΕΕΛ, τα ισοζύγια μαζών για την προσομοίωση της πρωτοβάθμιας καθίζησης και της γραμμής επεξεργασίας της λύσης και οι εξισώσεις προσομοίωσης της λειτουργίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και της κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και οι εξισώσεις υπολογισμού δεικτών και εκτίμησης απόδοσης έχουν ληφθεί από το μοντέλο των Σαραντόπουλου (2015) και Koumaki et al. (2017).

Το Σχήμα 3.1 αναπαριστά τη δομή της ΕΕΛ σύμφωνα με το μοντέλο.



Σχήμα 3.1 Διάταξη εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων και θέσεις υπολογισμού των μεταβλητών του μοντέλου (Πηγή: Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία)

3.2 Μεταβλητές μοντέλου

Σύμφωνα με την Ομάδα Εργασίας της Διεθνούς Ένωσης για το Νερό (IAWQ), οι μεταβλητές του μοντέλου συμβολίζονται με S για τα διαλυτά συστατικά και με X για τα σωματιδιακά συστατικά, ενώ χρησιμοποιούνται οι δείκτες B , S , O για τη βιομάζα, την τροφή και το οξυγόνο αντίστοιχα όπως αναλύονται παρακάτω:

- S_i : Αδρανής διαλυτή οργανική ύλη. Το κύριο χαρακτηριστικό του S_i είναι ότι πρόκειται για οργανικό υλικό το οποίο δεν μπορεί να αποδομηθεί περαιτέρω στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Αποτελεί συστατικό των εισερχόμενων λυμάτων και θεωρείται ότι ούτε παράγεται, ούτε καταναλώνεται στο παρόν σύστημα αλλά υπολογίζεται ως ποσοστό του συνολικού COD στην έξοδο.
- S_s : Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη. Θεωρείται ως διαλυμένη και συνίσταται από σχετικά απλά μόρια τα οποία μπορούν να εισέλθουν στο κύτταρο και να προσληφθούν άμεσα από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Συνδέεται με την ανάπτυξή τους, είτε σε αερόβιες, είτε σε ανοξικές συνθήκες.
- X_i : Αδρανής σωματιδιακή οργανική ύλη. Πρόκειται για υλικό που δεν βιοαποδομείται εντός του συστήματος ενδιαφέροντος, αλλά κροκιδώνεται στην ενεργό ιλύ. Το X_i αποτελεί κλάσμα των εισερχόμενων λυμάτων και απομακρύνεται από το σύστημα ως μέρος της απομακρυνθείσας ιλύος. Συμπεριλαμβάνονται τα σωματιδιακά προϊόντα λόγω φθοράς των μικροοργανισμών, X_p .
- X_s : Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη. Θεωρείται ως σωματιδιακή και αποτελείται από σχετικά σύνθετα μόρια, τα οποία για να εισέλθουν στο κύτταρο υφίστανται ενζυματική δράση εξωκυτταρικά και μετατρέπονται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη ύλη S_s για να καταναλωθούν. Παράγεται από τη φθορά των μικροοργανισμών.
- X_{BH} : Ετεροτροφική βιομάζα. Πρόκειται για μικροοργανισμούς που διαβιούν και αναπτύσσονται αερόβια και ανοξικά, κάνοντας απονιτροποίηση. Καταναλώνουν την εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη S_s για να αναπτυχθούν και φθείρονται κατά την αποσύνθεση.
- X_{AOB} : Αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια. Πρόκειται για μικροοργανισμούς που παράγονται κάτω από αερόβιες συνθήκες, κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου και καταναλώνονται λόγω της αποσύνθεσής τους. Είναι απαραίτητοι στη μετατροπή της αμμωνίας σε διοξείδιο του αζώτου.
- X_{NOB} : Νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια. Είναι μικροοργανισμοί απαραίτητοι για τη μετατροπή του διοξειδίου του αζώτου σε νιτρικά. Καταναλώνονται λόγω της αποσύνθεσής τους.

- S_O : Διαλυμένο οξυγόνο. Καταναλώνεται κατά την αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικών και ετεροτροφικών μικροοργανισμών.
- S_{N_2} : Αέριο άζωτο. Παράγεται από την αντίδραση του υποξειδίου του αζώτου (S_{N_2O}) με το ένζυμο της αναγωγής του υποξειδίου του αζώτου (N_2OR).
- S_{NH} : Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο. Περιλαμβάνει την αμμωνία (NH_3) και το αμμώνιο (NH_4^+). Καταναλώνεται για τη σύνθεση ετεροτροφικών και αυτοτροφικών μικροοργανισμών υπό αερόβιες και ανοξικές συνθήκες, καθώς και κατά τη νιτροποίηση.
- S_{NO} : Μονοξείδιο του αζώτου. Παράγεται κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης (S_{NH_2OH}) και μέσω της αντίδρασης των νιτρωδών (S_{NO_2}) με το ένζυμο της νιτρώδους αναγωγάσεως (Nirk). Καταναλώνεται κατά την παραγωγή του υποξειδίου του αζώτου (S_{N_2O}).
- S_{NO_2} : Νιτρώδες άζωτο. Παράγεται κατά την απονιτροποίηση, την οξείδωση της υδροξυλαμίνης (S_{NH_2OH}) και την οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου (S_{NO}). Καταναλώνεται κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών, την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών και των νιτροποιητών (X_{NOB}).
- S_{NO_3} : Νιτρικό άζωτο. Το S_{NO_3} καταναλώνεται κατά την απονιτροποίηση και παράγεται κατά την ανάπτυξη των νιτροποιητών (X_{NOB}).
- S_{N_2O} : Υποξείδιο του αζώτου. Παράγεται, όπως προαναφέρθηκε, από τρεις κύριες διεργασίες, την οξείδωση της υδροξυλαμίνης (S_{NH_2OH}), την απονιτροποίηση των νιτροποιητών και την απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Καταναλώνεται κατά την παραγωγή αερίου αζώτου (S_{N_2}).
- S_{NH_2OH} : Υδροξυλαμίνη. Παράγεται κατά την οξείδωση της αμμωνίας (S_{NH}) και καταναλώνεται καθώς οξειδώνεται σε μονοξείδιο του αζώτου (S_{NO}).
- S_{ALK} : Αλκαλικότητα των λυμάτων. Η αλκαλικότητα χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει τη διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου στις βιολογικές αντιδράσεις. Αποτελεί ένδειξη ενδεχόμενων καταστάσεων χαμηλού pH που επιφέρουν αναστολή σε συγκεκριμένες διεργασίες, όπως είναι η νιτροποίηση που αφαιρεί αλκαλικότητα από το σύστημα.
- X_{NV} : Σωματιδιακές ανόργανες ενώσεις. Οι ανόργανες ενώσεις δεν συμμετέχουν σε καμία βιολογική διεργασία, συμπεριφέρονται όπως η αδρανής σωματιδιακή ύλη X_i και απομακρύνονται από το σύστημα μέσω της περίσσειας ιλύος. Η προσθήκη τους έχει ως σκοπό την προσομοίωση των ανόργανων ενώσεων που εισέρχονται στο σύστημα μέσω των ανεπεξέργαστων λυμάτων.
- X : Σωματιδιακή ύλη σε όρους COD. Πρόκειται για τα αιωρούμενα στερεά του συστήματος που εκφράζονται σε όρους COD και υπολογίζονται ως το άθροισμα όλων

των σωματιδιακών μεταβλητών που εκφράζονται στους ίδιους όρους. Ακολουθεί η εξίσωση υπολογισμού του X:

$$X = X_S + X_{BH} + X_{AOB} + X_{NOB} + X_I$$

- VSS : Πτητικά αιωρούμενα στερεά σε όρους COD. Πρόκειται για το άθροισμα των οργανικών στερεών και υπολογίζονται μέσω της σχέσης που συνδέει τα πτητικά αιωρούμενα στερεά με το COD, $1.42 \text{ gr}^{\text{COD}}/\text{grVSS}$:

$$VSS = \frac{X_S + X_{BH} + X_{AOB} + X_{NOB} + X_I}{1.42}$$

- TSS : Ολικά αιωρούμενα στερεά. Πρόκειται για το άθροισμα των πτητικών αιωρούμενων στερεών (VSS) και της ανόργανης σωματιδιακής ύλης (X_{NV}).

$$TSS = VSS + X_{NV}$$

Ο Πίνακας 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζει όλες τις μεταβλητές του μοντέλου,

Πίνακας 3.1 Μεταβλητές του μοντέλου προσομοίωσης

α/α	Συστατικά i	Ορισμός
1	S_i	Αδρανής Διαλυτή Οργανική Ύλη
2	S_s	Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Διαλυτή Οργανική Ύλη
3	X_i	Αδρανής Σωματιδιακή Οργανική Ύλη
4	X_s	Αργά Βιοδιασπάσιμη Σωματιδιακή Οργανική Ύλη
5	X_{BH}	Ετεροτροφική Βιομάζα
6	X_{AOB}	Αμμωνιακά Οξειδωτικά Βακτήρια
7	X_{NOB}	Νιτρικά Οξειδωτικά Βακτήρια
8	S_o	Διαλυμένο Οξυγόνο
9	S_{N_2}	Αέριο Άζωτο
10	S_{NH}	Διαλυμένο Αμμωνιακό Άζωτο
11	S_{NO}	Μονοξείδιο του Αζώτου
12	S_{NO_2}	Νιτρώδες Άζωτο
13	S_{NO_3}	Νιτρικό Άζωτο
14	S_{N_2O}	Υποξείδιο του Αζώτου
15	S_{NH_2OH}	Υδροξυλαμίνη
16	S_{ALK}	Αλκαλικότητα
17	X_{NV}	Σωματιδιακές Ανόργανες Ενώσεις
18	X	Σωματιδιακή Ύλη (COD)
19	VSS	Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά
20	TSS	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά

3.3 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

3.3.1 Εισαγωγή

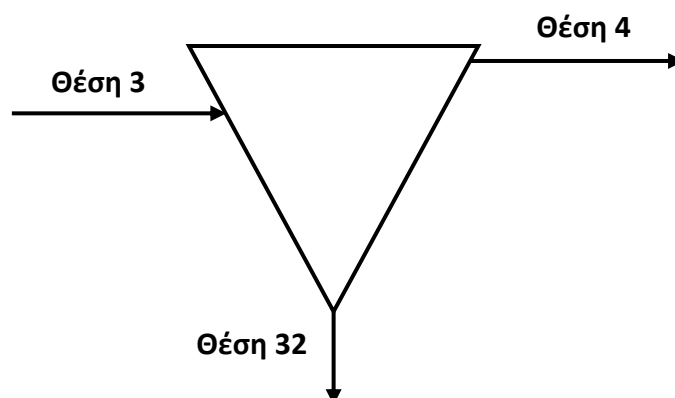
Η πρωτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων ακολουθεί το στάδιο της προεπεξεργασίας. Οι συνθήκες σχετικής ηρεμίας που επικρατούν στη δεξαμενή επιτρέπουν την απομάκρυνση ενός ποσοστού των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων που έχουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο του νερού αλλά λόγω της ροής των λυμάτων παραμένουν σε αιώρηση. Τα αιωρούμενα σωματίδια εάν δεν απομακρυνθούν έγκαιρα κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία θα επιβαρύνουν τα επόμενα στάδια της επεξεργασίας επιφέροντας επιδείνωση της ποιότητας εκροής και αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης του βιοαντιδραστήρα.

Κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία τα προεπεξεργασμένα λύματα παραμένουν στις Δεξαμενές Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ) όπου μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων καθιζάνει υπό την επίδραση της βαρύτητας και απομακρύνεται μαζί με μέρος του οργανικού φορτίου των λυμάτων το οποίο βρίσκεται σε σωματιδιακή μορφή.

Στο τέλος της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας από τα προεπεξεργασμένα λύματα έχει καθιζάνει μέρος των αιωρούμενων οργανικών και ανόργανων στερεών, τα οποία απομακρύνονται υπό τη μορφή πρωτοβάθμιας ιλύος συγκέντρωσης 1,5-2%, και τα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα υπερχειλίζουν από την ΔΠΚ με κατεύθυνση το βιοαντιδραστήρα.

3.3.2 Προσομοίωση δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης (ΔΠΚ)

Η προσομοίωση της πρωτοβάθμιας καθίζησης επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της εξίσωσης ισορροπίας μάζας στη ΔΠΚ (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2 Θέσεις εισόδου και εξόδου, λυμάτων και ιλύος δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης (Πηγή: Σαραντόπουλος, 2015 και Koumaki et al., 2017)

3.3.2.1 Θέση 32 – έξοδος πρωτοβάθμιας ιλύος

Στη ΔΠΚ θεωρείται ότι επιτυγχάνεται ένας σταθερός βαθμός απομάκρυνσης στερεών μέσω της καθίζησης, $s_r = 50\%$, που αποτελεί παράμετρο του συστήματος. Η μάζα της πρωτοβάθμιας

ιλύος που απομακρύνεται από τον πυθμένα της δεξαμενής υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$M_{TSS}(32) = \frac{s_r \cdot M_{TSS}(3)}{100}$$

Θεωρώντας ότι η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών στην πρωτοβάθμια ιλύ εκφράζεται ως $C_{prim} = 15 \text{ kg/m}^3$, η παροχή της ιλύος υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(32) = \frac{M_{TSS}(32)}{C_{prim}}$$

Κατ' αντιστοιχία υπολογίζονται η μάζα και η συγκέντρωση όλων των σωματιδιακών συστατικών:

$$M_{Xi}(32) = \frac{s_r \cdot M_{Xi}(3)}{100}$$

$$Xi(32) = \frac{M_{Xi}(32)}{Q(32)}$$

Για την περίπτωση των διαλυτών συστατικών, οι συγκεντρώσεις τους στην ιλύ παραμένουν αμετάβλητες και είναι ίσες με τις συγκεντρώσεις που εισέρχονται με τα προεπεξεργασμένα λύματα. Η μάζα κάθε διαλυτού συστατικού που απομακρύνεται με την πρωτοβάθμια ιλύ υπολογίζεται βάσει της παροχής της ιλύος.

Οι παρακάτω εξισώσεις ισχύουν για όλα τα διαλυτά συστατικά, σημειώνοντας ότι για τη μεταβλητή της αλκαλικότητας δεν υπολογίζουμε μάζα αλλά μόνο τη συγκέντρωσή της.

$$Si(32) = Si(3)$$

$$M_{Si}(32) = Si(32) \cdot Q(32)$$

3.3.2.2 Θέση 4 – έξοδος πρωτοβάθμιων επεξεργασμένων λυμάτων

Η παροχή των πρωτοβάθμιων επεξεργασμένων λυμάτων που υπερχειλίζει από τη ΔΠΚ υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(4) = Q(3) - Q(37)$$

Για τη μάζα και τη συγκέντρωση των σωματιδιακών συστατικών ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_{Xi}(4) = M_{Xi}(3) - M_{Xi}(37)$$

$$Xi(4) = \frac{M_{Xi}(4)}{Q(4)}$$

Σχετικά με τα διαλυτά συστατικά, όπως και στην πρωτοβάθμια ιλύ, οι συγκεντρώσεις στα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα δεν μεταβάλλονται και κατά συνέπεια η συγκέντρωση και η μάζα τους υπολογίζονται με τις ίδιες εξισώσεις.

$$Si(4) = Si(3)$$

$$M_{Si(4)} = Si(4) \cdot Q(4)$$

3.4 Βιολογικός αντιδραστήρας

3.4.1 Εισαγωγή

Ο βιολογικός αντιδραστήρας αποτελεί το επόμενο στάδιο επεξεργασίας μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Για την προσομοίωση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο βιολογικό αντιδραστήρα εφαρμόστηκε ένα μοντέλο ενεργού ιλύος το οποίο αποτελεί τροποποίηση του Μοντέλου Ενεργού Ιλύος Νο. 1 (ASM1).

Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί μια πρόταση για τη δυναμική προσομοίωση συνδυασμού βιολογικών διεργασιών και τον υπολογισμό του COD, της απομάκρυνσης αζώτου και της παραγωγής αερίων του θερμοκηπίου.

3.4.2 Διεργασίες μοντέλου

Οι διεργασίες του τροποποιημένου ASM1 είναι οι ακόλουθες:

1. Διεργασίες υδρόλυσης:
 - Διεργασία 1 – αερόβια υδρόλυση
 - Διεργασίες 2 & 3 – ανοξική υδρόλυση παρουσία νιτρικών (S_{NO3}) & νιτρωδών (S_{NO2}), αντίστοιχα
 - Διεργασία 4 – αναερόβια υδρόλυση
2. Διεργασίες ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_{BH}):
 - Διεργασία 5 – αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_{BH})
 - Διεργασία 6 – απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_{BH})
 - Διεργασίες 7, 8 & 9 – ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών που περιλαμβάνει τη μετατροπή των νιτρωδών (S_{NO2}) σε μονοξείδιο του αζώτου (S_{NO}), του μονοξειδίου του αζώτου (S_{NO}) σε υποξείδιο του αζώτου (S_{N2O}) και του τελευταίου σε αέριο άζωτο (S_{N2})
 - Διεργασία 10 – αποσύνθεση ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_{BH})
3. Διεργασίες αμμωνιακών οξειδωτικών βακτηρίων (X_{AOB}):
 - Διεργασία 11 – οξείδωση αμμωνίας (S_{NH}) σε υδροξυλαμίνη (S_{N2OH})
 - Διεργασία 12 – οξείδωση υδροξυλαμίνης (S_{N2OH}) σε μονοξείδιο του αζώτου (S_{NO})
 - Διεργασία 13 – οξείδωση μονοξειδίου του αζώτου (S_{NO}) σε νιτρώδη (S_{NO2})
 - Διεργασία 14 – αναγωγή μονοξειδίου του αζώτου (S_{NO}) σε υποξείδιο του αζώτου (S_{N2O})
 - Διεργασία 15 – αναγωγή νιτρωδών (S_{NO2}) σε υποξείδιο του αζώτου (S_{N2O})
 - Διεργασία 17 – αποσύνθεση νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (X_{AOB})
4. Διεργασίες νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (X_{NOB}):
 - Διεργασία 16 – αερόβια ανάπτυξη νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (X_{NOB})
 - Διεργασία 18 – αποσύνθεση νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (X_{NOB})

3.4.3 Συντελεστές και παράμετροι του μοντέλου

Στο μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιούνται εξηνταεπτά (67) στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι, οι τιμές των οποίων συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.2. Οι τιμές των παραμέτρων έχουν προκύψει από τη διεθνή βιβλιογραφία και προηγούμενες εφαρμογές του μοντέλου.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των παραμέτρων αντιστοιχούν σε θερμοκρασία λυμάτων 20°C.

- Y_h, Y_{AOB}, Y_{NOB}: Συντελεστές απόδοσης ετεροτροφικής, αυτοτροφικής και νιτρικής βιομάζας, αντίστοιχα. Εκφράζουν το κλάσμα των ετεροτροφικών, αυτότροφων και νιτρικοποιητών μικροοργανισμών που συντίθενται σε σχέση με την βιοδιασπάσιμη ύλη που καταναλώνεται. Ο συντελεστής Y_{AOB} είναι πολύ μικρότερος από τον Y_h, ενώ ο Y_{NOB} είναι μικρότερος και από τους προηγούμενους δύο.
- f_p: Κλάσμα αδρανούς COD που δημιουργείται από τη λύση της βιομάζας.
- I_{xb}, i_{xp}: Κλάσμα αζώτου στη βιομάζα και τα αδρανή στερεά.
- i_{NXS}, i_{NSF}, i_{NSI}: Κλάσμα αζώτου στην αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή, στην εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή και στην αδρανή διαλυτή οργανική ύλη.
- i_{PXS}, i_{PSF}, i_{PXI}, i_{PSI}, i_{PBM}: Κλάσμα φωσφόρου στην αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή, στην εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή, στην αδρανή σωματιδιακή, στην αδρανή διαλυτή οργανική ύλη και στη βιομάζα.
- f_{SI}: Κλάσμα αδρανούς διαλυμένης οργανικής ύλης από υδρόλυση. Για το εν λόγω μοντέλο θεωρείται μηδενική η ποσότητα της αδρανούς οργανικής ύλης που προκύπτει από την υδρόλυση.
- n_G: Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Μειώνει το ρυθμό της διεργασίας ανοξικής ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Στο συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει την τιμή 1.0, θεωρώντας ότι ο ρυθμός είναι ίδιος σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες.
- m_H, m_{AOBHAO}, m_{NOB}: Μέγιστοι ρυθμοί ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών X_{BH}, αυτοτροφικών μικροοργανισμών X_{AOB} και νιτροποιητικών μικροοργανισμών X_{NOB}. Η τιμές τους εξαρτώνται από τη θερμοκρασία των λυμάτων. Για τους αυτοτροφικούς και τους νιτρικοποιητές οι τιμές των ρυθμών ανάπτυξης είναι ίσες και σημαντικά μικρότερες από εκείνη των ετεροτροφικών.
- b_H, b_{AOB}, b_{NOB}: Ρυθμοί αποσύνθεσης ετεροτροφικών μικροοργανισμών X_{BH}, αυτοτροφικών μικροοργανισμών X_{AOB} και νιτροποιητικών μικροοργανισμών X_{NOB}. Οι τιμές επηρεάζονται μόνο από τη θερμοκρασία των λυμάτων.
- K_H: Μέγιστος ρυθμός υδρόλυσης. Επηρεάζεται από τη θερμοκρασία.

- Ks: Συντελεστής ημικορεσμού ετεροτροφικής βιομάζας. Εξαρτάται από τη σύσταση των λυμάτων και την τεχνολογία των βιοαντιδραστήρων.
- KOH, KNO₃, KNO₂, K₂NH: Συντελεστές ημικορεσμού οξυγόνου O₂, νιτρικού αζώτου NO₃-N, νιτρώδους αζώτου NO₂-N, αμμωνιακού αζώτου NH₃-N. Αποτελούν 'διακόπτες' της προσομοίωσης καθώς αναστέλλουν την αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών όταν απουσιάζει το διαλυμένο οξυγόνο στο σύστημα και τις διεργασίες που ρυθμίζονται από την παρουσία νιτρικού αζώτου NO₃-N, νιτρώδους αζώτου NO₂-N και αμμωνιακού αζώτου NH₃-N, αντίστοιχα.
- KX: Συντελεστής ημικορεσμού υδρόλυσης αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης.
- nNO₃H, nNO₂H: Διορθωτικοί συντελεστές για την ανοξική υδρόλυση παρουσία νιτρικών NO₃ και νιτρωδών NO₂. Μειώνει το ρυθμό της υδρόλυσης, σε σχέση με τις αερόβιες συνθήκες, όταν πραγματοποιείται σε ανοξικό περιβάλλον με νιτρικά και νιτρώδη, αντίστοιχα.
- nfe: Διορθωτικός συντελεστής για την αναερόβια υδρόλυση. Μειώνει το ρυθμό της υδρόλυσης, σε σχέση με τις αερόβιες συνθήκες, όταν πραγματοποιείται σε αναερόβιο περιβάλλον.
- Kp: Συντελεστής ημικορεσμού φωσφορικών PO₄.
- kALK: Συντελεστής ημικορεσμού αλκαλικότητας.
- nNO₃D, nG₃, nG₄, nG₅: Διορθωτικοί συντελεστές για την ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικής βιομάζας. Ο nNO₃D μειώνει το ρυθμό της διεργασίας απονιτροποίησης, ο nG₃ μειώνει το ρυθμό μετατροπής των νιτρωδών NO₂ σε μονοξείδιο του αζώτου NO, ο nG₄ μειώνει το ρυθμό μετατροπής του μονοξειδίου του αζώτου NO σε υποξείδιο του αζώτου N₂O και ο nG₅ μειώνει το ρυθμό μετατροπής του υποξειδίου του αζώτου N₂O σε αέριο άζωτο N₂.
- kOH₃, kOH₄, kOH₅: Συντελεστές ημικορεσμού, στην ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών, του οξυγόνου O₂ κατά τη μετατροπή νιτρώδους NO₂ σε μονοξείδιο του αζώτου NO, μονοξειδίου του αζώτου NO σε υποξείδιο του αζώτου N₂O και υποξειδίου του αζώτου N₂O σε αέριο άζωτο N₂ αντίστοιχα.
- KNOD, kNO₂D, KN₂OD: Συντελεστές ημικορεσμού, στην ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών, των μονοξειδίου του αζώτου NO, νιτρώδους NO₂ και υποξειδίου του αζώτου κατά τη μετατροπή μονοξειδίου του αζώτου NO σε νιτρώδες NO₂, νιτρώδους NO₂ σε μονοξείδιο του αζώτου NO και νιτρώδους NO₂ σε αέριο άζωτο N₂ αντίστοιχα.

- ks3, Ks4, Ks5: Συντελεστές ημικορεσμού οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή νιτρώδους NO₂ σε μονοξειδίου του αζώτου NO μονοξειδίου του αζώτου NO σε υποξείδιο του αζώτου N₂O και υποξειδίου του αζώτου N₂O σε αέριο άζωτο N₂ αντίστοιχα.
- Ki3NO, Ki4NO, Ki5NO: Συντελεστές ημικορεσμού μονοξειδίου του αζώτου NO κατά τη μετατροπή νιτρώδους NO₂ σε μονοξειδίου του αζώτου NO μονοξειδίου του αζώτου NO σε υποξείδιο του αζώτου N₂O και υποξειδίου του αζώτου N₂O σε αέριο άζωτο N₂ αντίστοιχα.
- qAOB_{amo}: Μέγιστος ρυθμός οξειδωσης αμμωνίας NH₃ σε υδροξυλαμίνη NH₂OH από το ένζυμο μονοοξυγενάση AMO.
- kOHAOB₁, kNHAOB: Συντελεστές ημικορεσμού οξυγόνου O₂ και αμμωνίας NH₃ κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης NH₂OH από το ένζυμο μονοοξυγενάση AMO.
- kNOAONHAO: Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά την αντίδραση με το HAO.
- qAOBH_{AO}: Μέγιστος ρυθμός κατάλυσης της υδροξυλαμίνης NH₂OH σε νιτρικά NO₃ από το ένζυμο οξειδοαναγωγή HAO. Η διεργασία απαιτεί τρία (3) βήματα.
- kOHAOB₂, kNH₂OHAOB: Συντελεστές ημικορεσμού οξυγόνου O₂ και αμμωνίας NH₃ κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης με το HAO.
- qAOBN₂ONN: Μέγιστος ρυθμός παραγωγής υποξειδίου του αζώτου N₂O κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών NN.
- kNOAONN: Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών NN.
- kHNO₂AOB, kOHAOBND: Συντελεστές ημικορεσμού νιτρώδους οξέως HNO₂ και οξυγόνου O₂ κατά τη απονιτροποίηση των νιτροποιητών.
- kOHNOB, kNO₂NOB, kpNOB, kALKNOB: Συντελεστές ημικορεσμού οξυγόνου O₂, νιτρωδών NO₂, φωσφόρου P και αλκαλικότητας για την ανάπτυξη των νιτροποιητικών μικροοργανισμών.
- qAOBN₂OND: Μέγιστος ρυθμός παραγωγής υποξειδίου του αζώτου N₂O κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών NN.
- kiOHAOB: Σταθερά αναστολής υποξειδίου του αζώτου N₂O λόγω παρουσίας οξυγόνου O₂.

Πίνακας 3.2 Ερμηνεία και τιμές στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων μοντέλου

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
1	Yh	Συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας (βιομάζα/τροφή)	0,6000	grCOD*(grCOD) ⁻¹
2	YAOB	Συντελεστής απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας (βιομάζα/τροφή)	0,1800	grCOD*(grN) ⁻¹
3	YNOB	Συντελεστής απόδοσης νιτρικής βιομάζας (βιομάζα/τροφή)	0,1500	grCOD*(grN) ⁻¹
4	fp	Κλάσμα αδρανούς COD που δημιουργείται από τη λύση της βιομάζας	0,0800	grCOD*(grCOD) ⁻¹
5	ixb	Κλάσμα αζώτου στη βιομάζα	0,0860	grN*(grCOD) ⁻¹
6	ixp	Κλάσμα αζώτου στα αδρανή στερεά	0,0100	grN*(grCOD) ⁻¹
7	iNXS	Κλάσμα αζώτου στην αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη	0,0400	grN*(grCOD) ⁻¹
8	iNSF	Κλάσμα αζώτου στην εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη	0,0300	grN*(grCOD) ⁻¹
9	iNSI	Κλάσμα αζώτου στην αδρανή διαλυτή οργανική ύλη	0,0100	grN*(grCOD) ⁻¹
10	iPXS	Κλάσμα φωσφόρου στην αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη	0,0100	grP*(grCOD) ⁻¹
11	iPSF	Κλάσμα φωσφόρου στην εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη	0,0100	grP*(grCOD) ⁻¹
12	iPXI	Κλάσμα φωσφόρου στην αδρανή διαλυτή οργανική ύλη	0,0100	grP*(grCOD) ⁻¹
13	iPBM	Κλάσμα φωσφόρου στη βιομάζα	0,0200	grP*(grCOD) ⁻¹
14	iPSI	Κλάσμα φωσφόρου στην αδρανή διαλυτή οργανική ύλη	0,0000	grP*(grCOD) ⁻¹
15	fSI	Κλάσμα αδρανούς διαλυμένης οργανικής ύλης από υδρόλυση	0,0000	grCOD*(grCOD) ⁻¹
16	nG	Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών	1,0000	-
17	mH	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών ΧΒΗ	6,0000	(d) ⁻¹
18	bH	Ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικών μικροοργανισμών ΧΒΗ	0,6200	(d) ⁻¹
19	mAOBHAO	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης αυτοτροφικών μικροοργανισμών ΧΑΟΒ	0,6800	(d) ⁻¹
20	bAOB	Ρυθμός αποσύνθεσης αυτοτροφικών μικροοργανισμών ΧΑΟΒ	0,0960	(d) ⁻¹
21	mNOB	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης νιτροποιητικών μικροοργανισμών ΧΝΟΒ	0,6800	(d) ⁻¹
22	bNOB	Ρυθμός αποσύνθεσης νιτροποιητικών μικροοργανισμών ΧΝΟΒ	0,0960	(d) ⁻¹
23	KH	Μέγιστος ρυθμός υδρόλυσης	3,0000	grCOD*(grCOD*d) ⁻¹
24	Ks	Συντελεστής ημικορεσμού ετεροτροφικής βιομάζας	20,0000	grCOD*(m) ⁻³

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
25	KOH	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂	0,2000	grO ₂ *(m) ⁻³
26	KNH	Συντελεστής ημικορεσμού NH ₃ -N	0,0500	grNH ₃ -N*(m) ⁻³
27	KX	Συντελεστής ημικορεσμού υδρόλυσης αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης	0,0300	grCOD*(grCOD) ⁻¹
28	nNO ₃ H	Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική υδρόλυση παρουσία NO ₃	0,6000	-
29	KNO ₃	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₃ -N	0,5000	grNO ₃ -N*(m) ⁻³
30	nNO ₂ H	Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική υδρόλυση παρουσία NO ₂	0,6000	-
31	KNO ₂	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₂ -N	0,5000	grNO ₂ -N*(m) ⁻³
32	nfe	Διορθωτικός συντελεστής για την αναερόβια υδρόλυση	0,4000	-
33	Kp	Συντελεστής ημικορεσμού PO ₄	0,0100	grP*(m) ⁻³
34	kALK	Συντελεστής ημικορεσμού αλκαλικότητας	0,0820	mgCaCO ₃ *(L) ⁻¹
35	nNO ₃ D	Διορθωτικός συντελεστής για την απονιτροποίηση	0,8000	-
36	nG ₃	Ανοξικός διορθωτικός συντελεστής για τη μετατροπή NO ₂ σε NO	0,6000	-
37	kOH ₃	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά τη μετατροπή NO ₂ σε NO	0,1000	grO ₂ *(m) ⁻³
38	kNO ₂ D	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₂ κατά τη μετατροπή NO ₂ σε NO	0,2000	grNO ₂ *(m) ⁻³
39	ks ₃	Συντελεστής ημικορεσμού οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή NO ₂ σε NO	20,0000	grCOD*(m) ⁻³
40	Ki ₃ NO	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη μετατροπή NO ₂ σε NO	0,5000	grN*(m) ⁻³
41	nG ₄	Ανοξικός διορθωτικός συντελεστής για τη μετατροπή NO σε N ₂ O	0,6000	-
42	ks ₄	Συντελεστής ημικορεσμού οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή NO σε N ₂ O	20,0000	grCOD*(m) ⁻³
43	KNOD	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₃ κατά τη μετατροπή NO σε N ₂ O	0,0500	grN*(m) ⁻³
44	Ki ₄ NO	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη μετατροπή NO σε N ₂ O	0,3000	grN*(m) ⁻³
45	KOH ₄	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά τη μετατροπή NO σε N ₂ O	0,1000	grO ₂ *(m) ⁻³
46	nG ₅	Ανοξικός διορθωτικός συντελεστής για τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	0,6000	-
47	ks ₅	Συντελεστής ημικορεσμού οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	20,0000	grCOD*(m) ⁻³
48	KN ₂ OD	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₃ κατά τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	0,0500	grNO ₂ *(m) ⁻³
49	KOH ₅	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	0,1000	grO ₂ *(m) ⁻³
50	Ki ₅ NO	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	0,0750	grN*(m) ⁻³

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
51	qAOB _{amo}	Μέγιστος ρυθμός οξειδωσης υδροξυλαμίνης (NH ₂ OH) από το ένζυμο μονοοξυγενάση (AMO)	5,2008	mgN*(mgCOD*d) ⁻¹
52	kOHAOB ₁	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά την οξείδωση NH ₂ OH από το AMO	1,0000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
53	kNHAOB	Συντελεστής ημικορεσμού NH ₃ κατά την οξείδωση NH ₂ OH από το AMO	0,2000	gr*(m) ⁻³ as N
54	kNOAOB _{HAO}	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά την αντίδραση με το HAO	0,0003	gr*(m) ⁻³ as N
55	kOHAOB ₂	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά την αντίδραση με το HAO	0,6000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
56	kNH ₂ OHAOB	Συντελεστής ημικορεσμού NH ₃ κατά την αντίδραση με το HAO	0,9000	gr*(m) ⁻³ as N
57	qAOBN ₂ ONN	Μέγιστος ρυθμός παραγωγής υποξειδίου του αζώτου N ₂ O κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών NN	0,0078	mgN*(mgCOD*d) ⁻¹
58	kNOAOBN _N	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών NN	0,0080	gr*(m) ⁻³ as N
59	kHNO ₂ AOB	Συντελεστής ημικορεσμού HNO ₂ κατά τη απονιτροποίηση των νιτροποιητών	0,0040	gr*(m) ⁻³ as N
60	kOHNOB	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ για τους νιτροποιητές	1,2000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
61	kNO ₂ NOB	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₂ για τους νιτροποιητές	0,5000	grNO ₂ -N*(m) ⁻³
62	kpNOB	Συντελεστής ημικορεσμού PO ₄ για τους νιτροποιητές	0,0100	grP*(m) ⁻³
63	kALKNOB	Συντελεστής ημικορεσμού αλκαλικότητας για τους νιτροποιητές	0,0820	mgCaCO ₃ *(L) ⁻¹
64	kOHAOB _{ND}	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ για την απονιτροποίηση των νιτροποιητών	0,5000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
65	kiOHAOB	Σταθερά αναστολής υποξειδίου του αζώτου N ₂ O λόγω O ₂	0,8000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
66	qAOBN ₂ OND	Μέγιστος ρυθμός παραγωγής υποξειδίου του αζώτου N ₂ O κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών NN	1,3008	mgN*(mgCOD*d) ⁻¹
67	qAOB _{HAO}	Μέγιστος ρυθμός κατάλυσης της υδροξυλαμίνης NH ₂ OH	5,2008	mgN*(mgCOD*d) ⁻¹

3.4.4 Εξισώσεις ρυθμού των διεργασιών

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εξισώσεις ρυθμού των διεργασιών του μοντέλου.

3.4.4.1 Ρυθμός αερόβιας υδρόλυσης

Κατά τη διεργασία της αερόβιας υδρόλυσης ο αποδέκτης ηλεκτρονίων της αντίδρασης είναι το οξυγόνο O₂. Κατά συνέπεια, για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση απαιτείται η παρουσία οξυγόνου O₂ και στην εξίσωση ρυθμού της διεργασίας ενσωματώνεται κατάλληλος 'διακόπτης' γι' αυτό.

Η χρήση του κλάσματος X_S/X_{BH} οφείλεται στη θεώρηση ότι η διεργασία της υδρόλυσης εξαρτάται κατ' αποκλειστικότητα από τους ετερότροφους μικροοργανισμούς. Κατ' αυτό τον τρόπο ο όρος X_S/X_{BH} εκφράζει την πεπερασμένη επιφάνεια της κυτταρικής μεμβράνης των μικροοργανισμών, που είναι διαθέσιμη να προσροφήσει τη διαλυτή οργανική ύλη. Μόλις κορεστεί η επιφάνεια από τροφή η διεργασία σταματά.

Η εξίσωση του ρυθμού αερόβιας υδρόλυσης είναι η ακόλουθη:

$$\rho_1 = K_H \cdot \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.2 Ρυθμός ανοξικής υδρόλυσης παρουσία νιτρικών (SNO₃)

Η ανοξική υδρόλυση πραγματοποιείται παρουσία νιτρικών NO₃, που αποτελούν τον αποδέκτη ηλεκτρονίων της αντίδρασης, ενώ απουσιάζει το οξυγόνο O₂. Σε αυτές τις ανοξικές συνθήκες ο ρυθμός της υδρόλυσης είναι μειωμένος, συγκριτικά με τις αερόβιες, και χρησιμοποιείται ο συντελεστής nNO₃ για να αποδώσει την απομείωση του ρυθμού.

Επιπλέον, ενσωματώνονται στην εξίσωση ρυθμού της διεργασίας δύο (2) 'διακόπτες' για την αύξηση του ρυθμού της υδρόλυσης με την αύξηση της συγκέντρωσής νιτρικών NO₃ και την αναστολή της διεργασίας με την αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου O₂.

Τέλος, το κλάσμα X_S/X_H, όπως στην αερόβια υδρόλυση, εκφράζει την πεπερασμένη επιφάνεια της κυτταρικής μεμβράνης των μικροοργανισμών, που είναι διαθέσιμη να προσροφήσει τη διαλυτή οργανική ύλη.

Η εξίσωση του ρυθμού ανοξικής υδρόλυσης παρουσία νιτρικών (SNO₃) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_2 = K_H \cdot n_{NO_3H} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.3 Ρυθμός ανοξικής υδρόλυσης παρουσία νιτρώδων (SNO₂)

Στη συγκεκριμένη διεργασία ισχύουν οι συνθήκες και οι περιορισμοί που ισχύουν και στην προηγούμενη διεργασία, με μόνη διαφορά ότι ο αποδέκτης ηλεκτρονίων της αντίδρασης είναι τα νιτρώδη NO₂ αντί των νιτρικών NO₃.

Η εξίσωση του ρυθμού ανοξικής υδρόλυσης παρουσία νιτρώδων (SNO₂) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_3 = K_H \cdot n_{NO_3H} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{S_{NO_2}}{K_{NO_2} + S_{NO_2}} \cdot \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.4 Ρυθμός αναερόβιας υδρόλυσης

Οι μηχανισμοί με τους οποίους συντελείται η αναερόβια υδρόλυση δεν διαφέρουν από εκείνους που περιγράφηκαν παραπάνω για την αερόβια και ανοξική υδρόλυση. Όμως στη συγκεκριμένη διεργασία απουσιάζουν οι προηγούμενοι αποδέκτες ηλεκτρονίων, όπως είναι το οξυγόνο O₂, τα νιτρώδη NO₂ και τα νιτρικά NO₃. Συνεπώς, η εξίσωση που περιγράφει τη διεργασία περιλαμβάνει τους αντίστοιχους 'διακόπτες' που επιταχύνουν και αναστέλλουν τη διεργασία ανάλογα με τις επικρατούσες, κάθε φορά, στο σύστημα συνθήκες.

Η αναερόβια υδρόλυση συντελείται πολύ μικρή ταχύτητα γεγονός που μεταφέρεται στην εξίσωση με τη χρήση του συντελεστή n_{fe}.

Η εξίσωση του ρυθμού της αναερόβιας υδρόλυσης είναι η ακόλουθη:

$$\rho_4 = K_X \cdot n_{fe} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{K_{NO_2}}{K_{NO_2} + S_{NO_2} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.5 Ρυθμός αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH)

Κατά τη διεργασία της αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών καταναλώνεται εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή SS, παρουσία οξυγόνου O₂ ως αποδέκτη ηλεκτρονίων, και καταναλώνεται αμμωνιακό άζωτο NH₄. Προϊόν της αντίδρασης είναι το διοξείδιο του άνθρακα CO₂.

Η εξίσωση του ρυθμού της αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών είναι η ακόλουθη:

$$\rho_5 = m_H \cdot \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.6 Ρυθμός απονιτροποίησης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH)

Κατά την απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών καταναλώνεται εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή SS, απουσία οξυγόνου O₂ και παρουσία νιτρικού αζώτου NO₃ ως αποδέκτη ηλεκτρονίων, και καταναλώνεται ποσότητα αμμωνιακού αζώτου NH₄ πέραν των νιτρικών. Προϊόν της αντίδρασης είναι το διοξείδιο του άνθρακα CO₂.

Η εξίσωση του ρυθμού απονιτροποίησης ετεροτροφικών μικροοργανισμών είναι η ακόλουθη:

$$\rho_6 = m_H \cdot n_{NO_3D} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK_h} + S_{ALK}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.7 Ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH) – 1^η διεργασία: μετατροπή νιτρωδών (SNO₂) σε μονοξείδιο του αζώτου (SNO)

Στην 1^η διεργασία της ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών τα νιτρώδη NO₂ μετατρέπονται μέσω του ενζύμου της νιτρώδους αναγωγής Nir σε μονοξείδιο του αζώτου NO. Καταναλώνεται εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή, απουσία οξυγόνου O₂ και παρουσία νιτρωδών NO₂. Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση μονοξειδίου του αζώτου NO η ταχύτητα της διεργασίας μειώνεται.

Καθώς η ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών συντελείται σε βραδύτερο ρυθμό από την αερόβια ανάπτυξή τους, στην εξίσωση ενσωματώνεται ο αντίστοιχος μειωτικός συντελεστής nG₃.

$$\rho_7 = m_H \cdot n_{G3} \cdot \frac{K_{OH3}}{K_{OH3} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_{S3} + S_S} \cdot \frac{S_{NO2}}{K_{NO2D} + S_{NO2}} \cdot \frac{K_{i3NO}}{K_{i3NO} + S_{NO}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.8 Ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH) – 2^η διεργασία: μετατροπή μονοξειδίου του αζώτου (SNO) σε υποξείδιο του αζώτου (SN₂O)

Στην 2^η διεργασία της ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών το μονοξείδιο του αζώτου NO μετατρέπεται μέσω του ενζύμου της νιτρικής οξειδοαναγωγής Nor σε υποξείδιο του αζώτου N₂O. Καταναλώνεται εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή, απουσία οξυγόνου O₂ και παρουσία μονοξειδίου του αζώτου NO. Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση μονοξειδίου του αζώτου NO η ταχύτητα της διεργασίας μειώνεται.

Καθώς η ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών συντελείται σε βραδύτερο ρυθμό από την αερόβια ανάπτυξή τους, στην εξίσωση ενσωματώνεται ο αντίστοιχος μειωτικός συντελεστής nG₄ για το συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης.

$$\rho_8 = m_H \cdot n_{G4} \cdot \frac{K_{OH4}}{K_{OH4} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_{S4} + S_S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NOD} + S_{NO} + \frac{S_{NO}^2}{K_{i4NO}}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.9 Ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH) – 3^η διεργασία: μετατροπή υποξειδίου του αζώτου (SN₂O) σε αέριο άζωτο (SN₂)

Στην 3^η διεργασία της ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών το υποξείδιο του αζώτου N₂O μετατρέπεται μέσω του ενζύμου της αναγωγής του υποξειδίου του αζώτου N₂O_r σε αέριο άζωτο N₂. Καταναλώνεται εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή, απουσία οξυγόνου O₂ και παρουσία υποξειδίου του αζώτου N₂O. Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση μονοξειδίου του αζώτου NO η ταχύτητα της διεργασίας μειώνεται.

Όπως και για τα δύο προηγούμενα στάδια της διεργασίας, καθώς η ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών συντελείται σε βραδύτερο ρυθμό από την αερόβια ανάπτυξή τους, στην εξίσωση ενσωματώνεται ο αντίστοιχος μειωτικός συντελεστής nG₅.

$$\rho_9 = m_H \cdot n_{G5} \cdot \frac{K_{OH5}}{K_{OH5} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_{S5} + S_S} \cdot \frac{S_{N2O}}{K_{N2OD} + S_{N2O}} \cdot \frac{K_{i5NO}}{K_{i5NO} + S_{NO}} \cdot X_{BH}$$

3.4.4.10 Ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικών μικροοργανισμών (XBH)

Ο ρυθμός αποσύνθεσης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται ανεξάρτητος από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η λύση των μικροοργανισμών παράγει αργά βιοδιασπάσιμη τροφή XS, αδρανή σωματιδιακά προϊόντα XI, αμμωνία NH₃ και φωσφορικά.

Η εξίσωση του ρυθμού λύσης των X_H είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{10} = b_H \cdot X_{BH}$$

3.4.4.11 Ρυθμός οξείδωσης αμμωνίας (SNH) σε υδροξυλαμίνη (SN2OH)

Αποτελεί το 1^ο στάδιο των διεργασιών που περιλαμβάνει η βιολογική απομάκρυνση αζώτου. Σε αυτό το στάδιο η αμμωνία NH₃ με τη βοήθεια του ενζύμου μονοοξυγενάση AMO οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη NH₂OH. Η αντίδραση απαιτεί την παρουσία οξυγόνου και πραγματοποιείται από τα αυτοτροφικά αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια AOB.

Η εξίσωση του ρυθμού οξείδωσης αμμωνίας (SNH) σε υδροξυλαμίνη (SN2OH) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{11} = q_{AOBamo} \cdot \frac{S_O}{K_{OHAOB1} + S_O} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NHAOB} + S_{NH}} \cdot X_{AOB}$$

3.4.4.12 Ρυθμός οξείδωσης υδροξυλαμίνης (SN2OH) σε μονοξείδιο του αζώτου (SNO)

Στο επόμενο στάδιο η υδροξυλαμίνη N₂OH με τη βοήθεια του ενζύμου οξειδοαναγωγή HAO οξειδώνεται σε μονοξείδιο του αζώτου NO. Η αντίδραση απαιτεί παρουσία αμμωνίας NH₃ που καταναλώνεται και φωσφορικών και συντίθενται τα αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια AOB. Στη συγκεκριμένη αντίδραση καταναλώνεται και διοξείδιο του άνθρακα CO₂.

Η εξίσωση του ρυθμού οξείδωσης υδροξυλαμίνης (SN2OH) σε μονοξείδιο του αζώτου (SNO) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{12} = m_{AOBHAO} \cdot \frac{S_O}{K_{OHAOB2} + S_O} \cdot \frac{S_{NH2OH}}{K_{NH2OHAOB} + S_{NH2OH}} \cdot \frac{S_{NH}}{10^{-12} + S_{NH}} \cdot X_{AOB}$$

3.4.4.13 Ρυθμός οξείδωσης μονοξειδίου του αζώτου (SNO) σε νιτρώδη (SNO2)

Στη συνέχεια τα αυτοτροφικά αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια οξειδώνουν το μονοξείδιο του αζώτου NO, με τη βοήθεια του ενζύμου οξειδοαναγωγή της υδροξυλαμίνης HAO, σε νιτρώδες άζωτο NO₂. Η διεργασία απαιτεί την παρουσία οξυγόνου O₂.

Η εξίσωση του ρυθμού οξείδωσης μονοξειδίου του αζώτου (SNO) σε νιτρώδη (SNO₂) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{13} = q_{AOVBHAO} \cdot \frac{S_O}{K_{OHAOB2} + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NOAOVBHAO} + S_{NO}} \cdot X_{AOB}$$

3.4.4.14 Ρυθμός αναγωγής μονοξειδίου του αζώτου (SNO) σε υποξείδιο του αζώτου (SN2O)

Από τα ίδια βακτήρια AOB το μονοξείδιο του αζώτου NO ανάγεται με τη βοήθεια του ενζύμου νιτρική οξειδοαναγωγή Nor σε υποξείδιο του αζώτου N2O, διεργασία που αποτελεί τη νιτροποίηση των νιτροποιητών NN.

Η εξίσωση του ρυθμού αναγωγής μονοξειδίου του αζώτου (SNO) σε υποξείδιο του αζώτου (SN2O) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{14} = q_{AOBN2ONN} \cdot \frac{S_{NH2OH}}{K_{NH2OHAOB} + S_{NH2OH}} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NOAOBNN} + S_{NO}} \cdot X_{AOB}$$

3.4.4.15 Ρυθμός αναγωγής νιτρωδών (SNO2) σε υποξείδιο του αζώτου (SN2O)

Η διεργασία περιλαμβάνει την αναγωγή των νιτρωδών NO2 σε μονοξείδιο του αζώτου NO από τους αμμωνιακούς οξειδωτικούς μικροοργανισμούς AOB με τη βοήθεια του ενζύμου νιτρική αναγωγή NirK, καθώς και την επακόλουθη αναγωγή τους σε υποξείδιο του αζώτου N2O με τη βοήθεια του ενζύμου νιτρική οξειδοαναγωγή Nor.

Η εξίσωση του ρυθμού αναγωγής νιτρωδών (SNO2) σε υποξείδιο του αζώτου (SN2O) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{15} = q_{AOBN2OND} \cdot \frac{S_{NH2OH}}{K_{NH2OHAOB} + S_{NH2OH}} \cdot \frac{S_{HNO2}}{K_{HNO2AOB} + S_{HNO2}} \cdot f_{SO} \cdot X_{AOB}$$

$$f_{SO} = \frac{S_O}{K_{OHAOBND} + 1 - \sqrt{\frac{K_{OHAOBND}}{K_{iOHAOB}}}} \cdot \frac{S_O^2}{K_{iOHAOB}} \cdot S_O$$

$$S_{HNO2} = \frac{S_{NO2}}{Ka \cdot 10^{ph} + 1} \cdot \frac{47}{14}$$

$$Ka = e^{-\frac{2300}{273+therm}}$$

3.4.4.16 Ρυθμός αερόβιας ανάπτυξη νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (XNOB)

Η διεργασία απαιτεί την παρουσία οξυγόνου O2, αμμωνίας NH3 και φωσφορικών για σύνθεση. Ταυτόχρονα τα νιτρώδη NO2 μετατρέπονται σε νιτρικά NO3 και καταναλώνεται διοξείδιο του άνθρακα.

Η εξίσωση του ρυθμού αερόβιας ανάπτυξη νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (XNOB) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{16} = m_{NOB} \cdot \frac{S_O}{K_{OHNOB} + S_O} \cdot \frac{S_{NO2}}{K_{NO2NOB} + S_{NO2}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALKNOB} + S_{ALK}} \cdot X_{NOB}$$

3.4.4.17 Ρυθμός αποσύνθεσης νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (XAOB)

Η διεργασία είναι ανάλογη εκείνης που λαμβάνει χώρα κατά την αποσύνθεση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών ΧΒΗ.

Η εξίσωση του ρυθμού αποσύνθεσης νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (XAOB) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{17} = b_{AOB} \cdot X_{AOB}$$

3.4.4.18 Ρυθμός αποσύνθεσης αυτοτροφικών βακτηρίων (XNOB)

Η εξίσωση του ρυθμού αποσύνθεσης αυτοτροφικών βακτηρίων (XNOB) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{18} = b_{NOB} \cdot X_{NOB}$$

3.4.5 Εξισώσεις μεταβολής συγκεντρώσεων

Στη συνέχεια αναλύονται οι εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης των συστατικών που είναι αποτέλεσμα των βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός του βιοαντιδραστήρα.

Με i συμβολίζεται το διαμέρισμα του αντιδραστήρα και η νέα συγκέντρωση υπολογίζεται μετά την παρέλευση χρονικού διαστήματος dt .

3.4.5.1 SI: Αδρανής διαλυτή οργανική ύλη.

Η αδρανής διαλυμένη οργανική ύλη δεν συμμετέχει σε καμία διαδικασία. Παράγεται ως αποτέλεσμα της σωματιδιακής βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης που υδρολύεται σε αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες, όπως περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί.

$$DS_I(i) = \left[\frac{Q(i-1) \cdot S_I(i-1) - Q(i) \cdot S_I(i) + \{f_{SI} \cdot (\rho_1(i) + \rho_2(i) + \rho_3(i) + \rho_4(i))\} \cdot V(i)}{V(i)} \right] \cdot dt$$

3.4.5.2 SS: Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη.

Η εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη παράγεται από την υδρόλυση της σωματιδιακής βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης σε αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες. Η μείωση της συγκέντρωσής της είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες.

$$DS_S(i) = \left[\frac{Q(i-1) \cdot S_S(i-1) - Q(i) \cdot S_S(i) + \left\{ (1 - f_{SI}) \cdot (\rho_1(i) + \rho_2(i) + \rho_3(i) + \rho_4(i)) - \left(\frac{1}{Y_H} \right) \cdot (\rho_5(i) + n_G \cdot (\rho_6(i) + \rho_7(i) + \rho_8(i) + \rho_9(i))) \right\} \cdot V(i)}{V(i)} \right] \cdot dt$$

3.4.5.3 X_I : Αδρανής σωματιδιακή οργανική ύλη.

Η συγκέντρωση της αδρανούς σωματιδιακής ύλης αυξάνεται λόγω της λύσης της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας, όπως φαίνεται στην επόμενη εξίσωση. Απομακρύνεται από το σύστημα μέσω της περίσσειας ιλύος και δεν συμμετέχει σε καμία βιολογική διεργασία.

$$DX_I(i) = \left[\begin{array}{c} Q(i-1) \cdot X_I(i-1) - Q(i) \cdot X_I(i) + \\ \{f_P \cdot (\rho_{10}(i) + \rho_{17}(i) + \rho_{18}(i))\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.4 X_S : Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη.

Η συγκέντρωση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης μειώνεται κατά την υδρόλυση σε αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες και παράγεται κατά τη λύση ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας. Η ακόλουθη σχέση υπολογίζει τη μεταβολή της συγκέντρωσης.

$$DX_S(i) = \left[\begin{array}{c} Q(i-1) \cdot X_S(i-1) - Q(i) \cdot X_S(i) + \\ \left\{ -(\rho_1(i) + \rho_2(i) + \rho_3(i) + \rho_4(i)) + \right. \\ \left. f_P \cdot (\rho_9(i) + \rho_{13}(i) + \rho_{17}(i)) \right\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.5 X_{BH} : Ετεροτροφική βιομάζα.

Η αύξηση της συγκέντρωσης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών οφείλεται στην αερόβια και ανοξική ανάπτυξή τους. Η μείωση της συγκέντρωσης είναι αποτέλεσμα της αποσύνθεσης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, όπως προκύπτει και από την επόμενη εξίσωση.

$$DX_{BH}(i) = \left[\begin{array}{c} Q(i-1) \cdot X_{BH}(i-1) - Q(i) \cdot X_{BH}(i) + \\ \{\rho_5(i) + \rho_6(i) + \rho_7(i) + \rho_8(i) + \rho_9(i) - \rho_{10}(i)\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.6 X_{AOB} : Αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια.

Η αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών οξειδωτικών βακτηρίων πραγματοποιείται σε αερόβιες συνθήκες, κατά την οξειδωση της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου. Η μείωση της συγκέντρωσής τους οφείλεται στην αποσύνθεσή τους. Η συνολική μεταβολή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$DX_{AOB}(i) = \left[\begin{array}{c} Q(i-1) \cdot X_{AOB}(i-1) - Q(i) \cdot X_{AOB}(i) + \\ \{\rho_{12}(i) - \rho_{17}(i)\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.7 X_{NOB} : Νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια.

Η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων πραγματοποιείται σε ανοξικές συνθήκες και καταναλώνονται λόγω αποσύνθεσης. Η μεταβολή της συγκέντρωσής τους περιγράφεται από τη σχέση:

$$DX_{NOB}(i) = \left[\begin{array}{c} Q(i-1) \cdot X_{NOB}(i-1) - Q(i) \cdot X_{NOB}(i) + \\ \{\rho_{16}(i) - \rho_{18}(i)\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.8 SO : Διαλυμένο οξυγόνο.

Το διαλυμένο οξυγόνο στο σύστημα καταναλώνεται για την αερόβια ανάπτυξη των ετεροτροφικών και αυτοτροφικών μικροοργανισμών και τις διεργασίες οξειδωσης που λαμβάνουν χώρα στο βιοαντιδραστήρα σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση.

$$DS_{O_2}(i) = \left[\begin{array}{c} Q(i-1) \cdot S_{O_2}(i-1) - Q(i) \cdot S_{O_2}(i) + \\ \left(\left(1 - \frac{1}{Y_H}\right) \cdot \rho_5(i) - \frac{8}{7} \cdot \rho_{11}(i) - \frac{\frac{12}{7} - Y_{AOB}}{Y_{AOB}} \cdot \rho_{12}(i) \right) \\ - \frac{4}{7} \cdot \rho_{13}(i) - \frac{\frac{8}{7} - Y_{NOB}}{Y_{NOB}} \cdot \rho_{16}(i) \end{array} \right] \cdot V(i) \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.9 SN2 : Αέριο άζωτο.

Αέριο άζωτο παράγεται κατά την αντίδραση του υποξειδίου του αζώτου με το ένζυμο αναγωγή του υποξειδίου του αζώτου. Ακολουθεί η εξίσωση υπολογισμού του.

$$DS_{N_2}(i) = \left[Q(i-1) \cdot S_{N_2}(i-1) - Q(i) \cdot S_{N_2}(i) - \left\{ \frac{1 - Y_h}{\frac{12}{7} \cdot Y_h} \cdot \rho_9(i) \right\} \cdot V(i) \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.10 SNH : Διαλυμένο αμμωνιακό άζωτο.

Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου αυξάνεται λόγω της υδρόλυσης της σωματιδιακής βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης σε αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες και της αμμωνιοποίησης του διαλυμένου οργανικού αζώτου που απελευθερώνεται κατά την αποσύνθεση των μικροοργανισμών.

Η μείωση της συγκέντρωσής του αμμωνιακού αζώτου οφείλεται στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών και την μετατροπή του σε υδροξυλαμίνη.

Οι διεργασίες μεταβολής της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου περιγράφονται στην ακόλουθη εξίσωση.

$$DS_{NH_4}(i) = \left[\begin{array}{c} Q(i-1) \cdot S_{NH_4}(i-1) - Q(i) \cdot S_{NH_4}(i) + \\ \left(i_{NXS} - (1 - f_{SI}) \cdot i_{NSF} \right) \cdot (\rho_1(i) + \rho_2(i) + \rho_3(i) + \rho_4(i)) + \\ i_{xb} \cdot (\rho_5(i) + \rho_6(i) + \rho_7(i) + \rho_8(i) + \rho_9(i) + \rho_{12}(i) + \rho_{16}(i)) + \\ + (i_{xb} - i_{xp} \cdot f_P) \cdot (\rho_{10}(i) + \rho_{17}(i) + \rho_{18}(i)) - \rho_{11}(i) \end{array} \right] \cdot V(i) \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.11 SNO : Μονοξείδιο του αζώτου.

Παράγεται κατά τη διεργασία της οξειδωσης της υδροξυλαμίνης και της αντίδρασης των νιτρικών με το ένζυμο νιτρώδης αναγωγή. Καταναλώνεται κατά τη χημική διάσπαση, τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση των νιτροποιητών, όπου δηλαδή παράγεται το υποξείδιο του αζώτου. Δίνεται η εξίσωση μεταβολής του:

$$DS_{NO}(i) = \left[\begin{array}{l} Q(i-1) \cdot S_{NO}(i-1) - Q(i) \cdot S_{NO}(i) + \\ \left\{ -\frac{1-n_G \cdot Y_h}{n_G \cdot Y_h \cdot \frac{4}{7}} \cdot (\rho_7(i) - \rho_8(i)) + \right. \\ \left. \frac{1}{Y_{AOB}} \cdot \rho_{12}(i) - 4 \cdot \rho_{14}(i) - \rho_{13}(i) \right\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.12 SNO2 : Νιτρώδες άζωτο.

Παράγεται κατά την απονιτροποίηση, την οξείδωση της υδροξυλαμίνης και του μονοξειδίου του αζώτου. Καταναλώνεται κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών και την ανοξική ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας και των νιτροποιητικών βακτηρίων. Μεταβάλλεται ως εξής:

$$DS_{NO_2}(i) = \left[\begin{array}{l} Q(i-1) \cdot S_{NO_2}(i-1) - Q(i) \cdot S_{NO_2}(i) + \\ \left\{ -\frac{1-n_G \cdot Y_h}{n_G \cdot Y_h \cdot \frac{8}{7}} \cdot (\rho_6(i) - 2 \cdot \rho_7(i)) - \right. \\ \left. \frac{1}{Y_{NOB}} \cdot \rho_{16}(i) + \rho_{13}(i) + \rho_{14}(i) - \rho_{15}(i) \right\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.13 SNO3 : Νιτρικό άζωτο.

Παράγεται κατά την ανάπτυξη των νιτροποιητών βακτηρίων και καταναλώνεται με την απονιτροποίηση. Η εξίσωση μεταβολής της συγκέντρωσής του είναι η επόμενη:

$$DS_{NO_3}(i) = \left[\begin{array}{l} Q(i-1) \cdot S_{NO_3}(i-1) - Q(i) \cdot S_{NO_3}(i) + \\ \left\{ -\frac{1-n_G \cdot Y_h}{n_G \cdot Y_h \cdot \frac{8}{7}} \cdot \rho_6(i) + \frac{1}{Y_{NOB}} \cdot \rho_{16}(i) \right\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.14 SN2O : Υποξείδιο του αζώτου.

Παράγεται κατά τη χημική διάσπαση, τη νιτροποίηση και απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Η έκλυσή του στην ατμόσφαιρα σε δεξαμενή αερισμού μειώνει τη συγκέντρωσή του (Baeza et al., 2017; Ιωαννίδης, 2019). Η μεταβολή της συγκέντρωσης υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$DS_{N_2O}(i) = \left[\begin{array}{l} Q(i-1) \cdot S_{N_2O}(i-1) - Q(i) \cdot S_{N_2O}(i) + \\ \left\{ -\frac{1-n_G \cdot Y_h}{n_G \cdot Y_h \cdot \frac{4}{7}} \cdot (\rho_8(i) - \rho_9(i)) + 4 \cdot \rho_{14}(i) - \right. \\ \left. \left(2 \cdot \rho_{15}(i) - 0.91 \cdot KLA(i) \cdot S_{N_2O}(i) \cdot N_2OSE \right) \right\} \cdot V(i) \end{array} \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.15 SNH2OH : Υδροξυλαμίνη.

Παράγεται από την οξείδωση της αμμωνίας και καταναλώνεται από την οξείδωσή της σε μονοξείδιο του αζώτου. Η εξίσωση μεταβολής της συγκέντρωσης παρουσιάζεται παρακάτω:

$$DS_{NH_2OH}(i) = \left[\left(\frac{Q(i-1) \cdot S_{NH_2OH}(i-1) - Q(i) \cdot S_{NH_2OH}(i) +}{Y_{AOB} \cdot \rho_{12}(i) + \rho_{11}(i) - \rho_{14}(i) - \rho_{15}(i) +} \right) \cdot V(i) \right] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.16 SALK: Αλκαλικότητα.

Μεταβάλλεται κατά την ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών και τις διεργασίες που περιλαμβάνουν η νιτροποίηση – απονιτροποίηση και η αμμωνιοποίηση του διαλυτού οργανικού αζώτου. Η συγκέντρωσή της μεταβάλλεται ως εξής:

$$DS_{ALK}(i) = \left[\left(\frac{Q(i-1) \cdot S_{ALK}(i-1) - Q(i) \cdot S_{ALK}(i) +}{\left(-\frac{i_{xb}}{14} \right) \cdot \left(\rho_5(i) + \rho_{11}(i) + \rho_{12}(i) + \rho_{13}(i) \right) + \rho_{14}(i) + \rho_{15}(i) + \rho_{16}(i)} \right) + \left(\frac{1 - Y_h}{14 \cdot Y_h \cdot 2.86} - \frac{i_{xb}}{14} \right) \cdot \left(\rho_6(i) + \rho_7(i) + \rho_8(i) + \rho_9(i) \right) \right] \cdot V(i) \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.5.17 XNV : Σωματιδιακές ανόργανες ενώσεις.

Οι σωματιδιακές ανόργανες ενώσεις δεν εμπλέκονται στις βιολογικές διεργασίες. Η μεταβολή της συγκέντρωσής τους υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση.

$$DX_{NV}(i) = [Q(i-1) \cdot X_{NV}(i-1) - Q(i) \cdot X_{NV}(i)] \cdot \frac{dt}{V(i)}$$

3.4.6 Τελικές συγκεντρώσεις μεταβλητών

Υπολογίζοντας τη μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε συστατικού για χρόνο dt γίνεται ο υπολογισμός της συγκέντρωσής τους σε κάθε χρονικό βήμα. Ακολουθούν οι εξισώσεις υπολογισμού της συγκέντρωσης των διαλυτών και σωματιδιακών μεταβλητών του μοντέλου, αντίστοιχα.

$$S(t + dt, i) = S(t, i) + DS(i)$$

$$X(t + dt, i) = X(t, i) + DX(i)$$

3.4.7 Ζήτηση οξυγόνου συστήματος

Από το σύνολο των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός του βιοαντιδραστήρα αρκετές απαιτούν την παρουσία οξυγόνου O₂. Ως εκ τούτου η εγκατάσταση διαθέτει σύστημα αερισμού για την παροχή της απαιτούμενης ποσότητας αέρα για τη διατήρηση βασικών διεργασιών. Ο σχεδιασμός του συστήματος αερισμού επηρεάζει τη λειτουργία της εγκατάστασης και την απόδοση του βιοαντιδραστήρα καθώς η έλλειψη οξυγόνου O₂ αναστέλλει την εξέλιξη κάποιων διεργασιών ενώ η περίσσειά του, η οποία αυξάνει το λειτουργικό κόστος, δεν συνδέεται με αύξηση της απόδοσης. Αντίθετα, η αυξημένη παροχή αέρα που δημιουργεί συνθήκες έντονης μίξης, συχνά προκαλεί αποκροκίδωση με επακόλουθα προβλήματα καθίζησης και επιδείνωση της ποιότητας εκροής.

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, το οξυγόνο συμμετέχει στις διεργασίες της αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικών και αυτοτροφικών μικροοργανισμών και σε διεργασίες οξείδωσης των άλλων μεταβλητών του συστήματος. Από την εξίσωση που περιγράφηκε παραπάνω προσδιορίζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου λόγω των διεργασιών, ανά χρονικό βήμα dt .

Ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου σε $grO_2/χρονικό\ βήμα$ υπολογίζεται από την επόμενη εξίσωση:

$$OTR = \frac{dS_o}{dt} \cdot V(i)$$

όπου ο όρος $\frac{dS_o}{dt}$ αντιστοιχεί στο ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης του οξυγόνου σε $grO_2/m^3 \cdot χρονικό\ βήμα$ και ο όρος $V(i)$ αντιστοιχεί στον όγκο της δεξαμενής σε m^3 .

Για τον σχεδιασμό, τελικά, του συστήματος αερισμού απαιτείται ένας άλλος δείκτης, το SOTR, που εκφράζει το ρυθμό μεταφοράς οξυγόνου σε τυπικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, η πληροφορία για τα λύματα σε συνθήκες θερμοκρασίας πεδίου μετατρέπεται σε πληροφορία για καθαρό νερό θερμοκρασίας $20^\circ C$. Η εξίσωση που συνδέει τις συνθήκες πεδίου με τις τυπικές συνθήκες είναι η ακόλουθη:

$$SOTR = \frac{OTR \cdot C_{S20}}{(a \cdot F) \cdot \theta^{(T-20)} \cdot (C_{ST} \cdot b - C)}$$

Όπου, OTR : ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου για ανάμικτο υγρό σε συνθήκες πεδίου

SOTR : ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου για καθαρό νερό σε θερμοκρασία $20^\circ C$

a : συντελεστής αναγωγής της απόδοσης απ' το καθαρό νερό στο ανάμικτο υγρό

F : συντελεστής γήρανσης διαχυτήρων

θ : θερμοκρασιακός συντελεστής με τυπική τιμή 1,024

T : θερμοκρασία ανάμικτου υγρού

C_{ST} : συγκέντρωση κορεσμού διαλυμένου οξυγόνου σε καθαρό νερό θερμοκρασίας T

C_{S20} : συγκέντρωση κορεσμού διαλυμένου οξυγόνου σε καθαρό νερό θερμοκρασίας $20^\circ C$

C : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο ανάμικτο υγρό

b : συντελεστής αναγωγής της συγκέντρωσης κορεσμού από το καθαρό νερό στο ανάμικτο υγρό με τυπική τιμή 0,95

Πίνακας 3.3 Εξισώσεις ρυθμού διεργασιών μοντέλου προσομοίωσης.

Διεργασίες j	Εξίσωση Ρυθμού ρ
Υδρόλυση	
1. Αερόβια υδρόλυση	$\rho_1 = K_H \cdot \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} \cdot X_{BH}$
2. Ανοξική υδρόλυση παρουσία νιτρικών SNO3	$\rho_2 = K_H \cdot n_{NO3H} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{S_{NO3}}{K_{NO3} + S_{NO3}} \cdot \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} \cdot X_{BH}$
3. Ανοξική υδρόλυση παρουσία νιτρωδών SNO2	$\rho_3 = K_H \cdot n_{NO3H} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{S_{NO2}}{K_{NO2} + S_{NO2}} \cdot \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} \cdot X_{BH}$
4. Αναερόβια υδρόλυση	$\rho_4 = K_X \cdot n_{f\#} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{K_{NO2}}{K_{NO2} + S_{NO2} + S_{NO3}} \cdot \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} \cdot X_{BH}$
Ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί ΧΒΗ	
5. Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών	$\rho_5 = m_H \cdot \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{BH}$
6. Απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών	$\rho_6 = m_H \cdot n_{NO3D} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot \frac{S_{NO3}}{K_{NO3} + S_{NO3}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{BH}$
7. Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών κατά τη μετατροπή των νιτρωδών SNO2 σε μονοξειδίο του αζώτου SNO	$\rho_7 = m_H \cdot n_{G3} \cdot \frac{K_{OH3}}{K_{OH3} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_{S3} + S_S} \cdot \frac{S_{NO2}}{K_{NO2D} + S_{NO2}} \cdot \frac{K_{i3NO}}{K_{i3NO} + S_{NO}} \cdot X_{BH}$
8. Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών κατά τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου SNO σε υποξειδίο του αζώτου SN2O	$\rho_8 = m_H \cdot n_{G4} \cdot \frac{K_{OH4}}{K_{OH4} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_{S4} + S_S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NOD} + S_{NO} + \frac{S_{NO}^2}{K_{i4NO}}} \cdot X_{BH}$
9. Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών κατά τη μετατροπή του υποξειδίου του αζώτου SN2O σε αέριο άζωτο SN2	$\rho_9 = m_H \cdot n_{G5} \cdot \frac{K_{OH5}}{K_{OH5} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_{S5} + S_S} \cdot \frac{S_{N2O}}{K_{N2OD} + S_{N2O}} \cdot \frac{K_{i5NO}}{K_{i5NO} + S_{NO}} \cdot X_{BH}$
10. Αποσύνθεση ετεροτροφικών μικροοργανισμών ΧΒΗ	$\rho_{10} = b_H \cdot X_{BH}$
Αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια ΧΑΟΒ	
11. Οξείδωση αμμωνίας SNH σε υδροξυλαμίνη SN2OH	$\rho_{11} = q_{AOBamo} \cdot \frac{S_O}{K_{OHAOB1} + S_O} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NHAOB} + S_{NH}} \cdot X_{AOB}$
12. Οξείδωση υδροξυλαμίνης SN2OH σε μονοξειδίο του αζώτου SNO	$\rho_{12} = m_{AOBHAO} \cdot \frac{S_O}{K_{OHAOB2} + S_O} \cdot \frac{S_{NH2OH}}{K_{NH2OHAOB} + S_{NH2OH}} \cdot \frac{S_{NH}}{10^{-12} + S_{NH}} \cdot X_{AOB}$
13. Οξείδωση μονοξειδίου του αζώτου SNO σε νιτρώδη SNO2	$\rho_{13} = q_{AOBHAO} \cdot \frac{S_O}{K_{OHAOB2} + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NOAOBHAO} + S_{NO}} \cdot X_{AOB}$
14. Αναγωγή μονοξειδίου του αζώτου SNO σε υποξειδίο του αζώτου SN2O	$\rho_{14} = q_{AOBN2ONN} \cdot \frac{S_{NH2OH}}{K_{NH2OHAOB} + S_{NH2OH}} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NOAOBNN} + S_{NO}} \cdot X_{AOB}$
15. Αναγωγή νιτρωδών SNO2 σε υποξειδίο του αζώτου SN2O	$\rho_{15} = q_{AOBN2OND} \cdot \frac{S_{NH2OH}}{K_{NH2OHAOB} + S_{NH2OH}} \cdot \frac{S_{HNO2}}{K_{HNO2AOB} + S_{HNO2}} \cdot f_{SO} \cdot X_{AOB}$ $f_{SO} = \frac{S_O}{K_{OHAOBND} + 1 - \sqrt{\frac{K_{OHAOBND}}{K_{iOHAOB}}}} \cdot \frac{S_O^2}{K_{iOHAOB}} \cdot S_O$ $S_{HNO2} = \frac{S_{NO2}}{K\alpha \cdot 10^{Ph} + 1} \cdot \frac{47}{14} \quad K\alpha = e^{-\frac{2300}{273 + therm}}$
17. Αποσύνθεση νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων ΧΑΟΒ	$\rho_{17} = b_{AOB} \cdot X_{AOB}$
Νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια ΧΝΟΒ	
16. Αερόβια ανάπτυξη νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων ΧΝΟΒ	$\rho_{16} = m_{NOB} \cdot \frac{S_O}{K_{OHNOB} + S_O} \cdot \frac{S_{NO2}}{K_{NO2NOB} + S_{NO2}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALKNOB} + S_{ALK}} \cdot X_{NOB}$
18. Αποσύνθεση νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων ΧΝΟΒ	$\rho_{18} = b_{NOB} \cdot X_{NOB}$

3.5 Δεξαμενή τελικής καθίζησης (ΔΤΚ)

3.5.1 Εισαγωγή

Η δεξαμενή τελικής καθίζησης (ΔΤΚ) αποτελεί βασική μονάδα του συστήματος ενεργού ιλύος σε βαθμό που η απόδοση της να είναι εκείνη που καθορίζει τελικά την ποιότητα της τελικής εκροής. Αποτελεί το τελικό στάδιο της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας και επιτελεί διττό ρόλο. Δημιουργεί τις συνθήκες ηρεμίας που επιτρέπουν τη διαύγαση των λυμάτων μέσω της καθίζησης της βιομάζας και του διαχωρισμού της από τα επεξεργασμένα λύματα και δίνει τη δυνατότητα επαρκούς συμπύκνωσης της βιομάζας, η οποία στη συνέχεια είτε επανέρχεται στο βιολογικό αντιδραστήρα μέσω της ανακυκλοφορίας της ιλύος, είτε απομακρύνεται από το σύστημα ως περίσσεια.

Η σημασία της λειτουργίας της δεξαμενή τελικής καθίζησης για την εγκατάσταση αποδεικνύεται από το γεγονός ότι ενώ οι βιολογικές διεργασίες που είναι υπεύθυνες για την απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου των λυμάτων λαμβάνουν χώρα στο βιολογικό αντιδραστήρα, εντούτοις η λειτουργία της ΔΤΚ είναι, τελικά, υπεύθυνη για την ποιότητα της εκροής. Επισημαίνεται ότι, η πλειοψηφία των περιστατικών κακής ποιότητας εκροών σε ΕΕΛ οφείλονται σε προβλήματα φόρτισης ή κακό σχεδιασμό της εν λόγω δεξαμενής.

Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι ο σωστός σχεδιασμός παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, καθώς οι θεωρίες που έχουν διατυπωθεί δεν μπορούν να περιγράψουν πάντα αποτελεσματικά τη διαδικασία καθίζησης των βιοκροκίδων, που υφίστανται συνεχείς μετατροπές ως προς τη σύσταση, το μέγεθος, την ταχύτητα καθίζησης και το βαθμό συμπύκνωσής τους. Έτσι, τα κριτήρια σχεδιασμού των ΔΤΚ είναι εμπειρικά, αποτέλεσμα της παρακολούθησης της λειτουργίας και των αποτελεσμάτων των λειτουργούντων εγκαταστάσεων.

3.5.2 Δείκτες καθιζησιμότητας ιλύος

Το φαινόμενο στο οποίο αποδίδεται ο τρόπος καθίζησης των στερεών στις δεξαμενές ονομάζεται «ζωνική καθίζηση» και πρόκειται για τη συνθήκη κατά την οποία μεταξύ των κροκίδων δρουν δυνάμεις αλληλεπίδρασης και τα συσσωματώματα καθιζάνουν με ομοιόμορφη ταχύτητα, σαν ένα στρώμα. Προκύπτει δε για υψηλές συγκεντρώσεις στερεών στο ανάμικτο υγρό, τάξεως μεγαλύτερης των 1000 mg/l.

Για την εκτίμηση της καθιζησιμότητας της ιλύος απαιτείται ο υπολογισμός δύο (2) παραμέτρων: του δείκτη Sludge Volume Index (SVI) και της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης (Zone Settling Velocity). Έχει αποδειχθεί ότι ανάμικτα υγρά που παρουσιάζουν μεγάλες τιμές SVI και μικρές ταχύτητες ζωνικής καθίζησης εμφανίζουν δυσμενή χαρακτηριστικά καθίζησης και απαιτούν μεγάλες επιφάνειες για την ΔΤΚ.

3.5.2.1 Δείκτης Sludge Volume Index (SVI)

Για τον υπολογισμό του SVI εκτελείται το ακόλουθο πείραμα. Τοποθετείται ανάμικτο υγρό συγκέντρωσης S (=MLSS) σε ογκομετρικό κύλινδρο 1 l και αφήνεται να καθιζήσει. Μετά από 30 λεπτά μετράται ο όγκος που καταλαμβάνει η ιλύς, κάτω απ' τη διαχωριστική επιφάνεια που έχει δημιουργηθεί.

Ο δείκτης SVI υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$SVI = \frac{V_{SL}}{MLSS}$$

Όπου SVI είναι ο δείκτης Sludge Volume Index, V_{SL} ο όγκος που καταλαμβάνει η ιλύς σε ογκομετρικό κύλινδρο 1 l (σε ml) και MLSS η συγκέντρωση στερεών στο ανάμικτο υγρό (σε mg/l)

Το πείραμα, λόγω της διαδικασίας που ακολουθείται, δίνει πλασματικές τιμές για τον δείκτη SVI σε περιπτώσεις υψηλής συγκέντρωσης MLSS ή κακής καθιζησιμότητας της ιλύος. Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται επαρκής αραιώση του ανάμικτου υγρού ώστε ο όγκος της ιλύος να είναι αρκετά μικρότερος του όγκου του κυλίνδρου και να μην επηρεάζεται το αποτέλεσμα του πειράματος από τις διαστάσεις του δοχείου. Ο δείκτης που προσδιορίζεται με την αραιώση του ανάμικτου υγρού ονομάζεται DSVI.

Εκτός του DSVI, για την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων της συμβατικής μεθόδου, έχει προταθεί η εκτέλεση του πειράματος σε ογκομετρικό κύλινδρο μεγαλύτερο του 1 l, εξοπλισμένο με μηχανισμό αργής ανάδευσης για αρχική συγκέντρωση MLSS 3500 mg/l. Ο δείκτης που υπολογίζεται με αυτή τη διαδικασία ονομάζεται SSVI (Stirred Sludge Volume Index).

Οι δείκτες DSVI και SSVI είναι γενικώς μικρότεροι αλλά αντιπροσωπευτικότεροι του SVI για την καθιζησιμότητα στις ΔTK. Μεταξύ τους, ο DSVI είναι συνήθως μεγαλύτερος και λόγω της ευκολίας της μεθόδου του πειράματος είναι, συνήθως, προτιμητέος.

3.5.2.2 Ταχύτητα ζωνικής καθίζησης

Η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης υπολογίζεται με τη μέτρηση της ταχύτητας υποβιβασμού της διαχωριστικής επιφάνειας, μεταξύ του στρώματος των βιοκροκίδων και του διαυγασμένου υγρού, κατά την εκτέλεση του πειράματος προσδιορισμού του SVI.

Άλλη μέθοδος, που δίνει πιο αξιόπιστες μετρήσεις της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης είναι η εκτέλεση του πειράματος σε κυλίνδρους καθίζησης μεγαλύτερης διαμέτρου και βάθους περίπου 2 m, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με μηχανισμό αργής ανάδευσης. Παρατηρείται ότι, η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης, που προκύπτει απ' την ταχύτητα υποβιβασμού της στάθμης της ιλύος, παραμένει σταθερή έως την έναρξη της διαδικασίας συμπύκνωσης της ιλύος στον πυθμένα του κυλίνδρου και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των MLSS.

Όταν η διαδικασία επαναλαμβάνεται με το ίδιο ανάμικτο υγρό σε διαφορετική συγκέντρωση προκύπτουν ζεύγη τιμών ταχυτήτων ζωνικής καθίζησης και MLSS με τα οποία κατασκευάζεται διάγραμμα για την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

3.5.3 Εμπειρικές εξισώσεις ταχύτητας καθίζησης

Η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης V_{SZ} εξαρτάται από τη συγκέντρωση της ιλύος και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κροκίδων, καθώς και από την παρουσία νηματοειδών οργανισμών (Ανδρεαδάκης, 2019). Έχουν αναπτυχθεί αρκετές εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της ζωνικής καθίζησης, όπου για τον προσδιορισμό των σταθερών της ταχύτητας καθίζησης χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα μετρήσεων, συναρτήσεως των συγκεντρώσεων, από λειτουργούσες εγκαταστάσεις. Η στατιστική επεξεργασία οδήγησε στον υπολογισμό των σταθερών, για ένα εύρος τιμών των δεικτών SVI, DSVI και SSVI. Ο Πίνακας 3.4 παρουσιάζει τις τιμές των σταθερών που προτάθηκαν από σχετικές μελέτες.

Η εξίσωση που εφαρμόστηκε στο συγκεκριμένο μοντέλο προτάθηκε από τον Ανδρεαδάκη (1993) και είναι η ακόλουθη:

$$V_{SZ} = V_0 \cdot e^{-k \cdot X}$$

$$V_0 = 11 - 0.025 \cdot DSVI$$

$$k = 0.22 + 0.0033 \cdot DSVI$$

Όπου, V_{SZ} : ταχύτητα ζωνικής καθίζησης (m/d)

V_0, k : σταθερές που εξαρτώνται από τα ποιοτικά/μορφολογικά χαρακτηριστικά

X : συγκέντρωση στερεών της ιλύος, MLSS (kg/m³)

Πίνακας 3.4 Τιμές των σταθερών V_0 και n , συναρτήσεως των δεικτών SVI, DSVI και SSVI (Πηγή: Μπούκας, 2008; Σαραντόπουλος, 2015; επεξεργασία από Γκόβα, 2017)

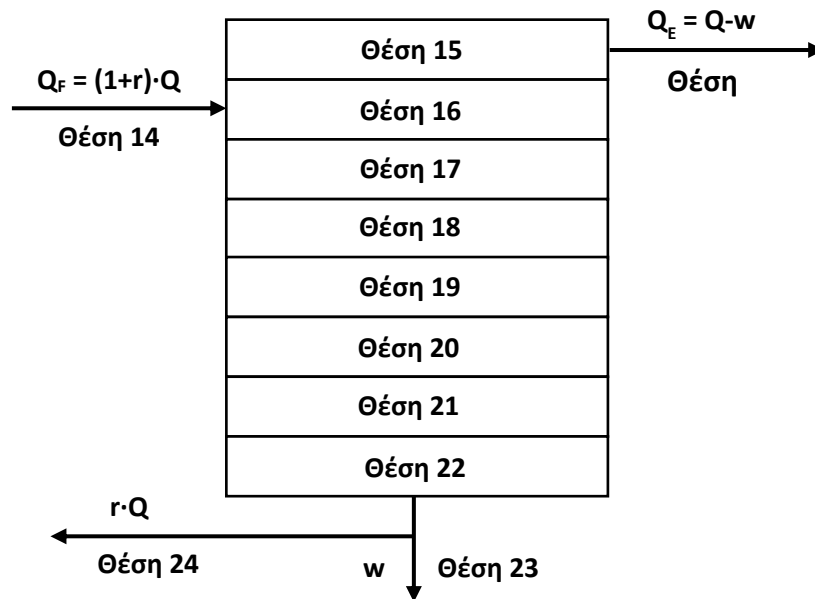
Forester (1982)			Rachwal et al. (1982)		
SSVI	V_0	k	SSVI	V_0	k
150	5.0	0.435	70	6.61	0.350
170	5.1	0.560	90	6.01	0.360
225	4.9	0.725	110	5.25	0.405
			134	4.11	0.410
Daiger and Roper (1985)			Andreadakis (1993)		
SVI	V_0	k	DSVI	V_0	k
44.05	7.80	0.741	44.05	9.98	0.365
64.81	7.80	0.284	64.81	9.62	0.441
95.81	7.80	0.349	95.81	8.28	0.538

3.5.4 Προσομοίωση δεξαμενής τελικής καθίζησης (ΔTK)

Για την προσομοίωση της δεξαμενής τελικής καθίζησης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των Βασιλοπούλου (1999), Μπούκα (2008) και Σαραντόπουλου (2015), το οποίο βασίζεται στη θεωρία ζωνικής καθίζησης.

Η δεξαμενή τελικής καθίζησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, χωρίζεται σε οκτώ (8) ισοϋψείς στρώσεις σταθερής επιφάνειας A m² και, με την εφαρμογή διαφορικών εξισώσεων, υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα οι μεταβολές των συγκεντρώσεων των σωματιδιακών

συστατικών κάθε στρώματος, ενώ τα διαλυτά συστατικά διατηρούν σταθερές συγκεντρώσεις σε όλο το ύψος της δεξαμενής, εκείνες οι οποίες είναι αποτέλεσμα των διεργασιών του βιοαντιδραστήρα και υπάρχουν στο ανάμικτο υγρό και μέχρι την έξοδο της εγκατάστασης.



Σχήμα 3.3 Διακριτοποίηση δεξαμενής τελικής καθίζησης (Πηγή: Σαραντόπουλος, 2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία)

3.5.4.1 Θέση 14 – Είσοδος ανάμικτου υγρού

Το ανάμικτο υγρό από το βιοαντιδραστήρα εισέρχεται στη δεξαμενή τελικής καθίζησης για να συντελεστεί η διαύγαση του και η συμπύκνωση της ιλύος. Οι συγκεντρώσεις όλων των συστατικών, διαλυτών και σωματιδιακών, παραμένουν αμετάβλητες και ίσες με τις συγκεντρώσεις του ανάμικτου υγρού στην έξοδο της δεξαμενής αερισμού.

3.5.4.2 Θέση 15 – Επιφανειακό στρώμα

Οι συγκεντρώσεις που παρατηρούνται σε αυτό το στρώμα είναι εκείνες που έχουν τα συστατικά των δευτεροβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων, μετά από υπερχειλίση, στη θέση 29 που βρίσκεται η έξοδος της δεξαμενής. Η διαφορική εξίσωση που υπολογίζει τη μεταβολή της συγκέντρωσης των σωματιδιακών συστατικών του επιφανειακού στρώματος είναι η ακόλουθη:

$$DX_i(15) = \left[-V_S \cdot X_i(15) + \frac{Q(29)}{A} \cdot \{X_i(16) - X_i(15)\} \right] \cdot \frac{dt}{H(15)}$$

3.5.4.3 Θέση 16 – Στρώμα τροφοδοσίας

Από το στρώμα τροφοδοσίας εισάγεται το ανάμικτο υγρό και ξεκινά η διαδικασία της καθίζησης. Η εξίσωση που προσδιορίζει τη μεταβολή της συγκέντρωσης των σωματιδιακών συστατικών είναι η εξής:

$$DX_i(16) = \left[\frac{V_S(15) \cdot X_i(15) - V_S(16) \cdot X_i(16) + \{Q(15) \cdot X_i(15) - (Q(29) + Q(16)) \cdot X_i(16)\}}{A} \right] \cdot \frac{dt}{H(16)}$$

3.5.4.4 Θέσεις 17-21 – Ενδιάμεσα στρώματα

Η μεταβολή της συγκέντρωσης στα ενδιάμεσα στρώματα 16 έως 21 είναι η ακόλουθη:

$$DX_i(I) = \left[V_S(I-1) \cdot X_i(I-1) - V_S(I) \cdot X_i(I) + \frac{Q(14) - Q(29)}{A} \cdot \{X_i(I-1) - X_i(I)\} \right] \cdot \frac{dt}{H(I)}$$

3.5.4.5 Θέση 22 – Στρώμα πυθμένα

Η μεταβολή της συγκέντρωσης των σωματιδιακών συστατικών στο στρώμα του πυθμένα παρουσιάζεται παρακάτω:

$$DX(22) = \left[V_S(21) \cdot X_i(9) + \frac{Q(14) - Q(29)}{A} \cdot \{X_i(21) - X_i(22)\} \right] \cdot \frac{dt}{H(22)}$$

3.5.4.6 Θέση 23 – Απομάκρυνση περίσσειας ιλύος

Η θέση αυτή αποτελεί την έξοδο της ιλύος από το σύστημα ενεργού ιλύος, με το οποίο γίνεται η επεξεργασία των λυμάτων, και την είσοδό της στη γραμμή επεξεργασίας ιλύος. Οι συγκεντρώσεις των διαλυτών και σωματιδιακών συστατικών στη θέση αυτή είναι ίσες με τις συγκεντρώσεις τους στον πυθμένα της ΔTK και στην εξωτερική ανακυκλοφορία της ιλύος.

3.5.4.7 Θέση 24 – Εξωτερική ανακυκλοφορία ιλύος

Από τη συγκεκριμένη θέση αντλείται μέρος της ιλύος που έχει συμπυκνωθεί στον πυθμένα της ΔTK, ύστερα από καθίζηση των αιωρούμενων στερεών, και επιστρέφει στην είσοδο του συστήματος ενεργού ιλύος. Πρέπει να σημειωθεί ότι, οι συγκεντρώσεις των συστατικών στη θέση αυτή είναι εκείνες που έχουν επιτευχθεί, για τα διαλυτά συστατικά στην έξοδο της δεξαμενής αερισμού και για τα σωματιδιακά συστατικά στον πυθμένα της ΔTK.

3.5.4.8 Θέση 29 – Έξοδος δευτεροβάθμιας επεξεργασμένης εκροής

Από τη θέση αυτή εκρέουν τα δευτεροβάθμια επεξεργασμένα λύματα, ύστερα από την καθίζηση του μεγαλύτερου ποσοστού των αιωρούμενων στερεών στον πυθμένα της δεξαμενής και τη συμπύκνωσή τους σε ιλύ. Πρόκειται για τη σημαντικότερη θέση της εγκατάστασης, όπου ελέγχεται η ποιότητα της εκροής, δηλαδή το αποτέλεσμα της επεξεργασίας.

3.5.5 Συγκέντρωσεις μεταβλητών σε χρονικό βήμα dt

Ακολουθούν οι εξισώσεις που αντιστοιχούν στον υπολογισμό της συγκέντρωσης των διαλυτών και σωματιδιακών μεταβλητών του μοντέλου σε κάθε χρονικό βήμα.

$$S_i(t + dt, I) = S_i(t, I) + DS_i(I)$$

$$X_i(t + dt, I) = X_i(t, I) + DX_i(I)$$

3.6 Μονάδα πάχυνσης ιλύος

3.6.1 Εισαγωγή

Η πάχυνση της ιλύος αποσκοπεί στην απομάκρυνση μέρους του περιεχόμενου νερού και τη μείωση του όγκου της ιλύος ώστε να καταστεί οικονομικότερη η διαδικασία της σταθεροποίησης και αφυδάτωσης. Έτσι, η αποδεκτή τιμή συγκέντρωσης στερεών σε αυτή την περίπτωση είναι 3%, με επιθυμητές τιμές 5-7%.

Η ιλύς που παράγεται σε μια ΕΕΛ προέρχεται από δύο ροές, εκείνη της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης και τη δεξαμενής τελικής καθίζησης. Παρόλο που υπάρχει η δυνατότητα η πρωτοβάθμια ιλύς να εξέρχεται με την επιθυμητή συγκέντρωση, δηλαδή 3-6%, από την πρωτοβάθμια επεξεργασία ώστε να μην απαιτείται η περαιτέρω πάχυνσή της, εντούτοις, στην πράξη το γεγονός ότι απομακρύνεται με συγκεντρώσεις 1,5-2%, επιβάλλει τελικά την εφαρμογή της. Σχετικά με τη δευτεροβάθμια ιλύ, οι συγκεντρώσεις που επιτυγχάνονται στη ΔΤΚ, της τάξεως του 0,5-1,5%, την καθιστούν, επίσης, επιβεβλημένη.

Η παραγόμενη ιλύς μπορεί να οδηγηθεί στην πάχυνση είτε ως μίγμα πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος, είτε ξεχωριστά η προερχόμενη από την ΔΠΚ από την δευτεροβάθμια που έχει ήδη υποστεί βιολογική επεξεργασία. Οι επιθυμητές συγκεντρώσεις πάχυνσης επιτυγχάνονται με την ακόλουθη τεχνολογία: πάχυνση με βαρύτητα, τράπεζες πάχυνσης, φυγοκέντρηση και επίπλευση. Η πάχυνση με βαρύτητα είναι οικονομικότερη καθώς καταναλώνει ελάχιστη ενέργεια και δεν απαιτεί προσθήκη χημικών. Συνήθως εφαρμόζεται στην περίπτωση της πρωτοβάθμιας ιλύος, ή σε μίγμα πρωτοβάθμιας και βιολογικής ιλύος. Απ' την άλλη, τα μηχανικά μέσα αποδεικνύονται πιο αποτελεσματικά όταν εφαρμόζεται πάχυνση βιολογικής ιλύος.

Μετά τη διαδικασία πάχυνσης, η ιλύς συνεχίζει στη ροή επεξεργασίας της, ενώ από τη μονάδα πάχυνσης εξέρχεται το νερό που απομακρύνεται απ' την ιλύ, το οποίο με τη μορφή στραγγιδίων, επιστρέφει στην είσοδο της εγκατάστασης και επανεισάγεται στο σύστημα επεξεργασίας.

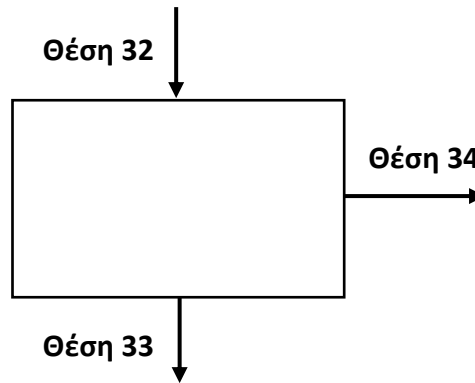
3.6.2 Προσομοίωση πάχυνσης ιλύος

Στο σύστημα που προσομοιώνεται εφαρμόστηκε πάχυνση βαρύτητας για την πρωτοβάθμια ιλύ και μηχανική πάχυνση για τη βιολογική ιλύ. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο πάχυνσης που εφαρμόζεται, η προσομοίωση της διαδικασίας πραγματοποιείται μέσω ισοζυγίων μάζας που βασίζονται στην απόδοση της μονάδας. Το ποσοστό συγκράτησης στερεών, το οποίο στο συγκεκριμένο σύστημα θεωρείται ότι ισούται με $CR_{thic} = 95\%$, καθορίζει τα σωματιδιακά συστατικά που θα συγκρατηθούν στη μονάδα ώστε να συμπυκνωθούν για να φτάσει η συγκέντρωση στερεών $C_{thic} = 50\text{kg/m}^3$.

Επισημαίνεται ότι η πάχυνση μεταβάλλει τις συγκεντρώσεις των σωματιδιακών συστατικών, ενώ εκείνες των διαλυτών συστατικών δεν μεταβάλλονται.

3.6.2.1 Πάχυνση βαρύτητας πρωτοβάθμιας ιλύος

Το Σχήμα 3.4 παρουσιάζει τις θέσεις του παχυντή βαρύτητας.



Σχήμα 3.4 Θέσεις εισόδου και εξόδου, ιλύος και στραγγιδίων μονάδας πάχυνσης βαρύτητας (Πηγή: Σαραντόπουλος, 2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία)

3.6.2.1.1 Θέση 32 – Είσοδος πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων

Η πρωτοβάθμια ιλύς από την δεξαμενή καθίζησης εισέρχεται στη θέση 32 της δεξαμενής βαρυτικής πάχυνσης.

Από τη συγκέντρωση των στερεών και την παροχή της ιλύος υπολογίζεται η μάζα στερεών, καθώς και των σωματιδιακών μεταβλητών που εισέρχονται στη μονάδα πάχυνσης.

$$M_{TSS}(32) = TSS(32) \cdot Q(32)$$

$$M_{X_i}(32) = X_i(32) \cdot Q(32)$$

3.6.2.1.2 Θέση 33 – Έξοδος πρωτοβάθμιας παχυμένης ιλύος

Η μάζα των ολικών αιωρούμενων στερεών στην παχυμένη ιλύ υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{TSS}(33) = \frac{CR_{thic}}{100} \cdot M_{TSS}(32)$$

Η παροχή της ιλύος υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(33) = \frac{M_{TSS}(32)}{C_{thic}}$$

Κατ' αντιστοιχία υπολογίζονται η μάζα και η συγκέντρωση όλων των σωματιδιακών συστατικών:

$$M_{X_i}(33) = \frac{CR_{thic}}{100} \cdot M_{X_i}(32)$$

$$X_i(33) = \frac{M_{X_i}(33)}{Q(33)}$$

Για την περίπτωση των διαλυτών συστατικών, οι συγκεντρώσεις και η μάζα τους στην ιλύ υπολογίζονται με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$S_i(33) = S_i(32)$$

$$M_{S_i}(33) = S_i(33) \cdot Q(33)$$

Το διαλυτό οξυγόνο καταναλώνεται πλήρως κατά την πάχυνση της ιλύος και η συγκέντρωσή του στην παχυμένη ιλύ και τα στραγγίδια μηδενίζεται. Κατά συνέπεια ισχύει ότι:

$$S_o(33) = 0$$

3.6.2.1.3 Θέση 34 – Έξοδος στραγγιδίων πάχυνσης βαρύτητας

Η παροχή των στραγγιδίων που απομακρύνονται από μονάδα πάχυνσης υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(34) = Q(32) - Q(33)$$

Για τη μάζα και τη συγκέντρωση των σωματιδιακών συστατικών ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_{X_i}(34) = M_{X_i}(32) - M_{X_i}(33)$$

$$X_i(34) = \frac{M_{X_i}(34)}{Q(34)}$$

Σχετικά με τα διαλυτά συστατικά, οι συγκεντρώσεις στα στραγγίδια δεν μεταβάλλονται και κατά συνέπεια ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις.

$$S_i(34) = S_i(32)$$

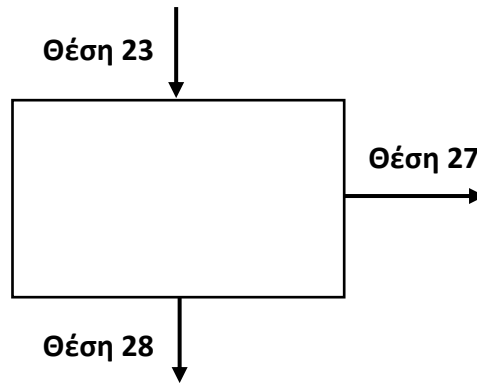
$$M_{S_i}(34) = S_i(34) \cdot Q(34)$$

Διαφοροποίηση υπάρχει για το διαλυμένο οξυγόνο για το οποίο ισχύει:

$$S_o(34) = 0$$

3.6.2.2 Μηχανική πάχυνση δευτεροβάθμιας ιλύος

Το Σχήμα 3.5 παρουσιάζει τις θέσεις του μηχανικού παχυντή.



Σχήμα 3.5 Θέσεις εισόδου και εξόδου, ιλύος και στραγγιδίων μονάδας μηχανικής πάχυνσης (Πηγή: Σαραντόπουλος, 2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία)

3.6.2.2.1 Θέση 23 – Είσοδος δευτεροβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων

Η δευτεροβάθμια ιλύς από την δεξαμενή καθίζησης εισέρχεται στη θέση 23 του μηχανικού παχυντή.

Όπως και προηγουμένως, από τη συγκέντρωση των στερεών και την παροχή της ιλύος υπολογίζεται η μάζα στερεών, καθώς και των σωματιδιακών μεταβλητών που εισέρχονται στη μονάδα πάχυνσης.

$$M_{TSS}(23) = TSS(23) \cdot Q(23)$$

$$M_{X_i}(23) = X_i(23) \cdot Q(23)$$

3.6.2.2.2 Θέση 33 – Έξοδος δευτεροβάθμιας παχυμένης ιλύος

Η μάζα των ολικών αιωρούμενων στερεών στην παχυμένη ιλύ υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{TSS}(28) = \frac{CR_{thic}}{100} \cdot M_{TSS}(23)$$

Η παροχή της ιλύος υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(28) = \frac{M_{TSS}(28)}{C_{thic}}$$

Κατ' αντιστοιχία υπολογίζονται η μάζα και η συγκέντρωση όλων των σωματιδιακών συστατικών:

$$M_{X_i}(28) = \frac{CR_{thic}}{100} \cdot M_{X_i}(23)$$

$$X_i(28) = \frac{M_{X_i}(28)}{Q(28)}$$

Για την περίπτωση των διαλυτών συστατικών, οι συγκεντρώσεις και η μάζα τους στην ιλύ υπολογίζονται με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$S_i(28) = S_i(23)$$

$$M_{S_i}(28) = S_i(28) \cdot Q(28)$$

Το διαλυτό οξυγόνο καταναλώνεται πλήρως κατά την πάχυνση της ιλύος και η συγκέντρωσή του στην παχυμένη ιλύ και τα στραγγίδια μηδενίζεται. Κατά συνέπεια ισχύει ότι:

$$S_o(28) = 0$$

3.6.2.2.3 Θέση 7 – Έξοδος στραγγιδίων μηχανικής πάχυνσης

Η παροχή των στραγγιδίων που απομακρύνονται από μονάδα πάχυνσης υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(27) = Q(23) - Q(28)$$

Για τη μάζα και τη συγκέντρωση των σωματιδιακών συστατικών ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_{X_i}(27) = M_{X_i}(23) - M_{X_i}(28)$$

$$X_i(27) = \frac{M_{X_i}(27)}{Q(27)}$$

Σχετικά με τα διαλυτά συστατικά, οι συγκεντρώσεις στα στραγγίδια δεν μεταβάλλονται και κατά συνέπεια ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις.

$$S_i(27) = S_i(23)$$

$$M_{S_i}(27) = S_i(27) \cdot Q(27)$$

Διαφοροποίηση υπάρχει για το διαλυμένο οξυγόνο για το οποίο ισχύει:

$$S_o(27) = 0$$

3.6.2.2.4 Απαιτούμενη ποσότητα πολυηλεκτρολύτη για τη μηχανική πάχυνση

Κατ' εκτίμηση η απαιτούμενη ποσότητα πολυηλεκτρολύτη ανά μάζα στερεών είναι $b=5\text{gr/kgTSS}$. Έτσι, ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας δίνεται από τη σχέση:

$$M_{pol_thic} = b \cdot M_{TSS}(23)$$

3.7 Μονάδα αναερόβιας χώνευσης

3.7.1 Εισαγωγή

Τόσο η πρωτοβάθμια, όσο και η δευτεροβάθμια ιλύς που παράγονται ως παραπροϊόν της επεξεργασίας των λυμάτων περιέχουν σημαντικό ποσοστό οργανικών στερεών, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η άμεση διάθεσή τους στο περιβάλλον. Η παρουσία οργανικού C και παθογόνων στη μη σταθεροποιημένη λάσπη ενέχει περιβαλλοντικούς κινδύνους, όπως η αποξυγόνωση και η μικροβιακή μόλυνση των υδάτινων αποδεκτών.

Για τη σταθεροποίηση της ιλύος, δηλαδή την απομάκρυνση του οργανικού της φορτίου μπορούν να εφαρμοστούν εναλλακτικές μέθοδοι, σε αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες. Επισημαίνεται ότι

ο αερόβιος μεταβολισμός είναι πολύ ταχύτερος από τον αναερόβιο, αλλά απαιτεί κατανάλωση οξυγόνου και διαθέτει μεγαλύτερο συντελεστή μετατροπής βιομάζας Υ. Αυτό σημαίνει ότι μεγαλύτερο ποσοστό του οργανικού υλικού που διασπάται μετατρέπεται σε βιομάζα, συγκριτικά με τον αναερόβιο μεταβολισμό, και η παραγωγή ιλύος, τελικά, είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα, ο αναερόβιος μεταβολισμός δεν απαιτεί οξυγόνο και παράγει μικρότερη ποσότητα ιλύος, αλλά η μικρή ταχύτητα της διεργασίας απαιτεί την πραγματοποίησή της σε μεγάλη δεξαμενή.

Πέραν των παραπάνω όμως, το σημαντικότερο πλεονέκτημα της αναερόβιας χώνευσης είναι η παραγωγή βιοαερίου, δηλαδή μίγματος μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο μπορεί να οδηγηθεί στη συνέχεια στη μονάδα συμπαραγωγής για τη μετατροπή του σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Τελικά, μέσω της καύσης του βιοαερίου καλύπτονται οι ανάγκες θέρμανσης του χωνευτή και οι ενεργειακές απαιτήσεις άλλων μονάδων της εγκατάστασης.

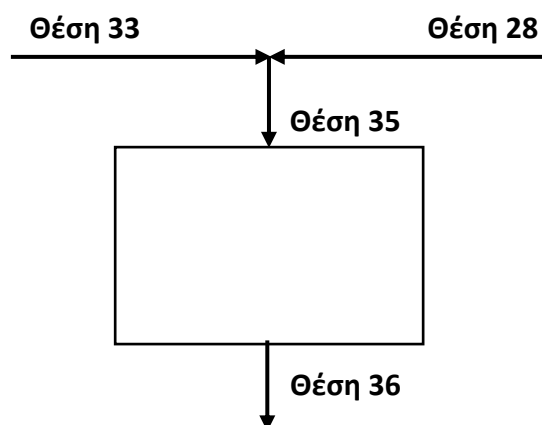
Η απόδοση της χώνευσης επηρεάζεται από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο χωνευτή. Η χώνευση στους 35°C ονομάζεται μεσοφιλική χώνευση και εφαρμόζεται συχνότερα καθώς είναι οικονομικότερη μέθοδος, ενώ η χώνευση στους 55 °C ονομάζεται θερμοφιλική χώνευση και επιλέγεται σπανιότερα λόγω του κόστους θέρμανσης. Στην Ελλάδα οι περισσότερες εγκαταστάσεις εφαρμόζουν τη μεσοφιλική χώνευση.

Μετά τη διαδικασία χώνευσης, η σταθεροποιημένη ιλύς συνεχίζει στη γραμμή επεξεργασίας της προς την αφυδάτωση.

3.7.2 Προσομοίωση αναερόβιας χώνευσης ιλύος

Η προσομοίωση της λειτουργίας της μονάδας αναερόβιας χώνευσης πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή εμπειρικού μαθηματικού μοντέλου που ανέπτυξε ο Κόκκινος (2017) βασιζόμενος στο ADM1. Το μοντέλο περιλαμβάνει κώδικα επίλυσης που δέχεται δεδομένα και υπολογίζει τη χώνευση κάθε είδους οργανικού υλικού εφαρμόζοντας ένα συνδυασμό εξισώσεων Runge-Kutta και Van der Pol. από τις οποίες προκύπτουν οι συγκεντρώσεις των συστατικών του μοντέλου στην έξοδο του αναερόβιου χωνευτή και των αερίων στο μίγμα του βιοαερίου που παράγεται.

Το Σχήμα 3.6 παρουσιάζει τις θέσεις του αναερόβιου χωνευτή.



Σχήμα 3.6 Θέσεις εισόδου και εξόδου της ιλύος στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης (Πηγή: Σαραντόπουλος, 2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία)

3.7.2.1 Θέση 33 – Είσοδος πρωτοβάθμιας παχυμένης ιλύος

Η πρωτοβάθμια παχυμένη ιλύς, προερχόμενη από τον παχυντή βαρύτητας, εισέρχεται στη θέση 33, πριν την ανάμιξή της με τη δευτεροβάθμια παχυμένη ιλύ και την κοινή τους είσοδο στον αναερόβιο χωνευτή.

3.7.2.2 Θέση 28 – Είσοδος δευτεροβάθμιας παχυμένης ιλύος

Η δευτεροβάθμια παχυμένη ιλύς, προερχόμενη από τον μηχανικό παχυντή, εισέρχεται στη θέση 28, πριν την ανάμιξή της με τη πρωτοβάθμια παχυμένη ιλύ και την κοινή τους είσοδο στον αναερόβιο χωνευτή.

3.7.2.3 Θέση 35 – Είσοδος μίγματος πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας παχυμένης ιλύος

Στη θέση 35 γίνεται ανάμιξη της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας παχυμένης ιλύος και το μίγμα εισέρχεται στον αναερόβιο χωνευτή για να σταθεροποιηθεί το οργανικό κλάσμα του.

Το σύστημα, όπως έχει στηθεί, δίνει τη δυνατότητα για εναλλακτική διαχείριση των προς επεξεργασία λυμάτων. Δηλαδή υπάρχει επιλογή για πρωτοβάθμια ή όχι καθίζηση και σταθεροποίηση στο βιολογικό χαρακτήρα, όταν ο χρόνος παραμονής στερεών είναι ικανός, δηλαδή 7c μεγαλύτερο από 15 ημέρες, ή σταθεροποίηση στον αναερόβιο χωνευτή. Ανάλογα με τις επιλογές που γίνονται σε κάθε προσομοίωση οι γραμμές 33 και 28 μπορεί να έχουν ή όχι παροχή ιλύος.

Τα χαρακτηριστικά της ιλύος για τη θέση 35 υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Q(35) = Q(33) + Q(28)$$

Για τα σωματιδιακά συστατικά ισχύουν οι επόμενες σχέσεις:

$$M_{X_i}(35) = M_{X_i}(33) + M_{X_i}(28)$$

$$X_i(35) = \frac{M_{X_i}(35)}{Q(35)}$$

Για τα διαλυτά συστατικά εφαρμόζονται οι εξής εξισώσεις:

$$M_{S_i}(35) = M_{S_i}(33) + M_{S_i}(28)$$

$$S_i(35) = \frac{M_{S_i}(35)}{Q(35)}$$

Επίσης υπολογίζονται τα παρακάτω στοιχεία:

$$COD_{in_{dig}} = COD(35) = \left\{ \begin{array}{l} S_S(35) + S_I(35) + X_S(35) + X_I(35) \\ + X_{BH}(35) + X_{AOB}(35) + X_{NOB}(35) \end{array} \right\}$$

$$TKNin_{dig} = TKN(35) = \left\{ \begin{array}{l} (X_{BH}(35) + X_{AOB}(35) + X_{NOB}(35)) \cdot i_{xb} + X_I(35) \cdot i_{xp} \\ + X_S(35) \cdot i_{NXS} + S_I(35) \cdot i_{NSI} + S_{NH}(35) \end{array} \right\}$$

$$P_{2as}(35) = \frac{M_{VSS}(28)}{M_{VSS}(35)}$$

3.7.2.4 Θέση 36 – Έξοδος σταθεροποιημένης ιλύος

Για την εφαρμογή των εξισώσεων με τις οποίες υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των συστατικών της ιλύος μετά την αναερόβια χώνευση, απαιτείται ο υπολογισμός του υδραυλικού χρόνου παραμονής σε ημέρες (HRT_{dig}) του αναερόβιου χωνευτή, σύμφωνα με τον όγκο της δεξαμενής σε m³ (V_{dig}) και την παροχή της ιλύος σε m³/d. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται διαφορετικές εξισώσεις για διαφορετικούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής.

$$HRT_{dig} = \frac{V_{dig}}{Q(36)}$$

$$Q(36) = Q(35)$$

3.7.2.4.1 Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για 14d ≤ HRT ≤ 19d

Οι συγκεντρώσεις των συστατικών του μοντέλου μετά την έξοδο της αναερόβιας χώνευσης υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$COD_{dig} = (38.61 \cdot (P_{2as})^3 - 76.92 \cdot (P_{2as})^2 + 50.55 \cdot (P_{2as}) + 40) \cdot COD(35)/100$$

$$S_I(36) = (-1.320 \cdot (P_{2as})^2 + 1.017 \cdot (P_{2as}) + 5.4) \cdot COD_{dig}/100$$

$$S_S(36) = (-1.173 \cdot (P_{2as})^3 + 2.275 \cdot (P_{2as})^2 - 1.241 \cdot (P_{2as}) + 1.55) \cdot COD_{dig}/100$$

$$X_I(36) = (8.078 \cdot (P_{2as}) + 26.0) \cdot COD_{dig}/100$$

$$X_S(36) = (-7.721 \cdot (P_{2as}) + 69.0) \cdot COD_{dig}/100$$

$$X_{BH}(36) = 0$$

$$X_{AOB}(36) = 0$$

$$X_{NOB}(36) = 0$$

$$S_O(36) = 0$$

$$S_{NO}(36) = 0$$

$$S_{NO_2}(36) = 0$$

$$S_{NO_3}(36) = 0$$

$$S_{N_2}(36) = 0$$

$$S_{N_2O}(36) = 0$$

$$S_{NH_2OH}(36) = 0$$

$$S_{ALK}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (-9262.0 \cdot (P_2as)^4 + 28637.0 \cdot (P_2as)^3 - 31731.0 \cdot (P_2as)^2 + \\ 14158.0 \cdot (P_2as) + 3000.0) \cdot S_{ALK}(35)/500 \end{array} \right\}$$

$$X_{NV}(36) = X_{NV}(35)$$

$$X(36) = X_I(36) + X_S(36) + X_{BH}(36) + X_{AOB}(36) + X_{NOB}(36)$$

$$TSS(36) = VSS(36) + X_{NV}(36)$$

Το παραγόμενο βιοαέριο υπολογίζεται από τις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις:

$$S_{biogas}(36) = 0.154 \cdot (P_2as)^2 - 0.229 \cdot (P_2as) + 0.51$$

$$Q_{gas}(36) = S_{biogas}(36) \cdot Q(35) \cdot VSS(35)/1000$$

$$Q_{ch4}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (32.58 \cdot (P_2as)^6 - 104 \cdot (P_2as)^5 + 124.4 \cdot (P_2as)^4 - 66.42 \cdot (P_2as)^3 + \\ 13.01 \cdot (P_2as)^2 + 0.869 \cdot (P_2as) + 58.5) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{co2}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (7.288 \cdot (P_2as)^5 - 16.69 \cdot (P_2as)^4 + 10.82 \cdot (P_2as)^3 + \\ +0.407 \cdot (P_2as)^2 - 2.352 \cdot (P_2as) + 36.65) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{h2}(36) = \{ (9 \cdot (10)^{-5} \cdot (P_2as) + 0.001) \cdot Q_{gas}(36)/100 \}$$

$$Q_{h2o}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (0.309 \cdot (P_2as)^3 - 0.619 \cdot (P_2as)^2 + \\ 0.430 \cdot (P_2as) + 4.865) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

3.7.2.4.2 Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για $19d \leq HRT \leq 25d$

Οι συγκεντρώσεις των συστατικών του μοντέλου μετά την έξοδο της αναερόβιας χώνευσης υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$CODdig = (38.61 \cdot (P_2as)^3 - 76.92 \cdot (P_2as)^2 + 50.55 \cdot (P_2as) + 40) \cdot COD(35)/100$$

$$S_I(36) = (-1.320 \cdot (P_2as)^2 + 1.017 \cdot (P_2as) + 6.420) \cdot CODdig/100$$

$$S_S(36) = (-1.173 \cdot (P_2as)^3 + 2.275 \cdot (P_2as)^2 - 1.241 \cdot (P_2as) + 1.008) \cdot CODdig/100$$

$$X_I(36) = (8.078 \cdot (P_2as) + 31.93) \cdot CODdig/100$$

$$X_S(36) = (-7.721 \cdot (P_2as) + 60.56) \cdot CODdig/100$$

$$X_{BH}(36) = 0$$

$$X_{AOB}(36) = 0$$

$$X_{NOB}(36) = 0$$

$$S_O(36) = 0$$

$$S_{NO}(36) = 0$$

$$S_{NO2}(36) = 0$$

$$S_{NO3}(36) = 0$$

$$S_{N2}(36) = 0$$

$$S_{N_2O}(36) = 0$$

$$S_{NH_2OH}(36) = 0$$

$$S_{ALK}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (-9262.0 \cdot (P_2as)^4 + 28637.0 \cdot (P_2as)^3 - 31731.0 \cdot (P_2as)^2 + \\ 14158.0 \cdot (P_2as) + 3679.0) \cdot S_{ALK}(35)/500 \end{array} \right\}$$

$$X_{NV}(36) = X_{NV}(35)$$

$$X(36) = X_I(36) + X_S(36) + X_{BH}(36) + X_{AOB}(36) + X_{NOB}(36)$$

$$TSS(36) = VSS(36) + X_{NV}(36)$$

Το παραγόμενο βιοαέριο υπολογίζεται από τις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις:

$$S_{biogas}(36) = 0.154 \cdot (P_2as)^2 - 0.229 \cdot (P_2as) + 0.523$$

$$Q_{gas}(36) = S_{biogas}(36) \cdot Q(35) \cdot VSS(35)/1000$$

$$Q_{ch_4}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (32.58 \cdot (P_2as)^6 - 104 \cdot (P_2as)^5 + 124.4 \cdot (P_2as)^4 - 66.42 \cdot (P_2as)^3 + \\ 13.01 \cdot (P_2as)^2 + 0.869 \cdot (P_2as) + 58.60) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{co_2}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (7.288 \cdot (P_2as)^5 - 16.69 \cdot (P_2as)^4 + 10.82 \cdot (P_2as)^3 + \\ + 0.407 \cdot (P_2as)^2 - 2.352 \cdot (P_2as) + 36.56) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{h_2}(36) = \{ (9 \cdot (10)^{-5} \cdot (P_2as) + 0.001) \cdot Q_{gas}(36)/100 \}$$

$$Q_{h_2o}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (0.309 \cdot (P_2as)^3 - 0.619 \cdot (P_2as)^2 + \\ 0.430 \cdot (P_2as) + 4.835) \cdot Q_{gas}(4)/100 \end{array} \right\}$$

3.7.2.4.3 Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για $25d \leq HRT \leq 30d$

Οι συγκεντρώσεις των συστατικών του μοντέλου μετά την έξοδο της αναερόβιας χώνευσης υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$CODdig = (38.61 \cdot (P_2as)^3 - 76.92 \cdot (P_2as)^2 + 50.55 \cdot (P_2as) + 35.0) \cdot COD(35)/100$$

$$S_I(36) = (-1.320 \cdot (P_2as)^2 + 1.017 \cdot (P_2as) + 6.9) \cdot CODdig/100$$

$$S_S(36) = (-1.173 \cdot (P_2as)^3 + 2.275 \cdot (P_2as)^2 - 1.241 \cdot (P_2as) + 0.82) \cdot CODdig/100$$

$$X_I(36) = (8.078 \cdot (P_2as) + 36.0) \cdot CODdig/100$$

$$X_S(36) = (-7.721 \cdot (P_2as) + 55.5) \cdot CODdig/100$$

$$X_{BH}(36) = 0$$

$$X_{AOB}(36) = 0$$

$$X_{NOB}(36) = 0$$

$$S_O(36) = 0$$

$$S_{NO}(36) = 0$$

$$S_{NO_2}(36) = 0$$

$$S_{NO_3}(36) = 0$$

$$S_{N_2}(36) = 0$$

$$S_{N_2O}(36) = 0$$

$$S_{NH_2OH}(36) = 0$$

$$S_{ALK}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (-9262.0 \cdot (P_{2as})^4 + 28637.0 \cdot (P_{2as})^3 - 31731.0 \cdot (P_{2as})^2 + \\ 14158.0 \cdot (P_{2as}) + 3679.0) \cdot S_{ALK}(35)/500 \end{array} \right\}$$

$$X_{NV}(36) = X_{NV}(35)$$

$$X(36) = X_I(36) + X_S(36) + X_{BH}(36) + X_{AOB}(36) + X_{NOB}(36)$$

$$TSS(36) = VSS(36) + X_{NV}(36)$$

Το παραγόμενο βιοαέριο υπολογίζεται από τις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις:

$$S_{biogas}(36) = 0.154 \cdot (P_{2as})^2 - 0.229 \cdot (P_{2as}) + 0.55$$

$$Q_{gas}(36) = S_{biogas}(36) \cdot Q(35) \cdot VSS(35)/1000$$

$$Q_{ch_4}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (32.58 \cdot (P_{2as})^6 - 104 \cdot (P_{2as})^5 + 124.4 \cdot (P_{2as})^4 - 66.42 \cdot (P_{2as})^3 + \\ 13.01 \cdot (P_{2as})^2 + 0.869 \cdot (P_{2as}) + 58.68) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{co_2}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (7.288 \cdot (P_{2as})^5 - 16.69 \cdot (P_{2as})^4 + 10.82 \cdot (P_{2as})^3 + \\ + 0.407 \cdot (P_{2as})^2 - 2.352 \cdot (P_{2as}) + 36.52) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{h_2}(36) = \{ (9 \cdot (10)^{-5} \cdot (P_{2as}) + 0.001) \cdot Q_{gas}(36)/100 \}$$

$$Q_{h_2o}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (0.309 \cdot (P_{2as})^3 - 0.619 \cdot (P_{2as})^2 + \\ 0.430 \cdot (P_{2as}) + 4.82) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

3.7.2.4.4 Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για $30d \leq HRT \leq 35d$

Οι συγκεντρώσεις των συστατικών του μοντέλου μετά την έξοδο της αναερόβιας χώνευσης υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$CODdig = (38.61 \cdot (P_{2as})^3 - 76.92 \cdot (P_{2as})^2 + 50.55 \cdot (P_{2as}) + 35.0) \cdot COD(35)/100$$

$$S_I(36) = (-1.320 \cdot (P_{2as})^2 + 1.017 \cdot (P_{2as}) + 7.0) \cdot CODdig/100$$

$$S_S(36) = (-1.173 \cdot (P_{2as})^3 + 2.275 \cdot (P_{2as})^2 - 1.241 \cdot (P_{2as}) + 0.75) \cdot CODdig/100$$

$$X_I(36) = (8.078 \cdot (P_{2as}) + 41.0) \cdot CODdig/100$$

$$X_{BH}(36) = 0$$

$$X_{AOB}(36) = 0$$

$$X_{NOB}(36) = 0$$

$$S_O(36) = 0$$

$$S_{NO}(36) = 0$$

$$S_{NO_2}(36) = 0$$

$$S_{NO_3}(36) = 0$$

$$S_{N_2}(36) = 0$$

$$S_{N_2O}(36) = 0$$

$$S_{NH_2OH}(36) = 0$$

$$S_{ALK}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (-9262.0 \cdot (P_{2as})^4 + 28637.0 \cdot (P_{2as})^3 - 31731.0 \cdot (P_{2as})^2 + \\ 14158.0 \cdot (P_{2as}) + 3679.0) \cdot S_{ALK}(35)/500 \end{array} \right\}$$

$$X_{NV}(36) = X_{NV}(35)$$

$$X(36) = X_I(36) + X_S(36) + X_{BH}(36) + X_{AOB}(36) + X_{NOB}(36)$$

$$TSS(36) = VSS(36) + X_{NV}(36)$$

Το παραγόμενο βιοαέριο υπολογίζεται από τις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις:

$$S_{biogas}(36) = 0.154 \cdot (P_{2as})^2 - 0.229 \cdot (P_{2as}) + 0.57$$

$$Q_{gas}(36) = S_{biogas}(36) \cdot Q(35) \cdot VSS(35)/1000$$

$$Q_{ch_4}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (32.58 \cdot (P_{2as})^6 - 104 \cdot (P_{2as})^5 + 124.4 \cdot (P_{2as})^4 - 66.42 \cdot (P_{2as})^3 + \\ 13.01 \cdot (P_{2as})^2 + 0.869 \cdot (P_{2as}) + 58.7) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{co_2}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (7.288 \cdot (P_{2as})^5 - 16.69 \cdot (P_{2as})^4 + 10.82 \cdot (P_{2as})^3 + \\ + 0.407 \cdot (P_{2as})^2 - 2.352 \cdot (P_{2as}) + 36.5) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{h_2}(36) = \{(9 \cdot (10)^{-5} \cdot (P_{2as}) + 0.001) \cdot Q_{gas}(36)/100\}$$

$$Q_{h_2o}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (0.309 \cdot (P_{2as})^3 - 0.619 \cdot (P_{2as})^2 + \\ 0.430 \cdot (P_{2as}) + 4.81) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

3.7.2.4.5 Εξισώσεις αναερόβιας χώνευσης για HRT > 35d

Οι συγκεντρώσεις των συστατικών του μοντέλου μετά την έξοδο της αναερόβιας χώνευσης υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$CODdig = (38.61 \cdot (P_{2as})^3 - 76.92 \cdot (P_{2as})^2 + 50.55 \cdot (P_{2as}) + 35.0) \cdot COD(35)/100$$

$$S_I(36) = (-1.320 \cdot (P_{2as})^2 + 1.017 \cdot (P_{2as}) + 7.0) \cdot CODdig/100$$

$$S_S(36) = (-1.173 \cdot (P_{2as})^3 + 2.275 \cdot (P_{2as})^2 - 1.241 \cdot (P_{2as}) + 0.75) \cdot CODdig/100$$

$$X_I(36) = (8.078 \cdot (P_{2as}) + 41.0) \cdot CODdig/100$$

$$X_{BH}(36) = 0$$

$$X_{AOB}(36) = 0$$

$$X_{NOB}(36) = 0$$

$$S_O(36) = 0$$

$$S_{NO}(36) = 0$$

$$S_{NO2}(36) = 0$$

$$S_{NO3}(36) = 0$$

$$S_{N2}(36) = 0$$

$$S_{N2O}(36) = 0$$

$$S_{NH2OH}(36) = 0$$

$$S_{ALK}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (-9262.0 \cdot (P_2as)^4 + 28637.0 \cdot (P_2as)^3 - 31731.0 \cdot (P_2as)^2 + \\ 14158.0 \cdot (P_2as) + 3679.0) \cdot S_{ALK}(35)/500 \end{array} \right\}$$

$$X_{NV}(36) = X_{NV}(35)$$

$$X(36) = X_I(36) + X_S(36) + X_{BH}(36) + X_{AOB}(36) + X_{NOB}(36)$$

$$TSS(36) = VSS(36) + X_{NV}(36)$$

Το παραγόμενο βιοαέριο υπολογίζεται από τις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις:

$$S_{biogas}(36) = 0.154 \cdot (P_2as)^2 - 0.229 \cdot (P_2as) + 0.57$$

$$Q_{gas}(36) = S_{biogas}(36) \cdot Q(35) \cdot VSS(35)/1000$$

$$Q_{ch4}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (32.58 \cdot (P_2as)^6 - 104 \cdot (P_2as)^5 + 124.4 \cdot (P_2as)^4 - 66.42 \cdot (P_2as)^3 + \\ 13.01 \cdot (P_2as)^2 + 0.869 \cdot (P_2as) + 58.7) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{co2}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (7.288 \cdot (P_2as)^5 - 16.69 \cdot (P_2as)^4 + 10.82 \cdot (P_2as)^3 + \\ +0.407 \cdot (P_2as)^2 - 2.352 \cdot (P_2as) + 36.5) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

$$Q_{h2}(36) = \{ (9 \cdot (10)^{-5} \cdot (P_2as) + 0.001) \cdot Q_{gas}(36)/100 \}$$

$$Q_{h2o}(36) = \left\{ \begin{array}{l} (0.309 \cdot (P_2as)^3 - 0.619 \cdot (P_2as)^2 + \\ 0.430 \cdot (P_2as) + 4.81) \cdot Q_{gas}(36)/100 \end{array} \right\}$$

3.7.3 Αξιοποίηση βιοαερίου

Το βιοαέριο που παράγεται κατά τη χώνευση της ιλύος είναι μίγμα αερίων αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο, σε ποσοστό 65-70% και διοξείδιο του άνθρακα σε ποσοστό 30-35%. Η θερμαντική του αξία εκτιμάται περίπου στις 5500Kcal/m³ και χρησιμοποιείται, κατά κύριο λόγο, για τη θέρμανση των χωνευτών. Εναλλακτική χρήση είναι η θέρμανση των κτιρίων της εγκατάστασης, ενώ το καλοκαίρι, που οι ανάγκες θέρμανσης είναι μικρότερες η περίσσεια του βιοαερίου καίγεται σε κατάλληλους πυρσούς.

Σε μεγάλες εγκαταστάσεις που έχουν σχεδιαστεί για πληθυσμό μεγαλύτερο των 100000 κατοίκων το βιοαέριο μπορεί να οδηγηθεί σε μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας και αξιοποιείται στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτεί η λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης. Στο σύστημα συμπαραγωγής το βιοαέριο

μετατρέπεται κατά 50% σε θερμική ενέργεια, κατά 35% σε ηλεκτρική ενέργεια και ένα ποσοστό της τάξης του 15% καίγεται σε καυσαέρια.

3.7.4 Απαιτήσεις θέρμανσης και θερμικές απώλειες χωνευτή

Για τις συνήθεις θερμοκρασίες ιλύος, που είναι περίπου 20 °C το καλοκαίρι ή πολύ μικρότερες το χειμώνα, ο βαθμός σταθεροποίησής της είναι ανεπαρκής ακόμα για μεγάλους υδραυλικούς χρόνους παραμονής, κατά συνέπεια η ιλύς θερμαίνεται σε σταθερή θερμοκρασία που εξαρτάται από το είδος της χώνευσης που έχει επιλεγεί: μεσοφιλική στους 35 °C ή θερμοφιλική στους 55 °C. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση επιλέχθηκε μεσοφιλική χώνευση στους 35 °C.

Οι ανάγκες σε θερμότητα υπολογίζονται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στο επιθυμητό επίπεδο έτσι ώστε να ανυψώνεται η θερμοκρασία της λάσπης στην κατάλληλη θερμοκρασία χώνευσης και να καλύπτονται και οι θερμικές απώλειες που για τις ανάγκες της προσομοίωσης εκτιμήθηκαν ως το 30% της απαιτούμενης θερμότητας.

Τελικά, η απαιτούμενη θερμότητα για τη θέρμανση της ιλύος δίνεται από τη σχέση:

$$Q_T = 1.3 \cdot A(35) \cdot C \cdot (T_D - T_S)$$

Όπου, Q_T : απαιτούμενη θερμότητα θέρμανσης ιλύος (Kcal/h)

A : ροή μάζας της ιλύος (kg/h)

C : μέση ειδική θερμότητα της λάσπης (1 Kcal/kg·°C)

T_D : θερμοκρασία χωνευτή (°C)

T_S : θερμοκρασία παχυμένης ιλύος (°C)

3.8 Μονάδα αφυδάτωσης ιλύος

3.8.1 Εισαγωγή

Η μονάδα της αφυδάτωσης στοχεύει στην απομάκρυνση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους του νερού που περιέχει η ιλύς μετά την αφυδάτωση και τη μείωση του όγκου της πριν τη διάθεσή της στο περιβάλλον. Μετά τη χώνευση η συγκέντρωση στερεών της ιλύος κυμαίνεται στο 4-5% και με τη διαδικασία της αφυδάτωσης το ποσοστό της αυξάνεται σε 18-35%.

Οι τεχνολογίες αφυδάτωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: την αφυδάτωση σε κλίνες ξήρανσης και την αφυδάτωση με μηχανικά μέσα. Οι πρώτες που αποτελούν οικονομικότερη μέθοδο λόγω χαμηλότερου κόστους κατασκευής και λειτουργίας όμως τα μηχανικά μέσα έχουν επικρατήσει λόγω των υπόλοιπων πλεονεκτημάτων τους. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούν μικρότερη έκταση, δεν δημιουργούν προβλήματα δυσσομίας ή κινδύνους περιβαλλοντικής ρύπανσης και δεν επηρεάζονται από τις κλιματολογικές συνθήκες.

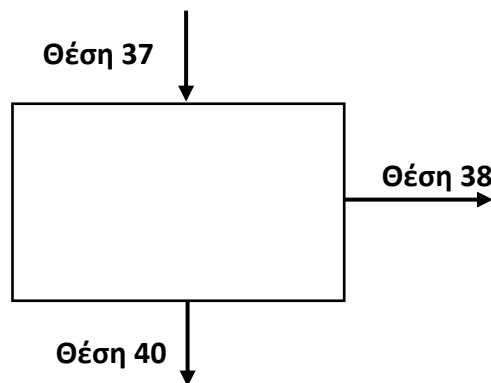
Οι φυγοκεντρητές, οι φιλτρόπρεσες και οι ταινιοφιλτρόπρεσες είναι τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέσα μηχανικής αφυδάτωσης.

3.8.2 Προσομοίωση αφυδάτωσης ιλύος

Η προσομοίωση της διαδικασίας αφυδάτωσης πραγματοποιείται με την εφαρμογή ισοζυγίων μάζας που βασίζονται στην απόδοση της μονάδας. Στην παρούσα προσομοίωση εφαρμόστηκε μηχανική αφυδάτωση της ιλύος.

Όπως και στην περίπτωση της πάχυνσης, οι συγκεντρώσεις των διαλυτών συστατικών παραμένουν αμετάβλητες κατά τη διαδικασία της αφυδάτωσης. Η διαφορά των δύο φυσικών διεργασιών έγκειται στη συγκέντρωση που επιτυγχάνεται για την εξερχόμενη ιλύ, η οποία για την εν λόγω προσομοίωση είναι 250kg/m^3 .

Το Σχήμα 3.7 παρουσιάζει τις θέσεις της μονάδας αφυδάτωσης.



Σχήμα 3.7 Θέσεις εισόδου και εξόδου, ιλύος και στραγγιδίων μονάδας αφυδάτωσης (Πηγή: Σαραντόπουλος, 2015 και Koumaki et al., 2017; μετά από επεξεργασία)

3.8.2.1 Θέση 37 – Είσοδος σταθεροποιημένης ιλύος

Η σταθεροποιημένη ιλύς από τη μονάδα χώνευσης εισέρχεται στη μονάδα αφυδάτωσης.

Οι εισερχόμενες μάζες στερεών και σωματιδιακών μεταβλητών υπολογίζονται παρακάτω:

$$M_{TSS}(37) = TSS(37) \cdot Q(37)$$

$$M_{X_i}(37) = X_i(37) \cdot Q(37)$$

3.8.2.2 Θέση 40 – Έξοδος αφυδατωμένης ιλύος

Η συγκέντρωση των σωματιδιακών συστατικών στην αφυδατωμένη ιλύ εκτιμάται θεωρώντας ένα ποσοστό συγκράτησης στερεών $CR_{dew} = 95\%$, ενώ οι συγκεντρώσεις των διαλυτών συστατικών παραμένουν, όπως προαναφέρθηκε, αμετάβλητες.

Η μάζα των ολικών αιωρούμενων στερεών στην παχυμένη ιλύ υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{TSS}(40) = \frac{CR_{dew}}{100} \cdot M_{TSS}(37)$$

Θεωρώντας συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στην παχυμένη ιλύ $C_{dew} = 250\text{kg/m}^3$, η παροχή της ιλύος υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$Q(40) = \frac{M_{TSS}(40)}{C_{dew}}$$

Κατ' αντιστοιχία υπολογίζονται η μάζα και η συγκέντρωση όλων των σωματιδιακών συστατικών:

$$M_{X_i}(40) = \frac{CR}{100} \cdot M_{X_i}(37)$$

$$X_i(40) = \frac{M_{X_i}(40)}{Q(40)}$$

Για τα διαλυτά συστατικά ισχύει:

$$S_i(40) = S_i(37)$$

$$M_{S_i}(40) = S_i(40) \cdot Q(40)$$

3.8.2.3 Θέση 38 – Έξοδος στραγγιδίων αφυδάτωσης

Η παροχή των στραγγιδίων υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(38) = Q(37) - Q(40)$$

Για τη μάζα και τη συγκέντρωση των σωματιδιακών συστατικών ισχύει:

$$M_{X_i}(38) = M_{X_i}(37) - M_{X_i}(40)$$

$$X_i(38) = \frac{M_{X_i}(38)}{Q(38)}$$

Σχετικά με τα διαλυτά συστατικά, όπως και στην παχυμένη ιλύ, οι συγκεντρώσεις στα στραγγίδια δεν μεταβάλλονται και κατά συνέπεια ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις.

$$S_i(3) = S_i(1)$$

$$M_{S_i}(3) = S_i(3) \cdot Q(3)$$

3.8.2.3.1 Απαιτούμενη ποσότητα πολυηλεκτρολύτη για την μηχανική αφυδάτωση

Κατ' εκτίμηση η απαιτούμενη ποσότητα πολυηλεκτρολύτη ανά μάζα στερεών είναι $b=8\text{gr/kgTSS}$. Έτσι, ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας δίνεται από τη σχέση:

$$M_{pol_{dew}} = b \cdot M_{TSS}(37)$$

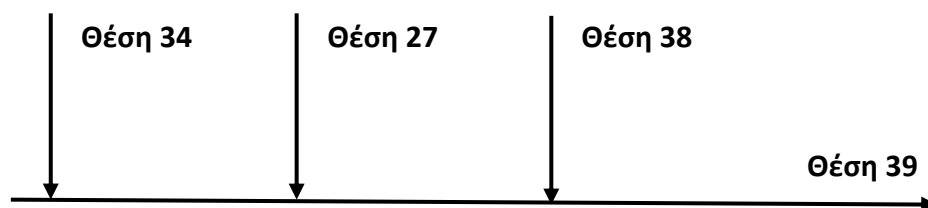
3.9 Στραγγίδια ιλύος

Η επεξεργασία της ιλύος έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται τρεις (3) γραμμές στραγγιδίων μετά την πάχυνση βαρύτητας, τη μηχανική πάχυνσης και την αφυδάτωση. Οι γραμμές των στραγγιδίων μεταπίπτουν σε κοινή γραμμή και επιστρέφουν στο σύστημα ανάντι της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης.

Τα στραγγίδια που παράγονται στη γραμμή επεξεργασίας της λάσπης και συγκεκριμένα από τις διαδικασίες της βαρυτικής και μηχανικής πάχυνσης και της αφυδάτωσης συγκεντρώνονται σε κοινή γραμμή και επιστρέφουν στο σύστημα ανάντη της Για την εποπτεία της συνεισφοράς των στραγγιδίων στο οργανικό υλικό, τα θρεπτικά συστατικά και τα αιωρούμενα στερεά των εισερχόμενων λυμάτων, υπολογίζονται τα παρακάτω κλάσματα.

3.9.1 Προσομοίωση γραμμής στραγγιδίων

Το Σχήμα 3.8 παρουσιάζει τις γραμμές στραγγιδίων. Η γραμμή/θέση 34 αντιστοιχεί στα στραγγίδια που προέρχονται από την πάχυνση βαρύτητας της πρωτοβάθμιας λύσης, η γραμμή/θέση 27 αντιστοιχεί σε εκείνα που προέρχονται από τη μηχανική πάχυνση της βιολογικής λύσης και τέλος, η γραμμή/θέση 38 αντιστοιχεί στα στραγγίδια που προέρχονται από την μηχανική αφυδάτωση της λύσης.



Σχήμα 3.8 Θέσεις εισόδου και εξόδου στραγγιδίων

$$Q(39) = Q(34) + Q(27) + Q(38)$$

$$M_{X_i}(39) = M_{X_i}(34) + M_{X_i}(27) + M_{X_i}(38)$$

$$X_i(39) = \frac{M_{X_i}(39)}{Q(39)}$$

$$M_{S_i}(39) = M_{S_i}(34) + M_{S_i}(27) + M_{S_i}(38)$$

$$S_i(39) = \frac{M_{S_i}(39)}{Q(39)}$$

3.10 Κατανάλωση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας μιας ΕΕΛ εξαρτάται από τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό της και τον τρόπο λειτουργίας της. Παρακάτω αναπτύσσονται οι σχέσεις που χρησιμοποιούν την ονομαστική ισχύ του εγκατεστημένου σε κάθε μονάδα εξοπλισμού για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης κάθε μονάδας.

3.10.1 Συστήματα προεπεξεργασίας

Η ενεργειακή κατανάλωση σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας σχετίζεται με την παροχή των εισερχόμενων λυμάτων με σταθερά κατανάλωσης ενέργειας $E = 0,04 \text{ kWh/m}^3$ σύμφωνα με την σχέση:

$$EN_{pretr} = E \cdot Q_{influent}$$

3.10.2 Δεξαμενές πρωτοβάθμιας και τελικής καθίζησης

Στις δεξαμενές καθίζησης, η ενέργεια καταναλώνεται για την κίνηση των ξέστρων και υπολογίζεται για απορροφούμενη ισχύ του συστήματος περιστροφής $P = 3\text{kW}$ και 24ωρη λειτουργία ως εξής:

$$EN_{settl} = P \cdot t$$

3.10.3 Βιολογικός αντιδραστήρας

Η ενέργεια που καταναλώνεται στο βιοαντιδραστήρα αποδίδεται στο σύστημα ανάμιξης, το σύστημα αερισμού και τις αντλίες ανακυκλοφορίας.

3.10.3.1 Σύστημα ανάμιξης

Η ενέργεια που καταναλώνεται από το σύστημα ανάμιξης του βιοαντιδραστήρα υπολογίζεται για απορροφούμενη ισχύ $P = 5\text{W/m}^3$, ως το άθροισμα της κατανάλωσης κάθε διαμερίσματος. Πιο συγκεκριμένα:

$$EN_{bioreactor_mix} = \left(\sum_{i=1}^n P \cdot V_i \right) \cdot t$$

3.10.3.2 Σύστημα αερισμού

Για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος αερισμού του βιοαντιδραστήρα προσδιορίζεται ένας βαθμός απόδοσης που ισούται με $\varepsilon = 3,5 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$ και από την απαίτηση οξυγόνου, σε kgO_2/h , σε τυπικές συνθήκες του συστήματος, εφαρμόζεται η επόμενη σχέση:

$$EN_{bioreactor_aer} = \frac{SOTR}{\varepsilon}$$

3.10.4 Μονάδες πάχυνσης πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος

Όπως έχει προαναφερθεί, η πάχυνση της ιλύος μπορεί να γίνει είτε σε παχυντή βαρύτητας, είτε με μηχανικά μέσα. Στην περίπτωση του παχυντή βαρύτητας, στον οποίο οδηγείται η πρωτοβάθμια ιλύς στο παρόν μοντέλο, η ενεργειακή κατανάλωση οφείλεται στη λειτουργία του ξέστρου, όπως συμβαίνει με τις δεξαμενές καθίζησης, και ο υπολογισμός της είναι ανάλογος:

$$EN_{gravity_thick} = P \cdot t$$

Για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης του μηχανικού παχυντή, με δυναμικότητα πάχυνσης $C = 900 \text{ kgSS/h}$ και απορροφούμενη ισχύ $P = 6\text{kW}$, στον οποίο οδηγείται η δευτεροβάθμια ιλύς, εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$EN_{mechanical_thick} = \frac{M_TSS}{t} \cdot \frac{P}{C}$$

3.10.5 Μονάδα αναερόβιας χώνευσης

Η κατανάλωση ενέργειας του αναερόβιου χωνευτή αποδίδεται στο σύστημα ανάμιξης και υπολογίζεται, για απορροφούμενη ισχύ $P = 5 \text{ W/m}^3$, ως εξής:

$$EN_{digester_mix} = (P \cdot V) \cdot t$$

3.10.6 Μονάδα αφυδάτωσης ιλύος

Η μονάδα αφυδάτωσης έχει δυναμικότητα 900 kgSS/h με απορροφούμενη ισχύ $P = 7,5 \text{ kW}$. Για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης της μονάδας αφυδάτωσης ιλύος εφαρμόζεται, όπως και στην περίπτωση της μηχανικής πάχυνσης, η ακόλουθη σχέση:

$$EN_{mechanical_dewat} = \frac{M_TSS}{t} \cdot \frac{P}{C}$$

3.10.7 Ενέργεια άντλησης

Η συνολική ενέργεια άντλησης στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί το άθροισμα των ενεργειακών καταναλώσεων των επιμέρους συστημάτων που χρησιμοποιούν αντλίες στην ΕΕΛ:

- Εξωτερική ανακυκλοφορία ιλύος από την έξοδο της ΔΤΚ στην είσοδο της αναερόβιας δεξαμενής
- Εσωτερική ανακυκλοφορία ανάμικτου υγρού από την έξοδο της αερόβιας δεξαμενής στην είσοδο της πρώτης ανοξικής δεξαμενής
- Απομάκρυνση πρωτοβάθμιας ιλύος από τον πυθμένα της ΔΠΚ
- Απομάκρυνση δευτεροβάθμιας – περίσσειας ιλύος από τον πυθμένα ΔΤΚ
- Άντληση παχυμένης ιλύος από τον πυθμένα του παχυντή βαρύτητας
- Προσθήκη δόσης πολυηλεκτρολύτη στον μηχανικό παχυντή και τη μονάδα αφυδάτωσης

Η ενεργειακή κατανάλωση όλων των αντλιών σε kWh/χρονικό βήμα για αντλία με ισχύ ϵ και ρ πυκνότητα λυμάτων, εξαρτάται από το χρόνο λειτουργίας τους και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$EN_{pumping} = \frac{\rho \cdot Q}{\epsilon}$$

3.11 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου

3.11.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση της λειτουργίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων απαιτεί τον υπολογισμό των ποσοτήτων αερίων θερμοκηπίου που παράγονται και εκλύονται ως αποτέλεσμα των διεργασιών της επεξεργασίας. Οι εκπομπές είναι άμεσες, από τις διεργασίες της βιολογικής βαθμίδας, της καύσης βιοαερίου και της κατανάλωσης πολυηλεκτρολύτη και έμμεσες, από την κατανάλωση ενέργειας και τη διάθεση της ιλύος.

3.11.2 Άμεσες εκπομπές

3.11.2.1 Εκπομπές βιολογικού αντιδραστήρα

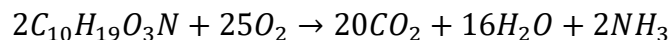
Οι διεργασίες του βιολογικού αντιδραστήρα που έχουν ως προϊόντα τους αέρια θερμοκηπίου είναι οι ακόλουθες:

- Παραγωγή CO₂ κατά την ανάπτυξη ετεροτροφικής βιομάζας
- Παραγωγή CO₂ κατά την απονιτροποίηση
- Κατανάλωση CO₂ κατά την ανάπτυξη αυτοτροφικής βιομάζας
- Παραγωγή N₂O (ισοδύναμο CO₂) κατά την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών
- Παραγωγή N₂O (ισοδύναμο CO₂) κατά την νιτροποίηση των νιτροποιητών
- Παραγωγή N₂O (ισοδύναμο CO₂) κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών

Οι συγκεντρώσεις των μεταβλητών του συστήματος τίθενται στις σχέσεις υπολογισμού σε όρους grVSS/m³ για τα οποία ισχύει η αναλογία 1grVSS = 1.42grCOD.

3.11.2.1.1 Παραγωγή CO₂ κατά την ανάπτυξη ετεροτροφικής βιομάζας

Η παραγωγή CO₂ από τους μικροοργανισμούς C₁₀H₁₉O₃N παρουσιάζεται στην παρακάτω αντίδραση:



Όταν καταναλώνονται 25 μόρια οξυγόνου O₂ παράγονται 20 μόρια διοξειδίου του άνθρακα CO₂, δηλαδή για 25 · (2 · 16) = 800gr O₂ παράγονται 20 · (12 + 16 · 2) = 880gr CO₂. Άρα 1gr O₂ αντιστοιχεί σε 880/800 = 1.1gr CO₂. Τελικά, κατά τη διεργασία της αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών η παραγωγή CO₂, σε kgCO₂/χρονικό βήμα, υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{CO_2_{biomass}}(i) = \frac{1.1 \cdot \frac{1 - Y_h}{Y_h} \cdot \rho_5(i)}{1.42} \cdot \frac{V_{(i)}}{1000}$$

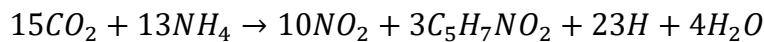
3.11.2.1.2 Παραγωγή CO₂ κατά την απονιτροποίηση

Η παραγωγή CO₂ από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς σε ανοξικές συνθήκες περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

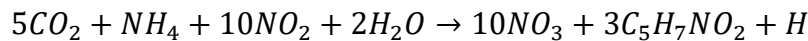
$$S_{CO_2denitr}(i) = \frac{1.1 \cdot \frac{1 - Y_h}{Y_h} \cdot (\rho_6(i) + \rho_7(i) + \rho_8(i) + \rho_9(i))}{1.42} \cdot \frac{V_{(i)}}{1000}$$

3.11.2.1.3 Κατανάλωση CO₂ κατά την ανάπτυξη αυτοτροφικής βιομάζας

Οι μικροοργανισμοί που καταναλώνουν CO₂ για την ανάπτυξή τους ανοίγουν σε δύο (2) κατηγορίες που περιγράφονται με τις αντίστοιχες εξισώσεις.



Για τους μικροοργανισμούς που οξειδώνουν την αμμωνία για κάθε 15 μόρια διοξειδίου του άνθρακα CO₂ με μοριακό βάρος $15 \cdot (12 + 16 \cdot 2) = 660gr$ απαιτούνται 13 μόρια αμμωνιακού αζώτου NH₄-N με μοριακό βάρος $13 \cdot 14 = 182gr$. Δηλαδή 1grN αντιστοιχεί σε $660/182 = 3.63gr$ CO₂.



Για τους μικροοργανισμούς που νιτρικοποιούν τα νιτρώδη για κάθε 5 μόρια διοξειδίου του άνθρακα CO₂ με μοριακό βάρος $5 \cdot (12 + 16 \cdot 2) = 220gr$ απαιτούνται 1 μόριο αμμωνιακού αζώτου NH₄-N με μοριακό βάρος $1 \cdot 14 = 14gr$ και 10 μόρια νιτρώδους αζώτου με μοριακό βάρος $10 \cdot 14 = 140gr$. Δηλαδή 1grN αντιστοιχεί σε $220/154 = 1.43gr$ CO₂.

Άρα η κατανάλωση CO₂ για τις παραπάνω διεργασίες δίνεται από την εξίσωση:

$$S_{CO_2denitr}(i) = \frac{-\frac{3.63}{Y_{aob}} \cdot \rho_{12}(i) - \frac{1.43}{Y_{nob}} \cdot \rho_{16}(i)}{1.42} \cdot \frac{V_{(i)}}{1000}$$

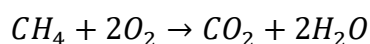
3.11.2.1.4 Παραγωγή N₂O (ισοδύναμο CO₂)

Η παραγωγή υποξειδίου του αζώτου N₂O, σε kgN₂O/χρονικό βήμα, συντελείται στις δεξαμενές αερισμού και ακολουθεί η απελευθέρωσή του από το νερό στον αέρα. Η ποσότητα που παράγεται υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{N_2O_{gas}}(i) = 0.91 \cdot KLA(i) \cdot S_{N_2O}(i) \cdot 296 \cdot \frac{V_{(i)}}{1000}$$

3.11.2.2 Εκπομπές καύσης βιοαερίου

Η καύση του βιοαερίου πραγματοποιείται για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παρατηρούνται και απώλειες στον χωνευτή. Η σύσταση του βιοαερίου είναι μεθάνιο CH₄ κατά 62.5% και διοξείδιο του άνθρακα CO₂ κατά 37.5% και κατά συνέπεια σε 1m³ βιοαερίου περιέχονται $0.625/22.5 \cdot 16 = 0.446kgCH_4/m^3$ και $0.375/22.5 \cdot 44 = 0.737kgCO_2/m^3$. Η αντίδραση καύσης του βιοαερίου είναι η ακόλουθη:



Θεωρώντας διαφυγές βιαερίου 1% οι εκπομπές αερίων σε ισοδύναμο CO₂ υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις σε kgCO₂/d:

$$CO2_{biogas}(i) = 0.99 \cdot BIOGAS \cdot \left(0.737 + 0.446 \cdot \frac{44}{16}\right)$$

$$CO2_{biogas_loss}(i) = 0.01 \cdot BIOGAS \cdot (0.737 + 0.446)$$

3.11.2.3 Εκπομπές κατανάλωσης πολυηλεκτρολύτη

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την κατανάλωση πολυηλεκτρολύτη εκτιμώνται θεωρώντας ότι παράγονται 1.7kgCO₂/kg πολυηλεκτρολύτη. Επομένως ισχύει σε kgCO₂/d:

$$CO2_{pol} = 1.7 \cdot (Mpol_{thick} + Mpol_{dew})$$

3.11.3 Έμμεσες εκπομπές

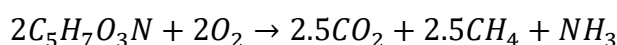
3.11.3.1 Εκπομπές καταναλισκόμενης ενέργειας

Οι εκπομπές σε kgCO₂/d από την συνολική ενέργεια που καταναλώνεται υπολογίζονται αφού αφαιρεθεί η ενέργεια που προέρχεται από το βιοαέριο.

$$CO2_{EN} = (EN - EN_{BIO_elec}) \cdot \frac{\sum(Fi \cdot EFi)}{1000}$$

3.11.3.2 Εκπομπές διάθεσης ιλύος

Η ιλύς περιγράφεται από τον χημικό τύπο C₅H₇O₂N. Η εξίσωση που περιγράφει την οξειδωσή της είναι η ακόλουθη:



Ακολουθούν οι σχέσεις υπολογισμού των εκπομπών για διάθεση ιλύος σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), λαμβάνοντας υπόψη απελευθέρωση 8.2grN₂O/kgTN.

$$CH_{4land} = \frac{40}{113} \cdot MVSS(40)$$

$$CO_{2land} = \frac{66}{113} \cdot MVSS(40)$$

$$N_2O_{land} = \frac{8.2}{1000} \cdot Q(40) \cdot \frac{TN(40)}{1000}$$

$$CO_2 = CO_{2land} + 25 \cdot CH_{4land} + 296 \cdot N_2O_{land}$$

3.12 Δείκτες ελέγχου λειτουργίας

3.12.1 Δείκτες κατανάλωσης ενέργειας

Με τους δείκτες λειτουργίας που ανάγουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στην παροχή των λυμάτων και την απομάκρυνση οργανικού άνθρακα και αζώτου είναι εφικτός ο έλεγχος της απόδοσης της εγκατάστασης και η αξιολόγηση διαφόρων σεναρίων λειτουργίας της.

3.12.1.1 Απαιτούμενη ενέργεια προς παροχή εισόδου

$$kWh_{m^3} = \frac{\text{Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια}}{\text{Παροχή εισόδου}} = \frac{EN_{total}}{Q_{in}}$$

3.12.1.2 Απαιτούμενη ενέργεια προς COD που απομακρύνεται

$$kWh_{kgCOD} = \frac{EN_{total}}{M_{COD_{remov}}} = \frac{EN_{total}}{Q_{influent} \cdot COD_{influent} - Q_{effluent} \cdot COD_{effluent}}$$

3.12.1.3 Απαιτούμενη ενέργεια προς άζωτο που απομακρύνεται

$$kWh_{kgN} = \frac{EN_{total}}{M_{TN_{remov}}} = \frac{EN_{total}}{Q_{influent} \cdot TN_{influent} - Q_{effluent} \cdot TN_{effluent}}$$

3.12.2 Δείκτες αερίων θερμοκηπίου

Για τον έλεγχο της λειτουργίας της εγκατάστασης και της απόδοσης της εγκατάστασης κατά την εφαρμογή των σεναρίων υπολογίζονται δείκτες που ανάγουν τις συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην παροχή των λυμάτων και την απομάκρυνση οργανικού άνθρακα και αζώτου.

3.12.2.1 Εκπεμπόμενα αέρια θερμοκηπίου σε όρους CO₂ προς παροχή εισόδου

$$kgCO2_{m^3} = \frac{\text{Ολική εκπομπή GHG}}{\text{Παροχή εισόδου}} = \frac{\text{Total_GHG_CO2eq}}{Q_{in}}$$

3.12.2.2 Εκπεμπόμενα αέρια θερμοκηπίου προς COD που απομακρύνεται

$$kgCO2_{kgCOD} = \frac{\text{Ολική εκπομπή GHG}}{M_{COD_{remov}}} = \frac{\text{Total_GHG_CO2eq}}{kgCOD_{diasp}}$$

3.12.2.3 Εκπεμπόμενα αέρια θερμοκηπίου προς άζωτο που απομακρύνεται

$$kgCO2_{kgN} = \frac{\text{Ολική εκπομπή GHG}}{M_{TN_{remov}}} = \frac{\text{Total_GHG_CO2eq}}{Q_{influent} \cdot TN_{influent} - Q_{effluent} \cdot TN_{effluent}}$$

3.12.2.4 Εκπεμπόμενο υποξείδιο του αζώτου προς εισερχόμενο άζωτο

$$kgN2O_kgTNin = \frac{\text{Παραγόμενο } N2O}{M_TNin} = \frac{N2O_tot}{Q_{influent} \cdot TN_{influent}}$$

3.12.3 Δείκτες στραγγιδίων

Οι δείκτες στραγγιδίων συσχετίζουν τη μάζα συστατικών των στραγγιδίων με τη συνολική μάζα τους ανάντι της πρωτοβάθμιας καθίζησης, δηλαδή στη θέση που επιστρέφει η γραμμή στραγγιδίων και συνδέεται με τη γραμμή επεξεργασίας.

3.12.3.1 Μάζα COD στραγγιδίων προς το ολικό COD ανάντι της ΔΠΚ

$$CODstrag_COD3 = \frac{MCOD_strag}{MCOD(3)}$$

3.12.3.1 Ολικό άζωτο στραγγιδίων προς το ολικό άζωτο ανάντι της ΔΠΚ

$$TNstrag_TN3 = \frac{MTN_strag}{MTN(3)}$$

3.12.3.2 Αμμωνιακό άζωτο στραγγιδίων προς το αμμωνιακό άζωτο ανάντι της ΔΠΚ

$$SNHstrag_SNH3 = \frac{M_SNH(39)}{M_SNH(3)}$$

3.12.3.1 Ολικά στερεά στραγγιδίων προς τα ολικά στερεά ανάντι της ΔΠΚ

$$TSSstrag_TSS3 = \frac{M_TSS(39)}{M_TSS(3)}$$

3.13 Εκτίμηση απόδοσης

3.13.1 Δείκτης ποιότητας εκροής

Για την εκτίμηση της απόδοσης της εγκατάστασης υπολογίζεται ο δείκτης ποιότητας εκροής (EQI) σε kg_ρύπανσης/ημέρα, σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$EQI = \left\{ 2 \cdot TSS(29) + 1 \cdot COD_{tot} + 2 \cdot BOD_e + 30 \cdot TKNe + \right\} \cdot Q_e(29) \cdot \frac{86400}{1000}$$

$$COD_e = \{S_S(29) + S_I(29) + X_S(29) + X_I(29) + X_{BH}(29) + X_{AOB}(29) + X_{NOB}(29)\}$$

$$BOD_e = 0.25 \cdot [S_S(29) + X_S(29) + (1 - f_P) \cdot \{X_{BH}(29) + X_{AOB}(29) + X_{NOB}(29)\}]$$

$$TKN_e = \begin{bmatrix} SNH(29) + ixb \cdot \{X_{BH}(29) + X_{AOB}(29) + X_{NOB}(29)\} \\ exp \cdot X_I(29) + iNSI \cdot S_I(29) + iNXS \cdot X_S(29) \end{bmatrix}$$

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογές μοντέλου προσομοίωσης και ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων λειτουργίας

4.1 Προσομοιούμενο σύστημα

Η διάταξη της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων που προσομοιώνεται στην παρούσα εργασία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Σχήμα 3.1). Ακολουθούν τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών και συστημάτων της εγκατάστασης:

- Δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης συνολικής επιφάνειας $A_{DPK} = 1500\text{m}^2$.
- Βιολογικός Αντιδραστήρας αποτελούμενος από:
 - Αναερόβια δεξαμενή όγκου $V(6) = 0\text{ m}^3$.
 - Ανοξική δεξαμενή όγκου $V(8) = 7880\text{ m}^3$.
 - Δεξαμενή αερισμού 10 διαμερισμάτων, συνολικού όγκου $V_{\Delta A} = 15559\text{ m}^3$.
 - Τα 1^ο, 2^ο, 3^ο και 4^ο είναι αεριζόμενα διαμερίσματα με όγκο $V(9) = V(10) = V(11) = V(12) = 3716\text{ m}^3$.
 - Το 5^ο διαμέρισμα δεν είναι αεριζόμενο και έχει όγκο $V(13) = 695\text{ m}^3$.
 - Τα 6^ο, 7^ο, 8^ο, 9^ο, και 10^ο διαμερίσματα έχουν όγκο $V(14) = V(15) = V(16) = V(17) = V(18) = 0\text{ m}^3$.
 - Ανοξική 2 δεξαμενή όγκου $V(25) = 0\text{ m}^3$.
- Δεξαμενή τελικής καθίζησης συνολικής επιφάνειας $A_{DTK} = 6000\text{ m}^2$ και βάθους $H_{ss} = 4.5\text{m}$.
- Παχυντής βαρύτητας πρωτοβάθμιας ιλύος επιφάνειας $A_{pr_thic} = 100\text{ m}^2$.
- Μηχανικός παχυντής δευτεροβάθμιας ιλύος.
- Αναερόβιος χωνευτής με όγκο $V_{dig} = 6000\text{ m}^3$.
- Μονάδα μηχανικής αφυδάτωσης.

4.2 Λειτουργικές παράμετροι εγκατάστασης

Ακολουθούν οι παραδοχές που έγιναν σχετικά με τις παραμέτρους λειτουργίας της εγκατάστασης:

- Η θερμοκρασία των λυμάτων είναι σταθερή $therm = 20\text{ }^\circ\text{C}$.
- Το pH είναι ίσο με 7.
- Η συγκέντρωση κορεσμού του νερού με οξυγόνο είναι $CsO_2 = 9.02$ στους $20\text{ }^\circ\text{C}$.
- Ο συντελεστής εσωτερικής ανακυκλοφορίας του ανάμικτου υγρού εκτιμάται ως $R = 2.5$.
- Ο συντελεστής εξωτερικής ανακυκλοφορίας της ιλύος εκτιμάται ως $r_{ex} = 0.8$.
- Ο δείκτης καθιζησιμότητας της ιλύος εκτιμάται ως $SVI = 100.0$.
- Ο βαθμός απομάκρυνσης στερεών στη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης εκτιμάται ως $S_R = 50.0\%$.
- Ο βαθμός συγκράτησης στερεών στη μονάδα πάχυνσης εκτιμάται ως $CR_{thick} = 95.0\%$.

- Ο βαθμός συγκράτησης στερεών στη μονάδα αφυδάτωσης εκτιμάται ως CR_dew = 95.0%.
- υδραυλικός χρόνος παραμονής του αναερόβιου χωνευτή εκτιμάται κατ' ελάχιστον ως HRT_dig = 14 d.
- Η προσομοίωση έχει χρονική διάρκεια 60 ημερών προκειμένου το σύστημα να σταθεροποιηθεί.
- Η παραγόμενη ενέργεια από το βιοαέριο αποδίδεται κατά 50% ως θερμική ενέργεια, κατά 35% μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ 15% και 1% είναι οι απώλειες και οι διαρροές, αντίστοιχα.

4.3 Αρχικές συνθήκες

Στους Πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των προεπεξεργασμένων λυμάτων που εισέρχονται για πρωτοβάθμια επεξεργασία και οι αρχικές συγκεντρώσεις των μεταβλητών του συστήματος σε σημαντικές θέσεις της εγκατάστασης, αντίστοιχα. Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών επιταχύνουν τη σύγκλιση του συστήματος στις τελικές τιμές των σταθερών συνθηκών.

Οι τιμές που παρατίθενται αποτελούν αρχικές συγκεντρώσεις για την προσομοίωση σε σταθερές συνθήκες (steady state). Για την προσομοίωση σε δυναμικές συνθήκες ως αρχικές τιμές χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα για τις τιμές των μεταβλητών, στις αντίστοιχες θέσεις του συστήματος, από την προηγούμενη προσομοίωση χρονικής διάρκειας εξήντα (60) ημερών, δηλαδή μετά την επίτευξη των σταθερών συνθηκών.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά προεπεξεργασμένων λυμάτων πριν την πρωτοβάθμια επεξεργασία.

α/α	Μεταβλητή	Ορισμός	Τιμή	Μονάδα
1	SI(1)	Αδρανής Διαλυτή Οργανική Ύλη	30,0	mg/l
2	SS(1)	Εύκολα Βιοδιασπάσιμη Διαλυτή Οργανική Ύλη	140,0	mg/l
3	XI(1)	Αδρανής Σωματιδιακή Οργανική Ύλη	30,0	mg/l
4	XS(1)	Αργά Βιοδιασπάσιμη Σωματιδιακή Οργανική Ύλη	400,0	mg/l
5	XBH(1)	Ετεροτροφική Βιομάζα	28,8	mg/l
6	XA0B(1)	Αμμωνιακά Οξειδωτικά Βακτήρια	0,1	mg/l
7	XNOB(1)	Νιτρικά Οξειδωτικά Βακτήρια	0,1	mg/l
8	SO(1)	Διαλυμένο Οξυγόνο	0,1	mg/l
9	SN2(1)	Αέριο Άζωτο	0,0	mg/l
10	SNH(1)	Διαλυμένο Αμμωνιακό Άζωτο	40,0	mg/l
11	SNO(1)	Μονοξείδιο του Αζώτου	0,0	mg/l
12	SNO2(1)	Νιτρώδες Άζωτο	0,0	mg/l
13	SNO3(1)	Νιτρικό Άζωτο	0,0	mg/l
14	SN2O(1)	Υποξείδιο του Αζώτου	0,0	mg/l
15	SNH2OH(1)	Υδροξυλαμίνη	0,0	mg/l
16	SALK(1)	Αλκαλικότητα	500,0	mg/l
17	XNV(1)	Σωματιδιακές Ανόργανες Ενώσεις	75,0	mg/l

18	X(1)	Σωματιδιακή Ύλη (COD)	459,0	mg/l
19	VSS(1)	Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά	323,2	mg/l
20	TSS(1)	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά	398,2	mg/l

Πίνακας 4.2: Αρχικές συγκεντρώσεις συστατικών σε σημαντικές θέσεις του συστήματος ενεργού ιλύος.

α/α	Μεταβλητή	Θέση 6 Αναερόβια Δεξαμενή	Θέσεις 8 & 25 Ανοξικές Δεξαμενές	Θέσεις 9-21 Αερόβια και Δεξαμενή Τελικής Καθίζησης	Θέσεις 15 & 29 Έξοδος ΔΤΚ και Επεξεργασίας	Θέσεις 22-24 Έξοδος περίσσειας ιλύος	Μονάδα
1	SI	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	mg/l
2	SS	80,00	80,00	80,00	5,00	5,00	mg/l
3	XI	500,00	500,00	500,00	2,00	2000,00	mg/l
4	XS	45,00	45,00	45,00	3,00	100,00	mg/l
5	XBH	1500,00	1500,00	1500,00	10,00	5000,00	mg/l
6	XAOB	20,00	20,00	20,00	3,00	300,00	mg/l
7	XNOB	25,00	20,00	20,00	3,00	300,00	mg/l
8	SO	0,01	0,01	2,00	2,00	2,00	mg/l
9	SN2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	mg/l
10	SNH	28,00	28,00	28,00	10,00	10,00	mg/l
11	SNO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	mg/l
12	SNO2	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	mg/l
13	SNO3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	mg/l
14	SN2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	mg/l
15	SNH2OH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	mg/l
16	SALK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	mg/l
17	XNV	10,00	10,00	10,00	1,00	100,00	mg/l
18	X	2090,00	2085,00	2085,00	21,00	7700,00	mg/l
19	VSS	1471,83	1468,31	1468,31	14,79	5422,54	mg/l
20	TSS	1481,83	1478,31	1478,31	15,79	5522,54	mg/l

4.4 Ανάλυση ευαισθησίας

4.4.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ευαισθησίας στοχεύει στον έλεγχο και την ποσοτικοποίηση της απόκρισης του, υπό μελέτη, συστήματος στις μεταβολές των στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων. Μέσα από τη διαδικασία αυτή διακρίνονται, από ένα σύνολο εξήντα-επτά (67) παραμέτρων, εκείνες που αποδεικνύονται σημαντικότερες σύμφωνα με το κριτήριο που έχει, κατά περίπτωση, τεθεί.

Είναι σαφές ότι οι σημαντικότερες παράμετροι είναι εκείνες, η μεταβολή των οποίων, επιφέρει, επίσης σημαντικές μεταβολές στις μεταβλητές του συστήματος σε σύγκριση με ένα αρχικό σενάριο αναφοράς. Η γνώση των παραμέτρων που επιδρούν σημαντικά στο σύστημα διευκολύνει τον έλεγχο και τη λειτουργία της εγκατάστασης, καθοδηγεί την έρευνα και

επιταχύνει το καλιμπράρισμα του μοντέλου για μελλοντικές εφαρμογές, καθώς δίνει τη δυνατότητα περιορισμού του πλήθους των παραμέτρων, στις οποίες πρέπει ο λειτουργός μιας εγκατάστασης ή ο ερευνητής να εστιάσει και να ρυθμίσει προκειμένου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα.

4.4.2 Μέθοδος ανάλυσης

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε μια OAT (Once At a Time) μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας σύμφωνα με την οποία μελετήθηκε η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου ως απόκριση στην μεταβολή μιας παραμέτρου κάθε φορά. Επομένως, σε κάθε προσομοίωση άλλαζε η τιμή μιας παραμέτρου κατά $\pm 30\%$ από την τιμή αναφοράς και η ευαισθησία του μοντέλου υπολογίστηκε σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση (Noutsopoulos et al., 2019):

$$S_{P_j}^{y_i} = \frac{\frac{\Delta y_i}{y_{i,0}}}{\frac{\Delta p_j}{p_{j,0}}}$$

Όπου Δy_i είναι η μεταβολή της τιμής μιας μεταβλητής, $y_{i,0}$ είναι η τιμή αναφοράς της ίδιας μεταβλητής, Δp_j είναι η μεταβολή της παραμέτρου που ελέγχεται και $p_{j,0}$ είναι η αρχική τιμή της παραμέτρου.

Η ευαισθησία S της μεταβλητής y_i υπολογίστηκε τόσο για αύξηση, όσο και για μείωση της παραμέτρου p_j και επιλέχθηκε η μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή μεταβολή.

4.4.3 Στοιχειομετρικές και κινητικές παράμετροι

Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τις εξήντα-επτά (67) στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους που μελετήθηκαν ως προς την επίδραση της μεταβολής τους στα αποτελέσματα του μοντέλου, καθώς και τις τιμές ελέγχου, μειωμένες και αυξημένες κατά 30% συγκριτικά με την τιμή αναφοράς.

Σημειώνεται ότι ο διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών n_G μελετήθηκε μόνο για μεταβολή -30% , καθώς η τιμή αναφοράς του είναι 1.0 και η μεταβολή κατά $+30\%$ δεν έχει φυσικό νόημα.

Πίνακας 4.3: Παράμετροι ανάλυσης ευαισθησίας.

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή Ελέγχου	Τιμή Αναφοράς	Τιμή Ελέγχου	Μονάδα Μέτρησης
			-30%		+30%	
1	γ_h	Συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας (βιομάζα/τροφή)	0,42000	0,60000	0,78000	grCOD*(grCOD) ⁻¹
2	YAOB	Συντελεστής απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας (βιομάζα/τροφή)	0,12600	0,18000	0,23400	grCOD*(grN) ⁻¹

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή	Τιμή	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
			Ελέγχου		Αναφοράς	
			-30%		+30%	
3	YNOB	Συντελεστής απόδοσης νιτρικής βιομάζας (βιομάζα/τροφή)	0,10500	0,15000	0,19500	grCOD*(grN) ⁻¹
4	fp	Κλάσμα αδρανούς COD που δημιουργείται από τη λύση της βιομάζας	0,05600	0,08000	0,10400	grCOD*(grCOD) ⁻¹
5	ixb	Κλάσμα αζώτου στη βιομάζα	0,06020	0,08600	0,11180	grN*(grCOD) ⁻¹
6	ixp	Κλάσμα αζώτου στα αδρανή στερεά	0,00700	0,01000	0,01300	grN*(grCOD) ⁻¹
7	iNXS	Κλάσμα αζώτου στην αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη	0,02800	0,04000	0,05200	grN*(grCOD) ⁻¹
8	iNSF	Κλάσμα αζώτου στην εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη	0,02100	0,03000	0,03900	grN*(grCOD) ⁻¹
9	iNSI	Κλάσμα αζώτου στην αδρανή διαλυτή οργανική ύλη	0,00700	0,01000	0,01300	grN*(grCOD) ⁻¹
10	iPXS	Κλάσμα φωσφόρου στην αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη	0,00700	0,01000	0,01300	grP*(grCOD) ⁻¹
11	iPSF	Κλάσμα φωσφόρου στην εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη	0,00700	0,01000	0,01300	grP*(grCOD) ⁻¹
12	iPXI	Κλάσμα φωσφόρου στην αδρανή διαλυτή οργανική ύλη	0,00700	0,01000	0,01300	grP*(grCOD) ⁻¹
13	iPBM	Κλάσμα φωσφόρου στη βιομάζα	0,01400	0,02000	0,02600	grP*(grCOD) ⁻¹
14	iPSI	Κλάσμα φωσφόρου στην αδρανή διαλυτή οργανική ύλη	0,00000	0,00000	0,00000	grP*(grCOD) ⁻¹
15	fSI	Κλάσμα αδρανούς διαλυμένης οργανικής ύλης από υδρόλυση	0,00000	0,00000	0,00000	grCOD*(grCOD) ⁻¹
16	nG	Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών	0,70000	1,00000	-	-

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή	Τιμή	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
			Ελέγχου		Αναφοράς	
			-30%		+30%	
17	mH	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών ΧΒΗ	4,20000	6,00000	7,80000	(d) ⁻¹
18	bH	Ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικών μικροοργανισμών ΧΒΗ	0,43400	0,62000	0,80600	(d) ⁻¹
19	mΑΟΒΗΑΟ	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης αυτοτροφικών μικροοργανισμών ΧΑΟΒ	0,47600	0,68000	0,88400	(d) ⁻¹
20	bΑΟΒ	Ρυθμός αποσύνθεσης αυτοτροφικών μικροοργανισμών ΧΑΟΒ	0,06720	0,09600	0,12480	(d) ⁻¹
21	mΝΟΒ	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης νιτροποιητικών μικροοργανισμών ΧΝΟΒ	0,47600	0,68000	0,88400	(d) ⁻¹
22	bΝΟΒ	Ρυθμός αποσύνθεσης νιτροποιητικών μικροοργανισμών ΧΝΟΒ	0,06720	0,09600	0,12480	(d) ⁻¹
23	KH	Μέγιστος ρυθμός υδρόλυσης	2,10000	3,00000	3,90000	grCOD*(grCOD*d) ⁻¹
24	Ks	Συντελεστής ημικορεσμού ετεροτροφικής βιομάζας	14,00000	20,00000	26,00000	grCOD*(m) ⁻³
25	KOH	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂	0,14000	0,20000	0,26000	grO ₂ *(m) ⁻³
26	KNH	Συντελεστής ημικορεσμού NH ₃ -N	0,03500	0,05000	0,06500	grNH ₃ -N*(m) ⁻³
27	KX	Συντελεστής ημικορεσμού υδρόλυσης αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης	0,02100	0,03000	0,03900	grCOD*(grCOD) ⁻¹
28	nNO ₃ H	Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική υδρόλυση παρουσία NO ₃	0,42000	0,60000	0,78000	-
29	KNO ₃	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₃ -N	0,35000	0,50000	0,65000	grNO ₃ -N*(m) ⁻³
30	nNO ₂ H	Διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική υδρόλυση παρουσία NO ₂	0,42000	0,60000	0,78000	-

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή	Τιμή	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
			Ελέγχου		Αναφοράς	
			-30%		+30%	
31	KNO2	Συντελεστής ημικορεσμού NO2-N	0,35000	0,50000	0,65000	grNO2-N*(m) ⁻³
32	nfe	Διορθωτικός συντελεστής για την αναερόβια υδρόλυση	0,28000	0,40000	0,52000	-
33	Kp	Συντελεστής ημικορεσμού PO4	0,00700	0,01000	0,01300	grP*(m) ⁻³
34	kALK	Συντελεστής ημικορεσμού αλκαλικότητας	0,05740	0,08200	0,10660	mgCaCO3*(L) ⁻¹
35	nNO3D	Διορθωτικός συντελεστής για την απονιτροποίηση	0,56000	0,80000	1,04000	-
36	nG3	Ανοξικός διορθωτικός συντελεστής για τη μετατροπή NO2 σε NO	0,42000	0,60000	0,78000	-
37	kOH3	Συντελεστής ημικορεσμού O2 κατά τη μετατροπή NO2 σε NO	0,07000	0,10000	0,13000	grO2*(m) ⁻³
38	kNO2D	Συντελεστής ημικορεσμού NO2 κατά τη μετατροπή NO2 σε NO	0,14000	0,20000	0,26000	grNO2*(m) ⁻³
39	ks3	Συντελεστής ημικορεσμού οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή NO2 σε NO	14,00000	20,00000	26,00000	grCOD*(m) ⁻³
40	Ki3NO	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη μετατροπή NO2 σε NO	0,35000	0,50000	0,65000	grN*(m) ⁻³
41	nG4	Ανοξικός διορθωτικός συντελεστής για τη μετατροπή NO σε N2O	0,42000	0,60000	0,78000	-
42	ks4	Συντελεστής ημικορεσμού οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή NO σε N2O	14,00000	20,00000	26,00000	grCOD*(m) ⁻³
43	KNOD	Συντελεστής ημικορεσμού NO3 κατά τη μετατροπή NO σε N2O	0,03500	0,05000	0,06500	grN*(m) ⁻³
44	Ki4NO	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη μετατροπή NO σε N2O	0,21000	0,30000	0,39000	grN*(m) ⁻³

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή	Τιμή	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
			Ελέγχου		Αναφοράς	
			-30%		+30%	
45	KOH4	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά τη μετατροπή NO σε N ₂ O	0,07000	0,10000	0,13000	grO ₂ *(m) ⁻³
46	nG5	Ανοξικός διορθωτικός συντελεστής για τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	0,42000	0,60000	0,78000	-
47	ks5	Συντελεστής ημικορεσμού οργανικής ύλης κατά τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	14,00000	20,00000	26,00000	grCOD*(m) ⁻³
48	KN2OD	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₃ κατά τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	0,03500	0,05000	0,06500	grNO ₂ *(m) ⁻³
49	KOH5	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	0,07000	0,10000	0,13000	grO ₂ *(m) ⁻³
50	Ki5NO	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη μετατροπή N ₂ O σε N ₂	0,05250	0,07500	0,09750	grN*(m) ⁻³
51	qAOBamo	Μέγιστος ρυθμός οξείδωσης υδροξυλαμίνης NH ₂ OH από το ένζυμο μονοοξυγενάση AMO	3,64056	5,20080	6,76104	mgN*(mgCOD*d) ⁻¹
52	KOHAOB1	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά την οξείδωση NH ₂ OH από το AMO	0,70000	1,00000	1,30000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
53	KNHAOB	Συντελεστής ημικορεσμού NH ₃ κατά την οξείδωση NH ₂ OH από το AMO	0,14000	0,20000	0,26000	gr*(m) ⁻³ as N
54	KNOAOBHAO	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά την αντίδραση με το HAO	0,00021	0,00030	0,00039	gr*(m) ⁻³ as N
55	KOHAOB2	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ κατά την αντίδραση με το HAO	0,42000	0,60000	0,78000	gr*(m) ⁻³ as O ₂

α/α	Παράμετρος	Ερμηνεία	Τιμή	Τιμή	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
			Ελέγχου		Αναφοράς	
			-30%		+30%	
56	kNH ₂ OHAOB	Συντελεστής ημικορεσμού NH ₃ κατά την αντίδραση με το HAO	0,63000	0,90000	1,17000	gr*(m) ⁻³ as N
57	qAOBN2ONN	Μέγιστος ρυθμός παραγωγής υποξειδίου του αζώτου N ₂ O κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών NN	0,00546	0,00780	0,01014	mgN*(mgCOD*d) ⁻¹
58	kNOAOBNN	Συντελεστής ημικορεσμού NO κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών NN	0,00560	0,00800	0,01040	gr*(m) ⁻³ as N
59	kHNO2AOB	Συντελεστής ημικορεσμού HNO ₂ κατά τη απονιτροποίηση των νιτροποιητών	0,00280	0,00400	0,00520	gr*(m) ⁻³ as N
60	kOHNOB	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ για τους νιτροποιητές	0,84000	1,20000	1,56000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
61	kNO2NOB	Συντελεστής ημικορεσμού NO ₂ για τους νιτροποιητές	0,35000	0,50000	0,65000	grNO ₂ -N*(m) ⁻³
62	kpNOB	Συντελεστής ημικορεσμού PO ₄ για τους νιτροποιητές	0,00700	0,01000	0,01300	grP*(m) ⁻³
63	kALKNOB	Συντελεστής ημικορεσμού αλκαλικότητας για τους νιτροποιητές	0,05740	0,08200	0,10660	mgCaCO ₃ *(L) ⁻¹
64	kOHAOBND	Συντελεστής ημικορεσμού O ₂ για την απονιτροποίηση των νιτροποιητών	0,35000	0,50000	0,65000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
65	kiOHAOB	Σταθερά αναστολής υποξειδίου του αζώτου N ₂ O λόγω O ₂	0,56000	0,80000	1,04000	gr*(m) ⁻³ as O ₂
66	qAOBN2OND	Μέγιστος ρυθμός παραγωγής υποξειδίου του αζώτου N ₂ O κατά την απονιτροποίηση των νιτροποιητών NN	0,91056	1,30080	1,69104	mgN*(mgCOD*d) ⁻¹
67	qAOBHAO	Μέγιστος ρυθμός κατάλυσης της υδροξυλαμίνης NH ₂ OH	3,64056	5,20080	6,76104	mgN*(mgCOD*d) ⁻¹

4.4.4 Μεταβλητές και δείκτες ελέγχου

Καθώς το, υπό μελέτη, σύστημα παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα ως σύνθεση πολλών επιμέρους υποσυστημάτων, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έγινε επιλογή των μεταβλητών και των δεικτών ελέγχου που μελετήθηκαν στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Μεταβλητές και δείκτες ελέγχου ανάλυσης ευαισθησίας.

α/α	Μεταβλητή/Δείκτης	Ερμηνεία	Μονάδα Μέτρησης
1	CODe,tot	Ολικό COD στην έξοδο	mgCOD/l
2	CODe,sol	Διαλυτό COD στην έξοδο	mgCOD/l
3	TNe	Ολικό άζωτο στην έξοδο	mgN/l
4	SNHe	Αμμωνιακό άζωτο στην έξοδο	mgNH ₃ /l
5	w	Περίσσεια ιλύος μετά την επεξεργασία της	kg/d
6	SOTR_tot_d	Ημερήσια απαίτηση οξυγόνου	kgO ₂ /d
7	BIOGAS	Παραγόμενο βιοαέριο	m ³ /d
8	Total_EN_consumption	Συνολική ενεργειακή κατανάλωση	kWh/d
9	recov_elec	Ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας	%
10	recov_therm	Ανάκτηση θερμικής ενέργειας	%
11	N2O_bioreact_tot	Εκπομπή υποξειδίου του αζώτου στο βιοαντιδραστήρα	kgN ₂ O/d
12	N2O_tot	Σύνολο εκπομπών υποξειδίου του αζώτου	kgN ₂ O/d
13	Total_GHG_CO2eq	Σύνολο εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε όρους CO ₂	kgCO ₂ /d
14	kgCO ₂ _kgCOD	Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προς COD που καταναλώνεται	kgCO ₂ /kgCOD(day)
15	kgCO ₂ _kgN	Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προς άζωτο που απομακρύνεται	kgCO ₂ /kgN(day)
16	kgN2O_kgTNin	Εκπομπές υποξειδίου του αζώτου προς ολικό άζωτο που εισέρχεται	kgN ₂ O/kgN(day)
17	kWh_kgCOD	Ενεργειακή κατανάλωση προς COD που καταναλώνεται	kWh/kgCOD(day)
18	kWh_kgN	Ενεργειακή κατανάλωση προς άζωτο που απομακρύνεται	kWh/kgN(day)
19	EQI	Ποιότητα εκροής σε όρους ρύπανσης	kgPollution/d

4.5 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

4.5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας εξετάστηκαν σενάρια, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες σύμφωνα με το είδος φόρτισης που δέχεται το σύστημα και το χρόνο παραμονής

στερεών σε αυτό. Σε όλες τις ομάδες σεναρίων διερευνήθηκε η επίδραση που έχει η μεταβολή, κατά $\pm 30\%$, των εξήντα-επτά (67) στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων που παρατίθενται στον Πίνακα 4.3 στις δεκαεννέα (19) μεταβλητές/δείκτες που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4.4.

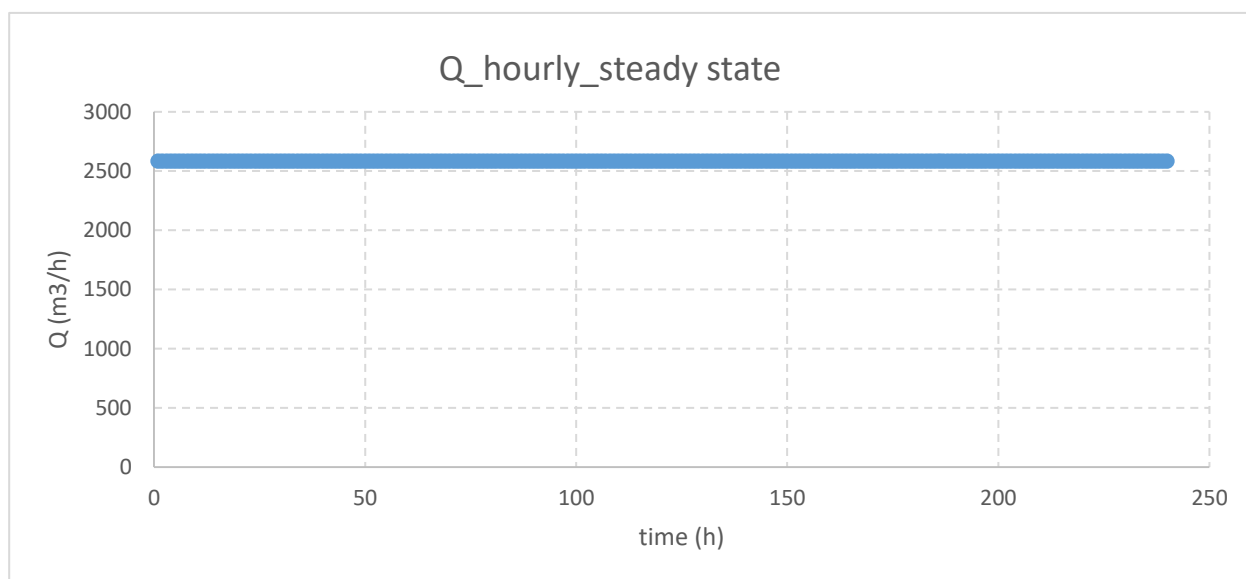
Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των σεναρίων, καθώς και σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων.

4.5.2 1^η σειρά σεναρίων: Σταθερή φόρτιση με SRT=10d

4.5.2.1 Δεδομένα προσομοίωσης

Στην 1^η σειρά σεναρίων η εγκατάσταση δέχεται σταθερή ημερήσια παροχή $Q = 62000 \text{ m}^3/\text{d}$ η οποία επιμερίζεται ισόποσα σε όλη τη διάρκεια της ημέρας όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.

Ο χρόνος παραμονής στερεών είναι $SRT = 10 \text{ d}$ και οι τιμές αναφοράς με τις οποίες θα συγκριθούν τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων της σειράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.



Σχήμα 4.1 Σταθερή ωριαία εισερχόμενη παροχή σεναρίων σταθερής φόρτισης.

Πίνακας 4.5: Τιμές αναφοράς σεναρίου σταθερής φόρτισης για SRT=10d.

α/α	Μεταβλητή/Δείκτης	Τιμή Αναφοράς	Μονάδα Μέτρησης
1	CODe,tot	58,7004	mgCOD/l
2	CODe,sol	42,7601	mgCOD/l
3	TNe	12,3889	mgN/l
4	SNHe	0,0273	mgNH ₃ /l
5	w	10632,7190	kg/d
6	SOTR_tot_d	51284,8873	kgO ₂ /d
7	BIOGAS	6521,6863	m ³ /d
8	Total_EN_consumption	22274,7328	kWh/d

α/α	Μεταβλητή/Δείκτης	Τιμή Αναφοράς	Μονάδα Μέτρησης
9	recov_elec	0,6489	-
10	recov_therm	2,4233	-
11	N2O_bioreact_tot	70,6459	kgN ₂ O/d
12	N2O_tot	75,2916	kgN ₂ O/d
13	Total_GHG_CO2eq	105862,8034	kgCO ₂ /d
14	kgCO ₂ _kgCOD	2,9938	kgCO ₂ /kgCOD(day)
15	kgCO ₂ _kgN	56,1416	kgCO ₂ /kgN(day)
16	kgN ₂ O_kgTNin	0,0284	kgN ₂ O/kgN(day)
17	kWh_kgCOD	0,6299	kWh/kgCOD(day)
18	kWh_kgN	11,8128	kWh/kgN(day)
19	EQI	15584,8129	kgPollution/d

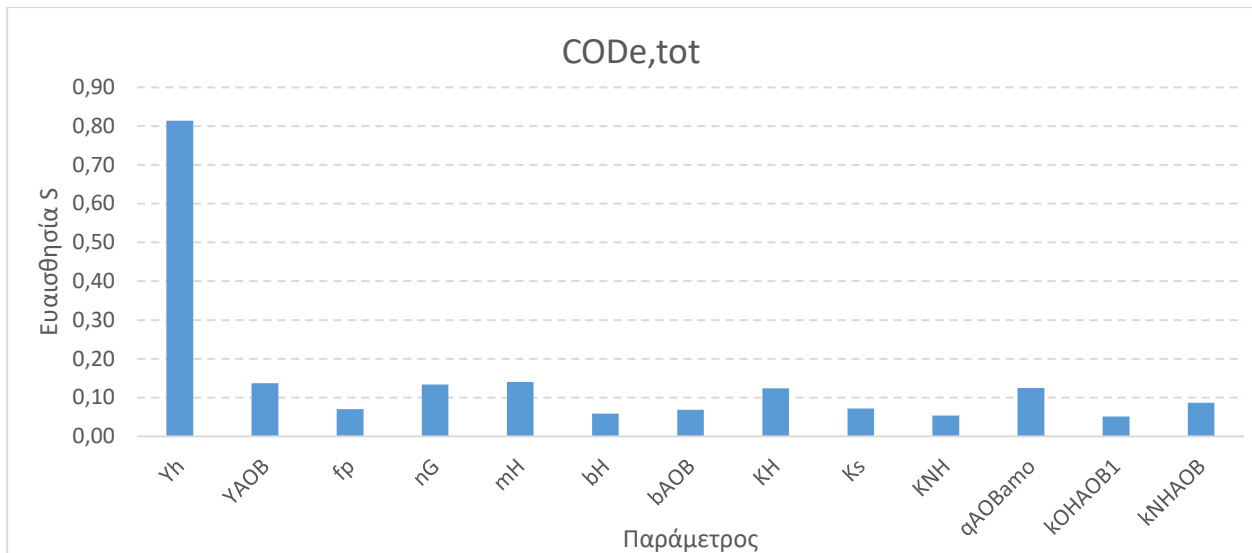
4.5.2.2 Στόχος σεναρίου

Στόχος του σεναρίου της σταθερής φόρτισης με χρόνο παραμονής στερεών SRT = 10 d είναι να υπολογιστεί η σχετική ευαισθησία του συστήματος στις 67 στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους, ώστε να αναδειχθούν εκείνες στις οποίες είναι περισσότερο ευαίσθητο, υπό αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, και να υπολογιστεί η επίδραση της αλλαγής τους σε συγκεκριμένες μεταβλητές και δείκτες απόδοσης.

4.5.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για το ολικό COD στην έξοδο της εγκατάστασης τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.

Η παράμετρος στη μεταβολή της οποίας είναι πιο ευαίσθητη η μεταβλητή COD_{e,tot} είναι το Y_h. Όπως αναμενόταν, ο συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας, ο οποίος καθορίζει το κλάσμα του COD που θα οδηγηθεί σε σύνθεση νέας βιομάζας ως προς την τροφή που καταναλώνεται, επηρεάζει σημαντικά το COD στην έξοδο, καθώς η ποσότητα της βιομάζας επηρεάζει άμεσα τη φυσική διαδικασία της καθίζησης, απόρροια της οποίας είναι η ποιότητα εκροής. Μάλιστα, η μεταβλητή είναι περισσότερο ευαίσθητη στην αύξηση του συντελεστή Y_h καθώς η αυξημένη βιομάζα που μεταφράζεται σε αύξηση των MLSS με αποτέλεσμα να φορτίζεται περισσότερο η δεξαμενή καθίζησης και να χάνονται περισσότερα στερεά στην έξοδο.



Σχήμα 4.2 Ευαισθησία της μεταβλητής CODe,tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Λιγότερο ευαίσθητο παρουσιάζεται το CODe,tot στις μεταβολές του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας mH, με τη μεταβολή των τιμών του να πραγματοποιείται στην αντίθετη κατεύθυνση από τη μεταβολή της παραμέτρου. Η αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, όπως ήταν αναμενόμενο μείωσε το COD στην έξοδο γιατί αυξήθηκε η κατανάλωση οργανικού άνθρακα κατά την ανάπτυξη της βιομάζας.

Επίσης, μικρή σχετική ευαισθησία παρατηρήθηκε και στη μεταβολή του μέγιστου ειδικού ρυθμού υδρόλυσης. Με την αύξηση του ρυθμού μειώθηκε το ολικό COD εξόδου καθώς ο οργανικός άνθρακας ήταν πιο γρήγορα διαθέσιμος για κατανάλωση από τους μικροοργανισμούς.

Μικρή σχετική ευαισθησία παρουσιάζει το CODe,tot σε παραμέτρους που ρυθμίζουν τη σύνθεση και τη φθορά των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, όπως είναι οι Y_{ΑΟΒ} και B_{ΑΟΒ}, καθώς η συγκεκριμένοι μικροοργανισμοί αποτελούν μικρό ποσοστό της συνολικής βιομάζας και ως εκ τούτου μικρή συνεισφορά έχουν και στα στερεά που φεύγουν στην έξοδο.

Αντίστοιχα, το nG που μειώνει το ρυθμό της ανοξική ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών σε σχέση με την αερόβια ανάπτυξη, επηρεάζει, σε μικρό όμως βαθμό, το COD εξόδου λόγω της προτίμησης της ετεροτροφικής βιομάζας στο αερόβιο περιβάλλον και του προϋπάρχοντος χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης σε ανοξικό περιβάλλον.

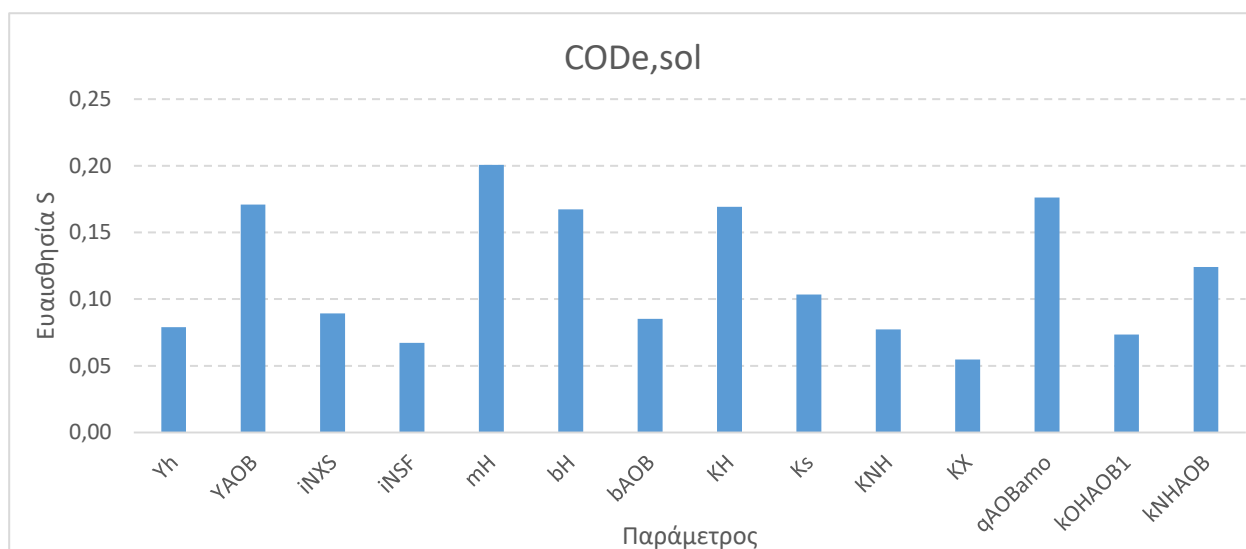
Τέλος, ανάλογα χαμηλή σχετική ευαισθησία του CODe,tot παρατηρήθηκε στις μεταβολές του q_{ΑΟΒαμο}, που είναι ο μέγιστος ρυθμός οξειδωσης της αμμωνίας NH₃ σε υδροξυλαμίνη NH₂OH. Η συγκεκριμένη διεργασία προηγείται της σύνθεσης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, γεγονός που αποτυπώνεται στη μεταβολή του ολικού COD εξόδου. Επίσης, καθώς είναι η αρχική οδός της νιτροποίησης επηρεάζει και την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

Για το διαλυτό COD στην έξοδο της εγκατάστασης τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.

Το διαλυτό COD εξόδου είναι πιο ευαίσθητο στη μεταβολή του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας m_H , καθώς πρόκειται για τους μικροοργανισμούς που επικρατούν στο σύστημα ενεργού ιλύος και κατά συνέπεια η αύξηση του ρυθμού αερόβιας ανάπτυξής τους σημαίνει ότι καταναλώνουν περισσότερη διαλυτή τροφή και μειώνεται το $CODe_{sol}$.

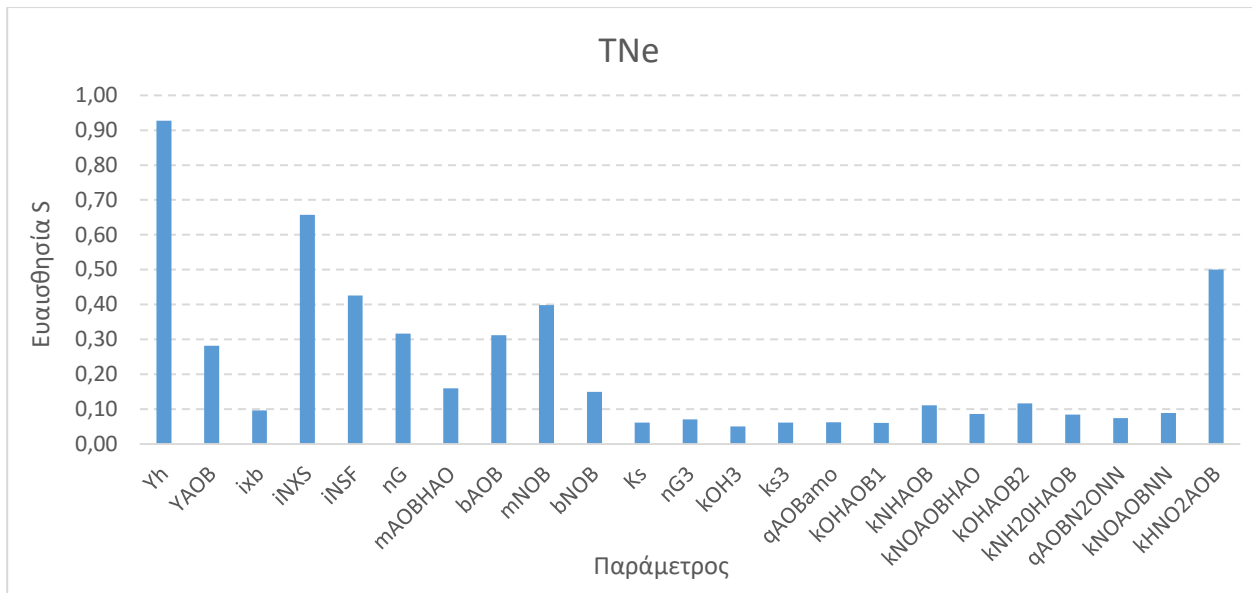
Μικρότερη επιρροή από την m_H στη μεταβολή του $CODe_{sol}$ παρουσιάζουν οι παράμετροι $q_{AOB_{amo}}$, Y_{AOB} , b_H και K_H . Οι δύο πρώτοι παράμετροι που σχετίζονται με την ανάπτυξη των αυτοτροφικών μικροοργανισμών επηρεάζουν τη νιτροποίηση με αποτέλεσμα να μειώνεται και η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών που είναι ακόμα μια οδός κατανάλωσης διαλυτής τροφής. Η φθορά b_H των ετεροτροφικών σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση της ευκολοδιασπάσιμης τροφής καθώς η μείωση της φθοράς τους μεταφράζεται σε μείωση του διαλυτού COD στην έξοδο. Τέλος, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός υδρόλυσης K_H σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα της ευκολοδιασπάσιμης τροφής.

Λίγο μικρότερη επιρροή παρουσιάζει ο συντελεστής ημικορεσμού αμμωνίας για την οξείδωσή της σε υδροξυλαμίνη, για τους λόγους που αναπτύσσονται αμέσως παραπάνω σχετικά με τη σημασία της αντίδρασης αυτής στην οδό νιτροποίησης των νιτροποιητών.



Σχήμα 4.3 Ευαισθησία της μεταβλητής $CODe_{sol}$ στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για το ολικό άζωτο στην έξοδο της εγκατάστασης τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Ευαισθησία της μεταβλητής TNe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Το TNe είναι περισσότερο ευαίσθητο στις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας Yh. Είναι φανερό, απ' το γεγονός ότι η αύξηση του συντελεστή μεταφράζεται σε αύξηση μόνο του σωματιδιακού COD στην έξοδο και μείωση του αμμωνιακού αζώτου, ότι η αύξηση του TNe σχετίζεται με την αύξηση της ετεροτροφικής βιομάζας που οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των MLSS και προκαλεί συνθήκες αυξημένης φόρτισης της ΔTK. Κατά συνέπεια μικρή συγκέντρωση των στερεών φεύγει στην έξοδο της εγκατάστασης χωρίς να καθιζάνει στη ΔTK με αποτέλεσμα να αυξάνεται το οργανικό N στην έξοδο.

Αντίστοιχα, παρουσιάζεται η δεύτερη μεγαλύτερη ευαισθησία στο συντελεστή iNXS, που αντιστοιχεί στην περιεκτικότητα σε άζωτο της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης. Η αιτιολόγηση ακολουθεί τη συλλογιστική της προηγούμενης παραγράφου, καθώς πρόκειται για βιοδιασπάσιμη ύλη που δεν έχει υδρολυθεί ώστε να καταναλωθεί και διαφεύγει στην έξοδο με το κλάσμα αζώτου που περιέχει. Αύξηση του κλάσματος μεταφράζεται σε αύξηση του ολικού αζώτου στην έξοδο.

Ακολουθεί σε ευαισθησία ο συντελεστής κορεσμού του νιτρώδους οξέος chιno2ΑOB για την απονιτροποίηση των νιτροποιητών. Η οδός απονιτροποίησης των νιτροποιητών παρουσιάζεται να επηρεάζει σημαντικά το ολικό άζωτο εξόδου. Συγκεκριμένα, με τη μείωση του συντελεστή ο ρυθμός της διεργασίας επιταχύνεται για μικρότερες συγκεντρώσεις του νιτρώδους οξέος. Ταυτόχρονα το COD στην έξοδο παραμένει ανεπηρέαστο και αυξάνεται πολύ το υποξείδιο αζώτου του βιοαντιδραστήρα, επομένως το άζωτο εξόδου μειώθηκε με την απονιτροποίηση.

Μικρότερη ευαισθησία παρουσιάζει το ολικό άζωτο εξόδου στο iNSF που είναι το κλάσμα αζώτου στην εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη. Η μείωση του κλάσματος αζώτου στην οργανική ύλη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ολικού αζώτου εξόδου. Καθώς οι μικροοργανισμοί έχουν ανάγκη το N ως θρεπτικό συστατικό πρέπει να περιμένουν τη φθορά τους ώστε το οργανικό άζωτο να αμμωνιοποιηθεί και να καταστεί διαθέσιμο για σύνθεση. Αυτό αποδεικνύεται και από την μικρή αύξηση αμμωνιακού αζώτου εξόδου υπό τις ίδιες συνθήκες.

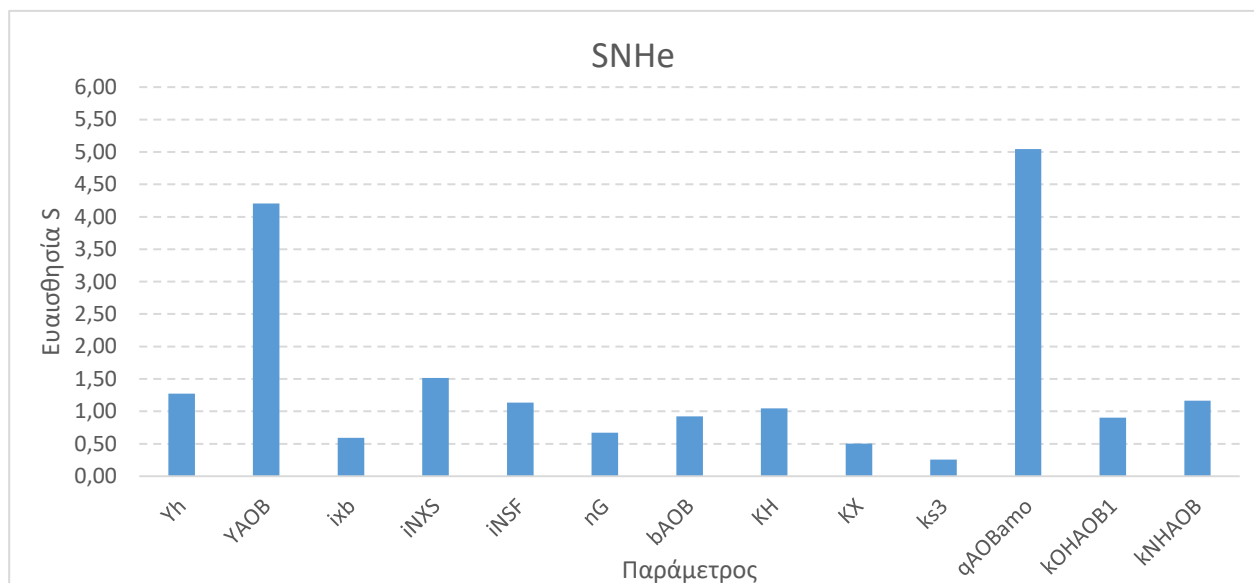
Λίγο μικρότερη ευαισθησία παρουσιάστηκε στο μέγιστο ειδικό ρυθμό αερόβιας ανάπτυξης νιτροποιητικών βακτηρίων mNOB. Η μείωση του ρυθμού είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του ολικού αζώτου στην έξοδο, ενώ την ίδια στιγμή το υποξείδιο αζώτου N₂O του βιοαντιδραστήρα υπερδιπλασιάστηκε. Κατά συνέπεια η απονιτροποίηση κινήθηκε περισσότερο, σε αυτή την περίπτωση, από τους νιτροποιητές και μειώθηκε η συνεισφορά των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

Για το αμμωνιακό άζωτο στην έξοδο της εγκατάστασης τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5.

Πολύ μεγάλη σχετική ευαισθησία παρουσιάζει το SNHe στο μέγιστο ειδικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη qAOB_{amo} καθώς ρυθμίζει το πρώτο βήμα της οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη.

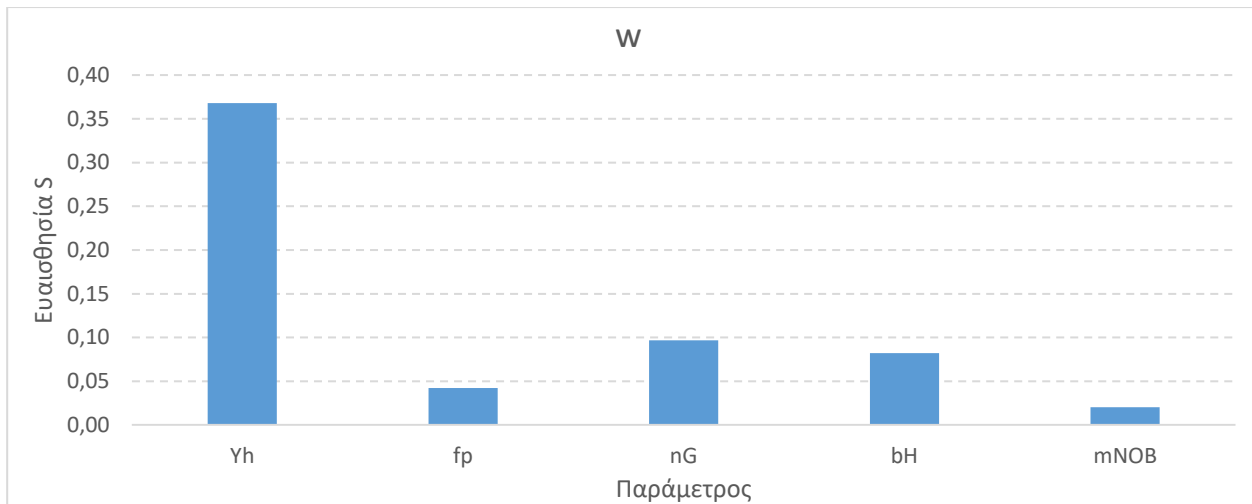
Μεγάλη σχετική ευαισθησία παρουσιάζει το SNHe στο συντελεστή απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας Y_{AOB}, καθώς πρόκειται για το συντελεστή που ρυθμίζει τη σύνθεση των AOB ως προς το N που απομακρύνεται. Επομένως η μείωση του συντελεστή συνδέεται με μείωση των AOB που συντίθενται και αυτό έχει συνέπεια σε όλες τις διεργασίες που συμμετέχουν οι AOB, μεταξύ των οποίων είναι η προαναφερθείσα οξείδωση της αμμωνίας NH₃ σε υδροξυλαμίνη NH₂OH και η οξείδωση της υδροξυλαμίνης NH₂OH σε οξείδιο του αζώτου, που απαιτούν την κατανάλωση αμμωνιακού αζώτου αμφότερες.

Επισημαίνεται ότι για την περίπτωση του SNHe οι μεταβολές είναι πολύ μικρές καθώς ήδη η συγκέντρωση στην έξοδο είναι μικρότερη από 0,03mg/l.



Σχήμα 4.5 Ευαισθησία της μεταβλητής SNHe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για την περίσσεια ιλύος τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 Ευαισθησία της μεταβλητής W στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

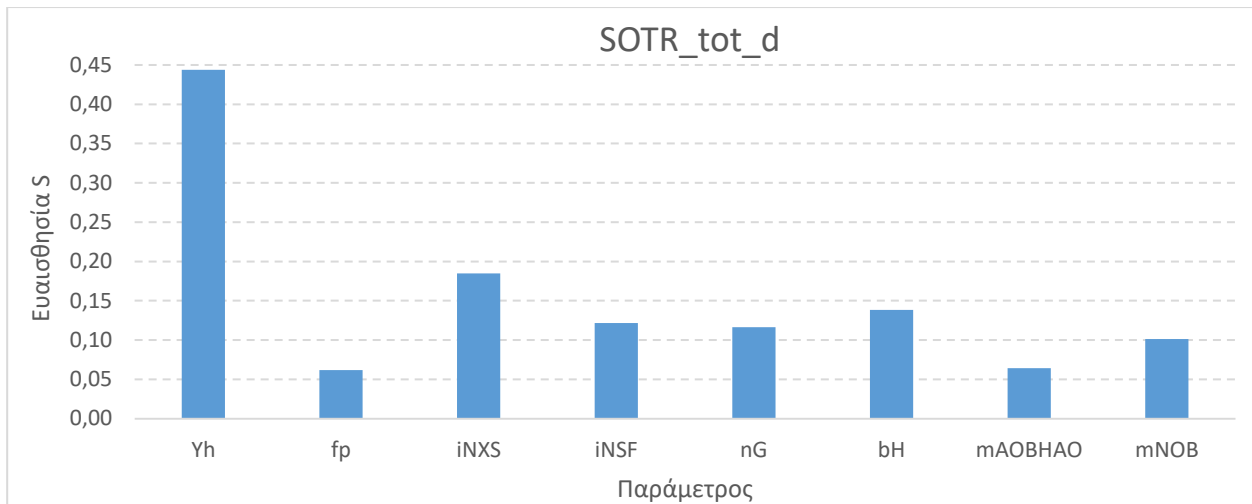
Η μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζεται, όπως αναμενόταν, για το συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας. Πρόκειται για το συντελεστή που ρυθμίζει την αναλογία μικροοργανισμών που συντίθενται προς το COD που καταναλώνεται και κατά συνέπεια, η μεταβολή του Y_h παρασύρει προς την ίδια κατεύθυνση την παραγωγή της βιομάζας που κυριαρχεί στο σύστημα ενεργού ιλύος, γεγονός που μεταφράζεται σε μεταβολή των MLSS και τελικά της περίσσειας που απομακρύνεται από το σύστημα. Παρόλο που πρόκειται για τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία, εντούτοις η τιμή της είναι χαμηλή και, κατά συνέπεια η παράμετρος δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Μικρότερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζεται για το μειωτικό συντελεστή που ρυθμίζει την ανάπτυξη των ετεροτροφικών σε ανοξικό περιβάλλον κατ' αντιστοιχία με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αλλά που λαμβάνουν χώρα σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο, με παρουσία νιτρικών και με μικρότερες ταχύτητες.

Μικρή σχετική ευαισθησία αποδεικνύεται ότι παρουσιάζει το w και στον ειδικό ρυθμό αποσύνθεσης ετεροτροφικής βιομάζας στη λογική που αναπτύχθηκε παραπάνω και αφορά τη φθορά των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Δηλαδή η αύξηση του ρυθμού αποσύνθεσης συνδέεται με μείωση της περίσσειας ιλύος που απομακρύνεται από το σύστημα.

Ακολουθεί σε σχετική ευαισθησία το f_p που αποτελεί το κλάσμα αδρανών σωματιδιακών προϊόντων από τη λύση της βιομάζας. Είναι φανερό ότι η μεταβολή της παραμέτρου αυτής έχει παρασύρει σε ίδιας κατεύθυνσης μεταβολή την περίσσεια ιλύος, καθώς εκεί καταλήγουν τα μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα της φθοράς των μικροοργανισμών.

Για την $SOTR_{tot_d}$ τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Ευαισθησία της μεταβλητής SOTR_tot_d στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

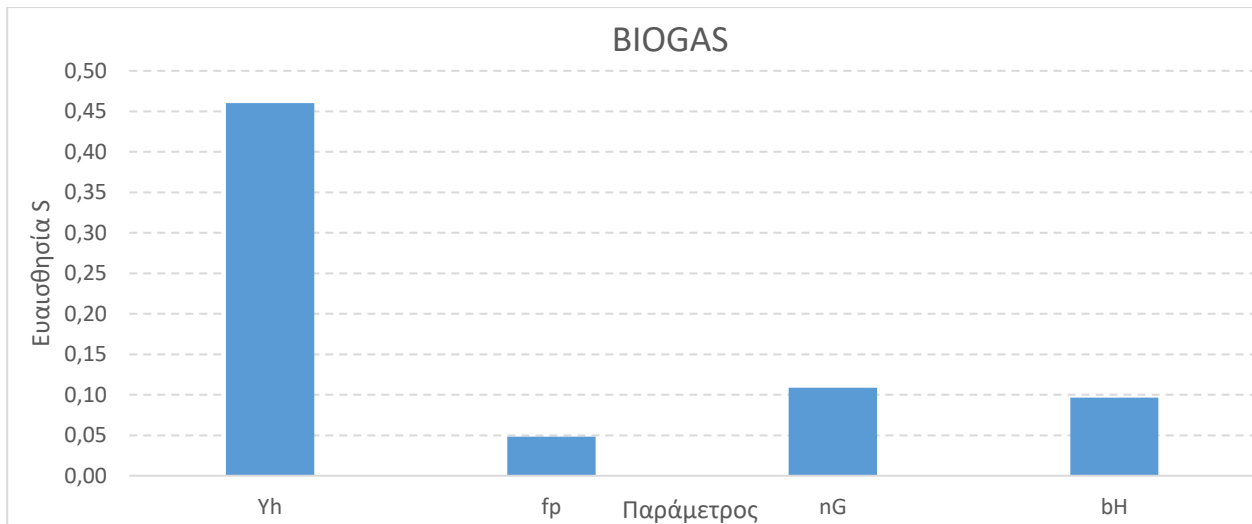
Η μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζεται για τον συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας Yh καθώς η μείωση του συντελεστή μεταφράζεται σε μειωμένη σύνθεση βιομάζας σε σχέση με το COD που καταναλώνεται, το οποίο οξειδώνεται περισσότερο προς CO₂ με συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης οξυγόνου. Παρόλο που πρόκειται για τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία, εντούτοις η τιμή της είναι χαμηλή και, κατά συνέπεια η παράμετρος δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Η περιεκτικότητα N της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης, iNXS, επηρεάζει την κατανάλωση O₂ του συστήματος αερισμού, καθώς η αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη υπόκειται σε υδρόλυση και ακολουθεί αμμωνιοποίηση του οργανικού αζώτου, που σε αερόβιο περιβάλλον θα καταναλώσει οξυγόνο λόγω νιτροποίησης.

Ακολουθεί ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικής βιομάζας σε σχετική ευαισθησία, καθώς η φθορά της ετεροτροφικής βιομάζας συνδέεται με κατανάλωση οξυγόνου στη φάση της ενδογενούς αναπνοής.

Μικρότερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζει η κατανάλωση O₂ στο κλάσμα αζώτου της ευκολοδιασπάσιμης τροφής, iNSF, και τον ειδικό ρυθμό ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών nG. Η ευκολοδιασπάσιμη τροφή δεν απαιτεί υδρόλυση για να καταναλωθεί και κατά συνέπεια οδηγεί σε μείωση της αμμωνιοποίησης, άρα και της κατανάλωσης O₂ λόγω νιτροποίησης. Αντίστοιχα η ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών δεν καταναλώνει O₂ αλλά NO₃, οπότε δεν συνεισφέρει στο SOTR.

Για την μεταβλητή BIOGAS τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 Ευαισθησία της μεταβλητής BIOGAS στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Και στην περίπτωση του βιοαερίου, στον συντελεστή Y_h παρουσιάζεται η μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία καθώς η ανάπτυξη περισσότερης βιομάζας συνδέεται άμεσα με την παραγωγή περισσότερου βιοαερίου στο χωνευτή. Και εδώ, παρόλο που πρόκειται για τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία, εντούτοις η τιμή της είναι χαμηλή και, κατά συνέπεια η παράμετρος δεν αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντική.

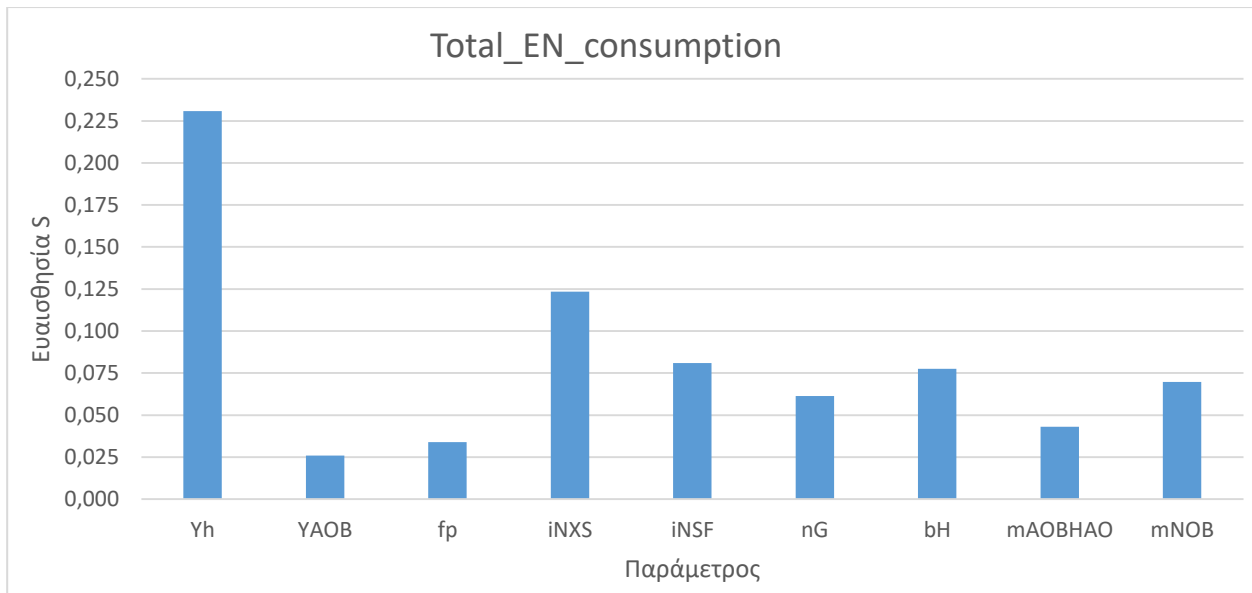
Μικρότερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζει στο διορθωτικό συντελεστή ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών n_G , καθώς και στην περίπτωση αυτή πρόκειται για σύνθεση βιομάζας που μεταφράζεται σε οργανικό υλικό για χώνευση προς παραγωγή βιοαερίου.

Ίδιας τάξης μεγέθους σχετική ευαισθησία παρουσιάζει και στο ρυθμό αποσύνθεσης ετεροτροφικών μικροοργανισμών, b_H , καθώς η φθορά της βιομάζας συνδέεται με μείωση του οργανικού υλικού διαθέσιμου για χώνευση και παραγωγή βιοαερίου.

Για την μεταβλητή $Total_EN_consumption$ τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9.

Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας, καθώς με την μείωση του συντελεστή μειώνεται η βιομάζα που συντίθεται και αυξάνεται η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος αερισμού για την οξείδωση του οργανικού άνθρακα. Όπως και παραπάνω, παρόλο που πρόκειται για τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία, εντούτοις η τιμή της είναι χαμηλή και, κατά συνέπεια η παράμετρος δεν αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντική.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, οι παράμετροι στις οποίες εμφανίζει τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία η μεταβλητή της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης της ΕΕΛ είναι εκείνες στις οποίες παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία και η μεταβλητή της συνολικής κατανάλωσης οξυγόνου, καθώς το σύστημα αερισμού του συστήματος ενεργού λύου αποτελεί το πιο ενεργοβόρο υποσύστημα της ΕΕΛ. Επομένως, ισχύουν όσα προαναφέρθηκαν σχετικά με το Σχήμα 4.8.

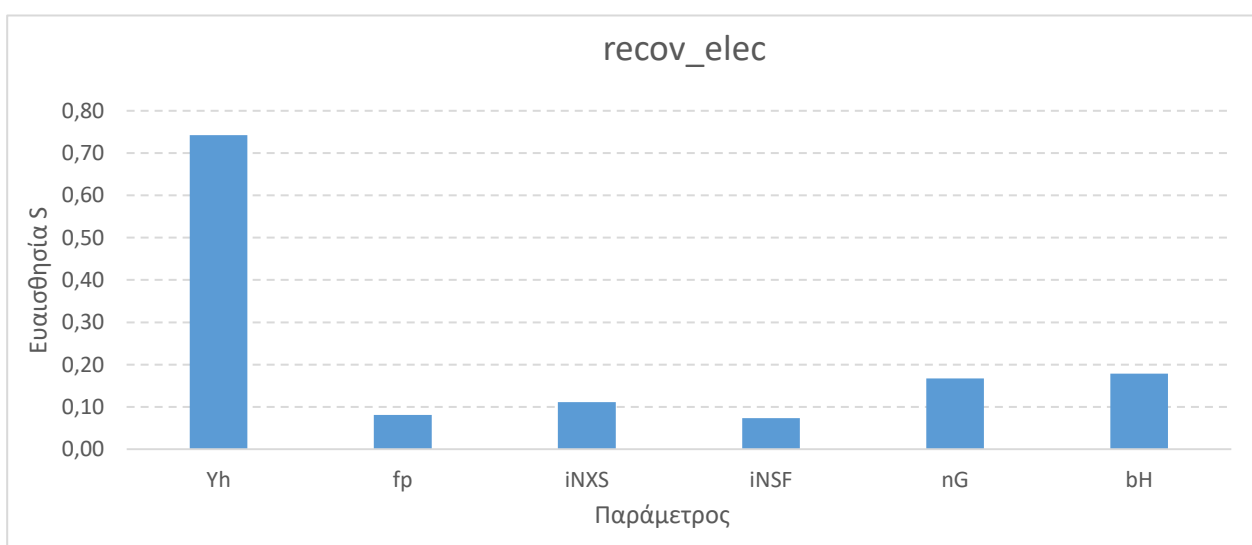


Σχήμα 4.9 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_EN_consumption στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για την μεταβλητή recon_elec τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10.

Όπως ήταν αναμενόμενο και εδώ ο συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας Yh επηρεάζει περισσότερο από όλες τις άλλες παραμέτρους την μεταβλητή ενδιαφέροντος. Η μείωση του συντελεστή επιφέρει μείωση της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η μείωση της βιομάζας που συντίθεται οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή βιοαερίου που οδηγείται στη μονάδα συμπαραγωγής και αυξάνονται οι ανάγκες ενεργειακής κατανάλωσης λόγω χρήσης του συστήματος αερισμού για τις ανάγκες οξείδωσης του οργανικού άνθρακα.

Οι παράμετροι φθοράς και ανοξικής ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, bH και nG, επηρεάζουν στη λογική που αναπτύχθηκε παραπάνω για τον Yh.

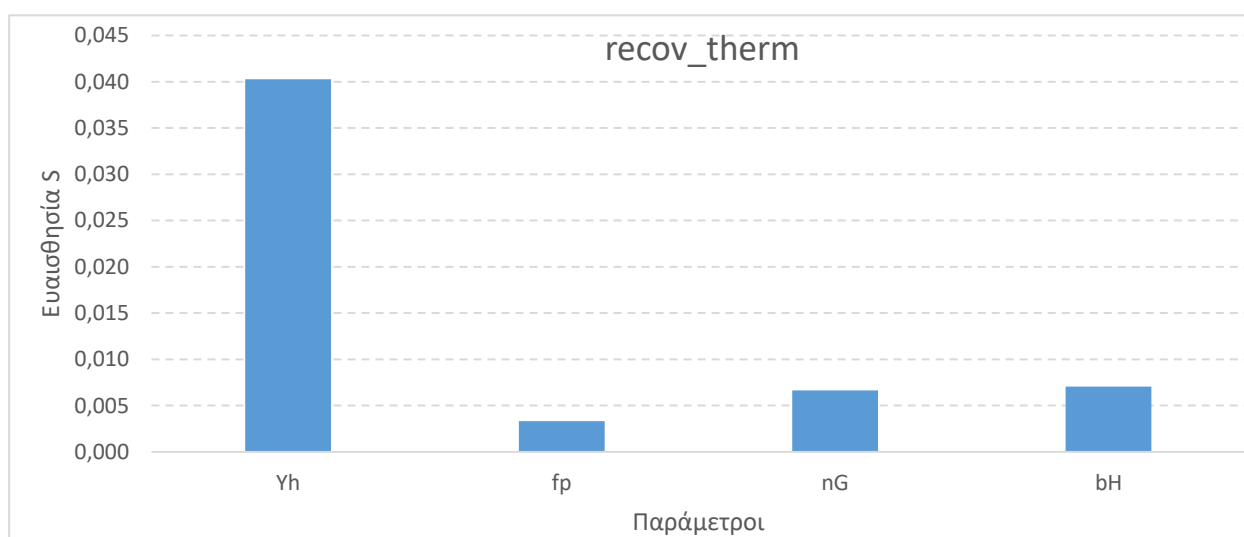


Σχήμα 4.10 Ευαισθησία της μεταβλητής recon_elec στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Το ποσοστό N της αργά βιοδιασπάσιμης τροφής iNXS επηρεάζει την ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια καθώς το μειωμένο κλάσμα N συνδέεται με μειωμένο αμμωνιακό άζωτο από υδρόλυση και κατά συνέπεια μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση από νιτροποίηση. Αυτό συνεπάγεται να μειώνεται ο παρονομαστής του κλάσματος που έχει σταθερό αριθμητή την ενέργεια που παράγεται από το βιοαέριο, άρα στο σύνολο η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται.

Για την μεταβλητή `recov_therm` τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.11.

Η ανάλυση ευαισθησίας για την ανακτώμενη θερμική ενέργεια ανέδειξε τις ίδιες παραμέτρους που αναδείχθηκαν για την ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια και μάλιστα με μικρότερη σχετική ευαισθησία. Σχετική ευαισθησία παρουσιάστηκε στις παραμέτρους που, για ακόμη μια φορά, σχετίζονται με την ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας, καθώς πρόκειται για το οργανικό υλικό που θα οδηγηθεί στον αναερόβιο χωνευτή για την παραγωγή βιοαερίου, το οποίο, με την καύση του στη μονάδα συμπαραγωγής θα παρέχει μέρος της θερμικής ενέργειας για την μεσοφιλική χώνευση.

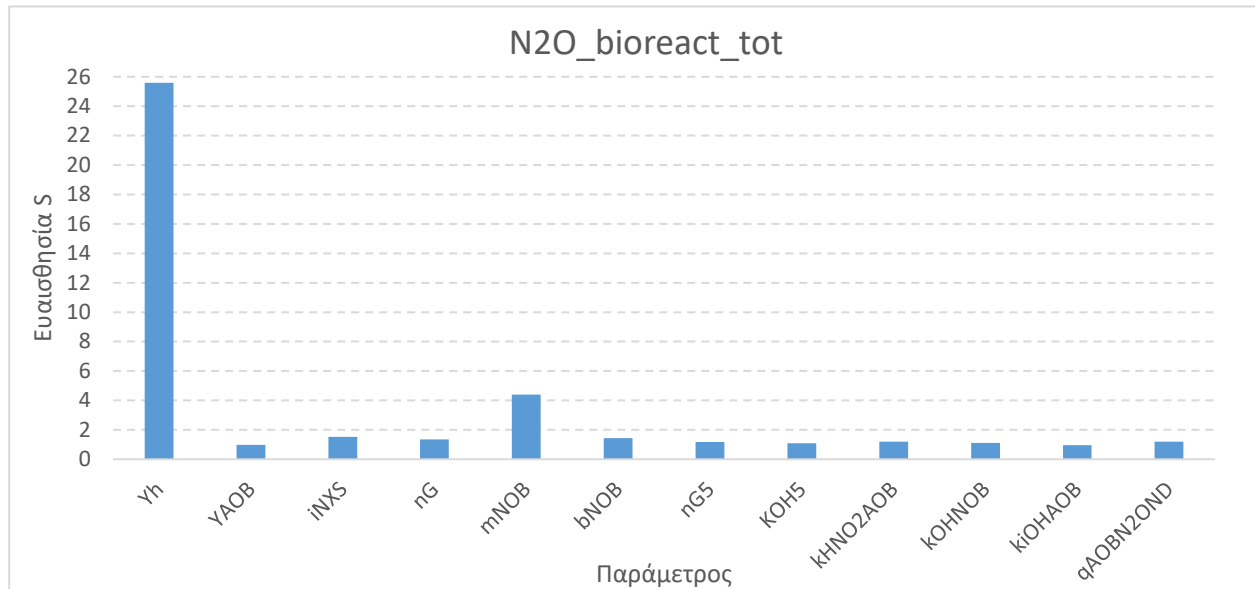


Σχήμα 4.11 Ευαισθησία της μεταβλητής `recov_therm` στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για την μεταβλητή `N2O_bioreact_tot` τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.12.

Φαίνεται πως η παραγωγή υποξειδίου του αζώτου στο βιοαντιδραστήρα, `N2O_bioreact_tot`, παρουσιάζει πολύ μεγάλη σχετική ευαισθησία με το συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας. Καθώς η ετεροτροφική βιομάζα αναπτύσσεται πολύ σε σχέση με τη διαθέσιμη τροφή επέρχεται η φθορά της που οδηγεί στην υδρόλυση, την παραγωγή σωματιδιακών προϊόντων και την αμμωνιοποίηση. Στο αερόβιο περιβάλλον, ελλείψει αφθονίας τροφής, η αμμωνία NH_3 οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη NH_2OH , η υδροξυλαμίνη σε οξύτιο του αζώτου NO και το οξύτιο του αζώτου σε νιτρώδη NO_2 από τα αυτοτροφικά βακτήρια, ενώ δεν ευνοείται η απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών. Η παρουσία NH_2OH , NO και NO_2 ευνοεί

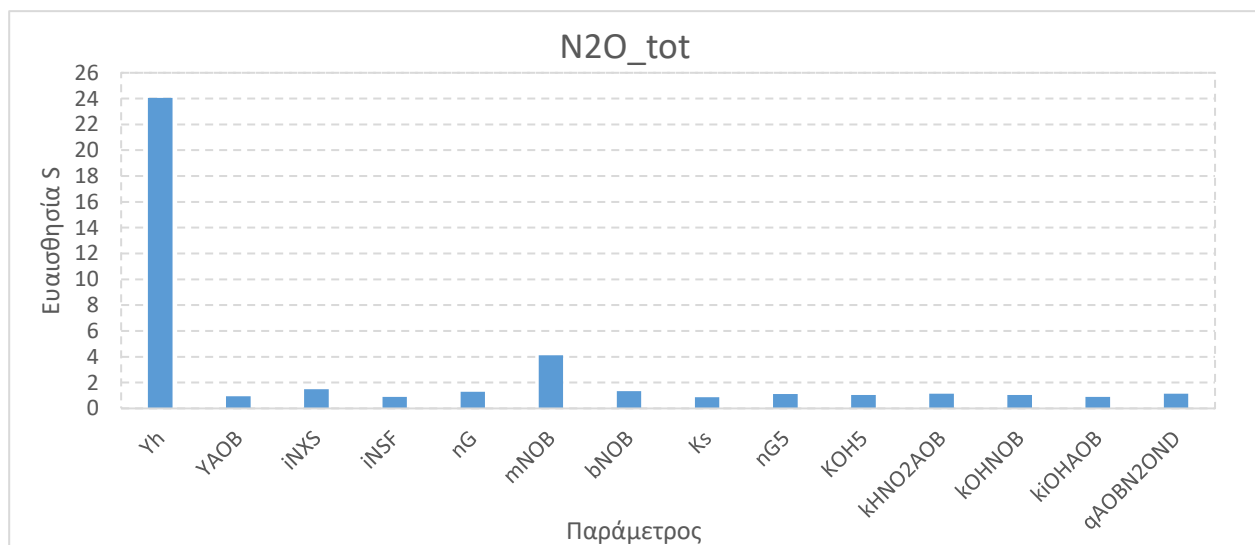
τη νιτροποίηση και απονιτροποίηση των νιτροποιητών που οδηγούν στην μεγάλη αύξηση παραγωγής N₂O στο βιοαντιδραστήρα.



Σχήμα 4.12 Ευαισθησία της μεταβλητής N₂O_{bioreact_tot} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

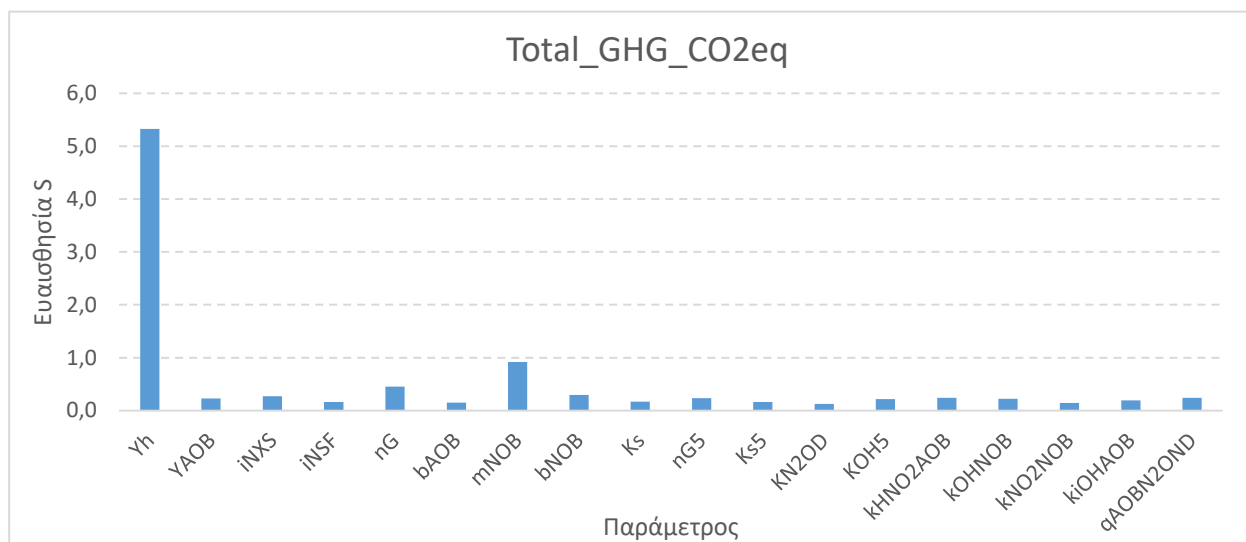
Μικρότερη σχετική ευαισθησία, εντούτοις σημαντική, παρουσιάζει η παραγωγή υποξειδίου του αζώτου στο βιοαντιδραστήρα στο μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων, mNOB. Οι μεταβολές της συγκεκριμένης παραμέτρου επηρεάζουν την αερόβια ανάπτυξη των NOB. Επομένως, ανατρέπεται η σχετική ισορροπία μεταξύ των AOB και NOB που οδηγεί σε συσσώρευση νιτρωδών στο βιοαντιδραστήρα, όταν μειώνεται η ανάπτυξη των NOB, και, τελικά δημιουργούνται συνθήκες σημαντικής αύξησης του παραγόμενου N₂O.

Για την μεταβλητή N₂O_{tot} τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.13 ενώ για την μεταβλητή Total_GHG_CO₂e_q στο Σχήμα 4.14.



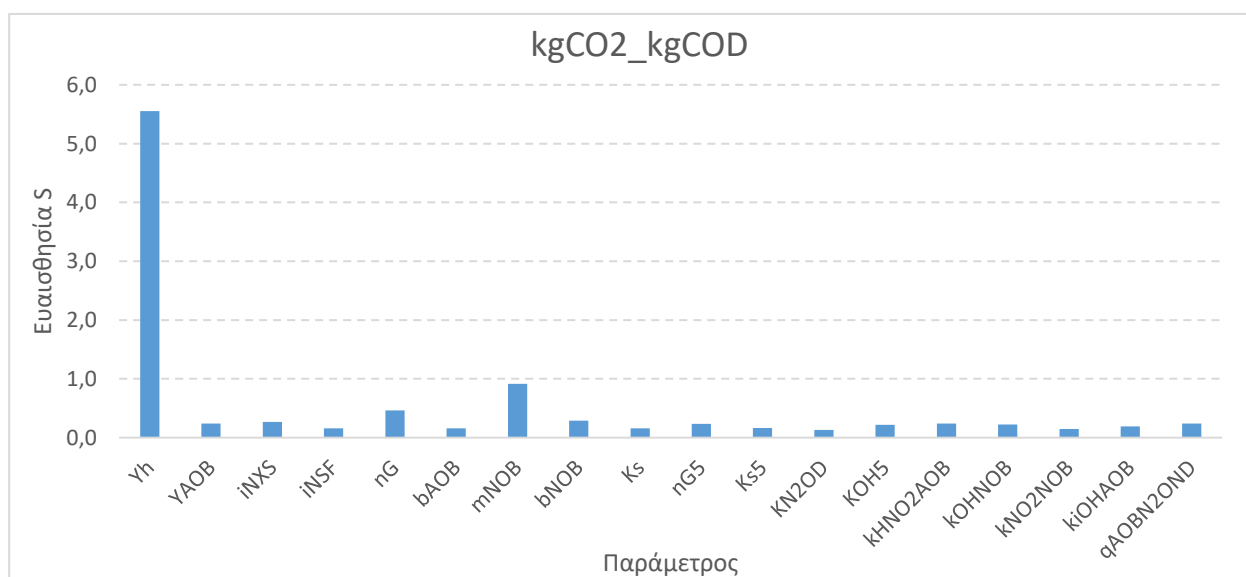
Σχήμα 4.13 Ευαισθησία της μεταβλητής N₂O_{tot} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Η ανάλυση ευαισθησίας για τη μεταβλητή N_2O_{tot} ανέδειξε τις ίδιες παραμέτρους που παρουσιάστηκαν για τη μεταβλητή $N_2O_{bioreact_tot}$, καθώς η κύρια παραγωγή υποξειδίου του αζώτου στην ΕΕΛ λαμβάνει χώρα στο βιοαντιδραστήρα. Κατ' αναλογία ίδια εικόνα παρουσιάζει και η ανάλυση ευαισθησίας για τη μεταβλητή $Total_GHG_CO_2eq$ καθώς η μεγάλη αύξηση της παραγωγής N_2O λόγω αύξησης του Y_h μεταφράζεται σε άνοδο του $Total_GHG_CO_2eq$. Με τον ίδιο τρόπο η αύξηση της αερόβιας ανάπτυξης των NOB, μειώνοντας την παραγωγή N_2O συνδέεται με μείωση του $Total_GHG_CO_2eq$. Η σχετική ευαισθησία εμφανίζεται μικρότερη στην περίπτωση του $Total_GHG_CO_2eq$ και για τις δύο παραμέτρους λόγω του ότι δεν συνεισφέρει μόνο το N_2O στη συγκεκριμένη μεταβλητή και ως εκ τούτου εμβλύνονται οι μεταβολές.



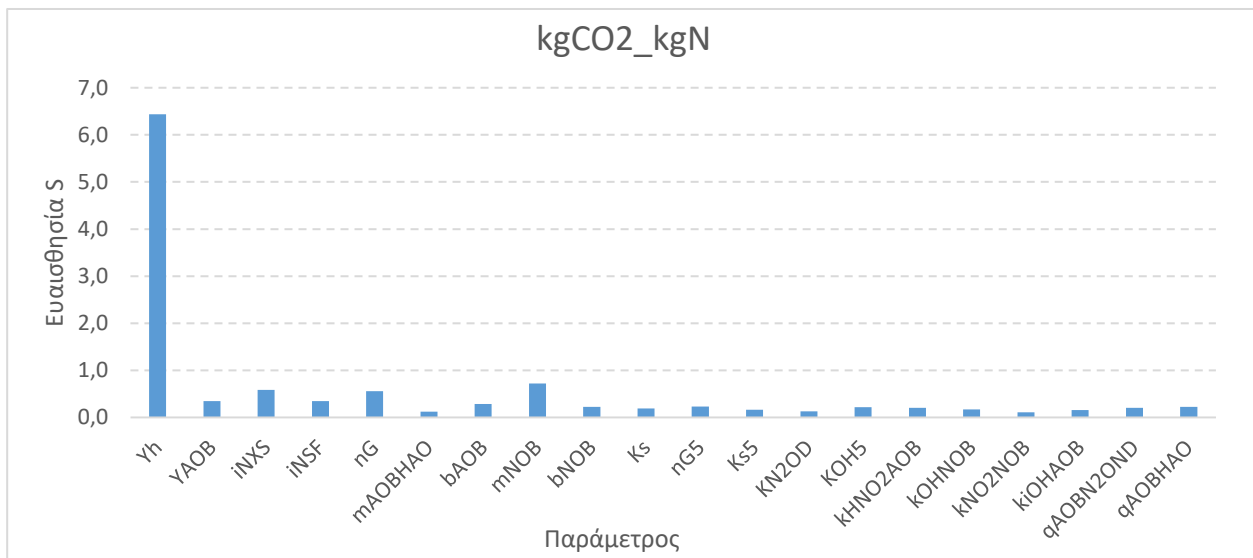
Σχήμα 4.14 Ευαισθησία της μεταβλητής $Total_GHG_CO_2eq$ στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για και τους δείκτες $kgCO_2_kgCOD$, $kgCO_2_kgN$ και kgN_2O_kgCOD τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.15, 4.16 και 4.17, αντίστοιχα.

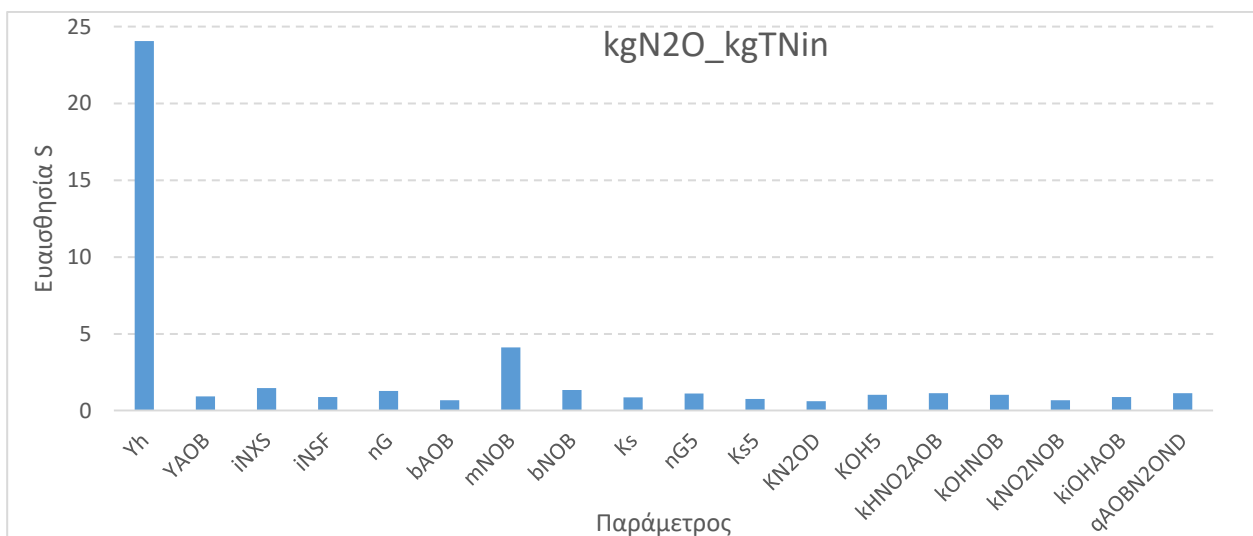


Σχήμα 4.15 Ευαισθησία του δείκτη $kgCO_2_kgCOD$ στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Σε όλες τις περιπτώσεις που αναφέρονται αμέσως παραπάνω οι μεταβλητές αποδείχθηκαν περισσότερο ευαίσθητες στις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας Y_h και αμέσως μετά, με μεγάλη διαφορά από τον Y_h , στον μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης νιτροποιητικών βακτηρίων $mNOB$. Ο αυξημένος συντελεστής Y_h όπως έχει προαναφερθεί συνδέεται με μεγάλη αύξηση του εκλυόμενου N_2O . Κατά συνέπεια, αυξάνονται οι δείκτες $kgCO_2_kgCOD$ και $kgCO_2_kgN$ καθώς ο αριθμητής περιλαμβάνει τη μεγάλη αύξηση του N_2O σε όρους CO_2 , με ταυτόχρονη μικρή, σχετικά, μείωση των COD και N που απομακρύνονται. Με τον ίδιο τρόπο αυξάνεται και ο δείκτης kgN_2O_kgTNin λόγω αύξησης του Y_h . Οι αντίστοιχοι δείκτες μειώθηκαν με την αύξηση του $mNOB$ λόγω κατανάλωσης NO_2 κατά την αερόβια ανάπτυξη των νιτροποιητών, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διαθεσιμότητά του στην οδό απονιτροποίησης των νιτροποιητών για να αναχθεί σε N_2O .



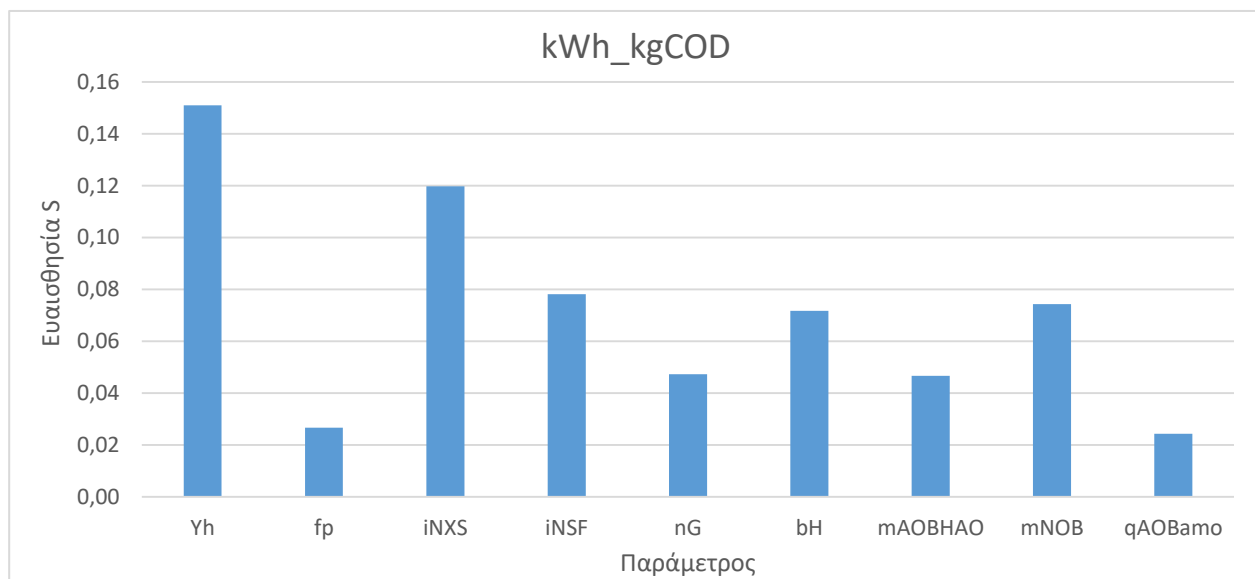
Σχήμα 4.16 Ευαισθησία του δείκτη $kgCO_2_kgN$ στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.



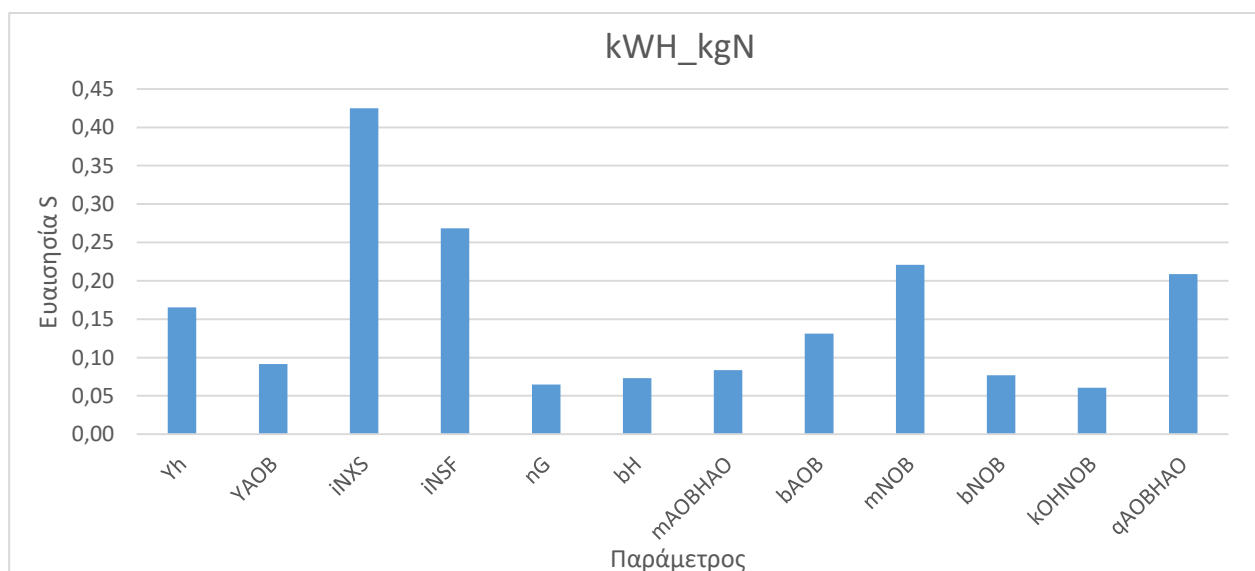
Σχήμα 4.17 Ευαισθησία του δείκτη kgN_2O_kgTNin στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για και τους δείκτες kWh_kgCOD και kWh_kgN τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.18 και 4.19, αντίστοιχα.

Για το δείκτη kWh_kgCOD η ανάλυση ευαισθησίας ανέδειξε ως σημαντικότερες τις παραμέτρους που έχουν ήδη αναλυθεί προηγουμένως, αν και όλες οι τιμές σχετικής ευαισθησίας κινήθηκαν πολύ χαμηλά. Ο συντελεστής Yh καθώς αυξάνεται οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με το COD που απομακρύνεται από τα λύματα καθώς αυξάνεται η σύνθεση της βιομάζας και μειώνονται οι ανάγκες αερισμού για την οξείδωση του οργανικού άνθρακα, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η παραγωγή βιοαερίου που οδηγείται στη μονάδα συμπαραγωγής για παραγωγή ενέργειας.



Σχήμα 4.18 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

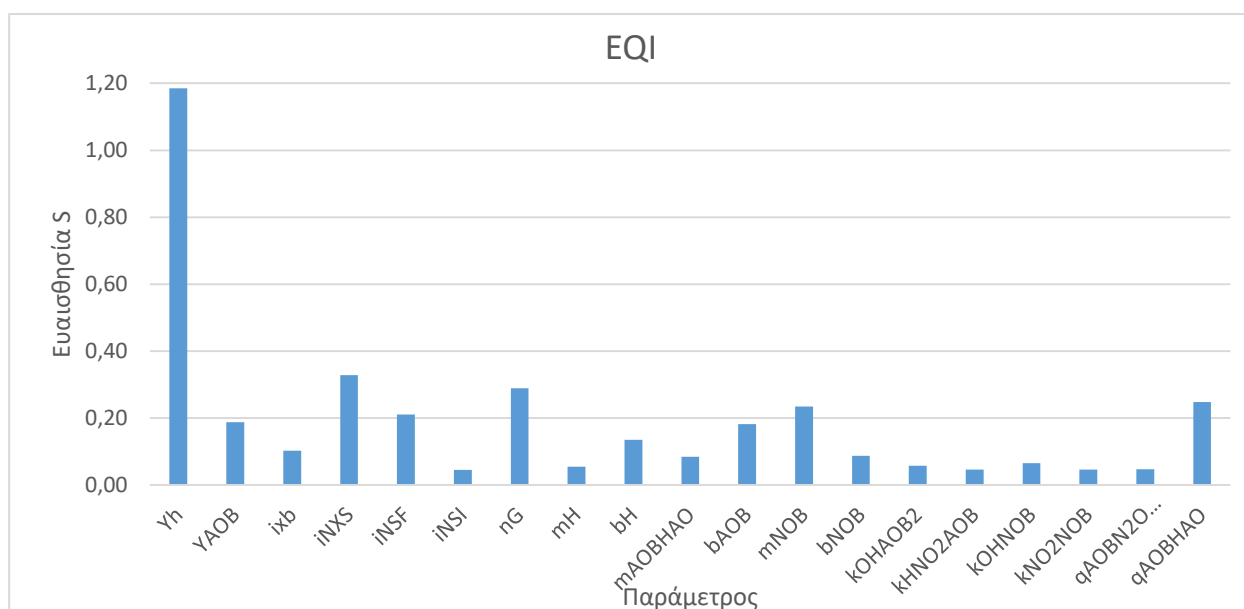


Σχήμα 4.19 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Επόμενη παράμετρος σε ευαισθησία ήταν το κλάσμα N της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης, iNXS, καθώς η αύξηση της περιεκτικότητας σε άζωτο επιφέρει αυξημένη αμμωνιοποίηση λόγω υδρόλυσης με επακόλουθη κατανάλωση ενέργειας αερισμού λόγω της νιτροποίησης του αμμωνιακού αζώτου. Αντίθετα αποτελέσματα επιφέρει η αύξηση του κλάσματος N της εύκολα διασπάσιμης οργανικής ύλης καθώς προσλαμβάνεται τους μικροοργανισμούς χωρίς να συμμετέχει σε υδρόλυση, άρα συντελείται μείωση του διαθέσιμου αμμωνιακού αζώτου που συνεπάγεται τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για νιτροποίηση.

Η φθορά των μικροοργανισμών bH συνεισφέρει στην κατανάλωση ενέργειας γιατί καταναλώνεται O₂ από το σύστημα αερισμού για την ενδογενή αναπνοή. Επίσης, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητών καθώς αυξάνεται αυξάνει τη σχετική κατανάλωση ενέργειας, γιατί αναπτύσσονται σε αερόβιο περιβάλλον χωρίς όμως να καταναλώνεται οργανικός άνθρακας κατά την ανάπτυξή τους.

Για το δείκτη EQI τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.20 Ευαισθησία του δείκτη EQI στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζεται στο συντελεστή Yh, σύμφωνα με το σκεπτικό που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, καθώς η αύξηση της ετεροτροφικής βιομάζας οδηγεί σε απώλειες στην έξοδο της εγκατάστασης που προσμετρώνται ως αυξημένο BOD_e και COD_e στο δείκτη EQI. Επιπλέον, από τη φθορά της βιομάζας παράγονται σωματιδιακά προϊόντα η υδρόλυση των οποίων παράγει αμμωνία που οξειδώνεται σε υδροξυλαμίνη και μέσω οξειδοαναγωγών προκύπτουν τα υπόλοιπα αζωτούχα αέρια που υπολογίζονται στο EQI. Με το ίδιο σκεπτικό που έχει ήδη αναλυθεί εξηγείται και η σχετική ευαισθησία του iNXS το οποίο σε μικρότερο βαθμό επηρεάζει τη μεταβολή του EQI.

4.5.3 2^η σειρά σεναρίων: Σταθερή φόρτιση με SRT=4.5d

4.5.3.1 Δεδομένα προσομοίωσης

Στη 2^η σειρά σεναρίων η εγκατάσταση δέχεται σταθερή ημερήσια παροχή $Q = 62000 \text{ m}^3/\text{d}$ η οποία επιμερίζεται ισόποσα σε όλη τη διάρκεια της ημέρας όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.

Ο χρόνος παραμονής στερεών είναι $SRT = 4.5 \text{ d}$ και οι τιμές αναφοράς με τις οποίες θα συγκριθούν τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων της σειράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Τιμές αναφοράς σεναρίου σταθερής φόρτισης για SRT=4,5d.

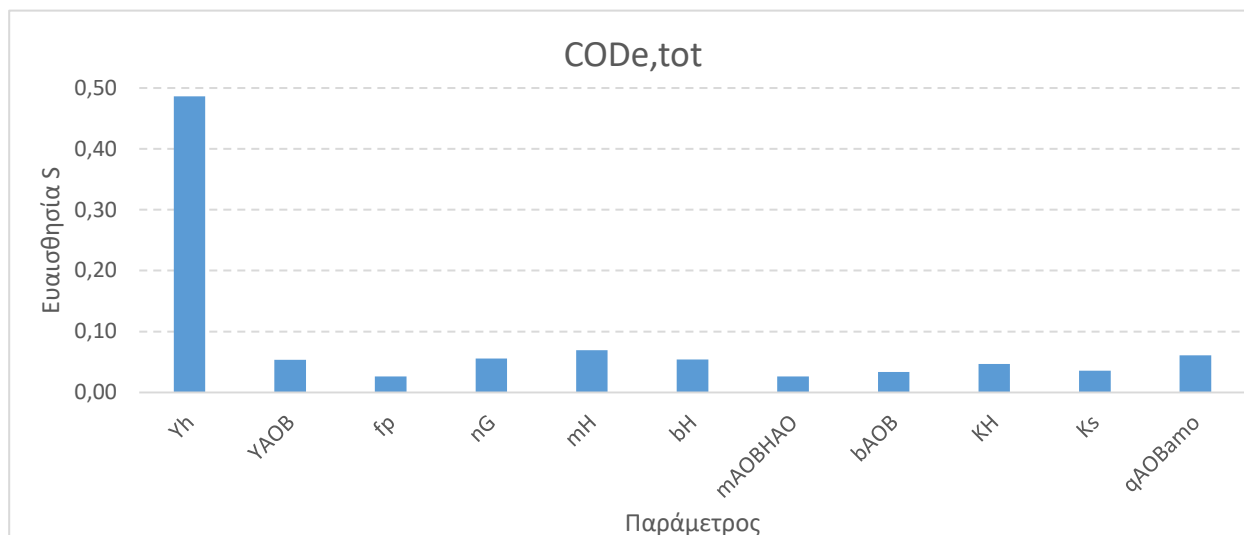
α/α	Μεταβλητή/Δείκτης	Τιμή Αναφοράς	Μονάδα Μέτρησης
1	CODe,tot	48,94041007	mgCOD/l
2	CODe,sol	40,72218305	mgCOD/l
3	TNe	21,39469246	mgN/l
4	SNHe	7,72685555	mgNH ₃ /l
5	w	11705,5452	kg/d
6	SOTR_tot_d	41954,29555	kgO ₂ /d
7	BIOGAS	7097,006059	m ³ /d
8	Total_EN_consumption	19984,3223	kWh/d
9	recov_elec	0,787098317	%
10	recov_therm	2,402775352	%
11	N2O_bioreact_tot	95,2095276	kgN ₂ O/d
12	N2O_tot	102,8415905	kgN ₂ O/d
13	Total_GHG_CO2eq	123466,0626	kgCO ₂ /d
14	kgCO2_kgCOD	3,43285632	kgCO ₂ /kgCOD(day)
15	kgCO2_kgN	92,98832088	kgCO ₂ /kgN(day)
16	kgN2O_kgTNin	0,038760932	kgN ₂ O/kgN(day)
17	kWh_kgCOD	0,555645055	kWh/kgCOD(day)
18	kWh_kgN	15,051169	kWh/kgN(day)
19	EQI	28351,98055	kgPollution/d

4.5.3.2 Στόχος σειράς σεναρίων

Στόχος του σεναρίου της σταθερής φόρτισης με χρόνο παραμονής στερεών $SRT = 4 \text{ d}$ είναι να υπολογιστεί η σχετική ευαισθησία του συστήματος στις 67 στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους, ώστε να αναδειχθούν εκείνες στις οποίες είναι περισσότερο ευαίσθητο, υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, και να υπολογιστεί η επίδραση της αλλαγής τους σε συγκεκριμένες μεταβλητές και δείκτες απόδοσης. Επιπλέον, θα δοθεί η δυνατότητα της σύγκρισης μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την αλλαγή του χρόνου παραμονής στερεών.

4.5.3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για το ολικό COD στην έξοδο της εγκατάστασης τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.21 Ευαισθησία της μεταβλητής COD_{e,tot} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Η παράμετρος στη μεταβολή της οποίας είναι πιο ευαίσθητη η μεταβλητή COD_{e,tot} είναι το Y_h. Ο συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας, ο οποίος καθορίζει το κλάσμα του COD που θα οδηγηθεί σε σύνθεση νέας βιομάζας ως προς την τροφή που καταναλώνεται, επηρεάζει σημαντικά το COD στην έξοδο, καθώς η ποσότητα της βιομάζας επηρεάζει άμεσα τη φυσική διαδικασία της καθίζησης, απόρροια της οποίας είναι η ποιότητα εκροής. Μάλιστα και εδώ παρατηρήθηκε ότι, η μεταβλητή είναι περισσότερο ευαίσθητη στην αύξηση του συντελεστή Y_h καθώς η αυξημένη βιομάζα μεταφράζεται σε αύξηση των MLSS με αποτέλεσμα να φορτίζεται περισσότερο η δεξαμενή καθίζησης και να χάνονται περισσότερα στερεά στην έξοδο. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι συνολικά όλες οι παράμετροι κινήθηκαν χαμηλά σε τιμές σχετικής ευαισθησίας.

Λιγότερο ευαίσθητο παρουσιάζεται το COD_{e,tot} στις μεταβολές του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας m_H, με τη μεταβολή των τιμών του να πραγματοποιείται στην αντίθετη κατεύθυνση από τη μεταβολή της παραμέτρου. Η αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, όπως ήταν αναμενόμενο και σε αυτή την περίπτωση μείωσε το COD στην έξοδο γιατί αυξήθηκε η κατανάλωση οργανικού άνθρακα κατά την ανάπτυξη της βιομάζας.

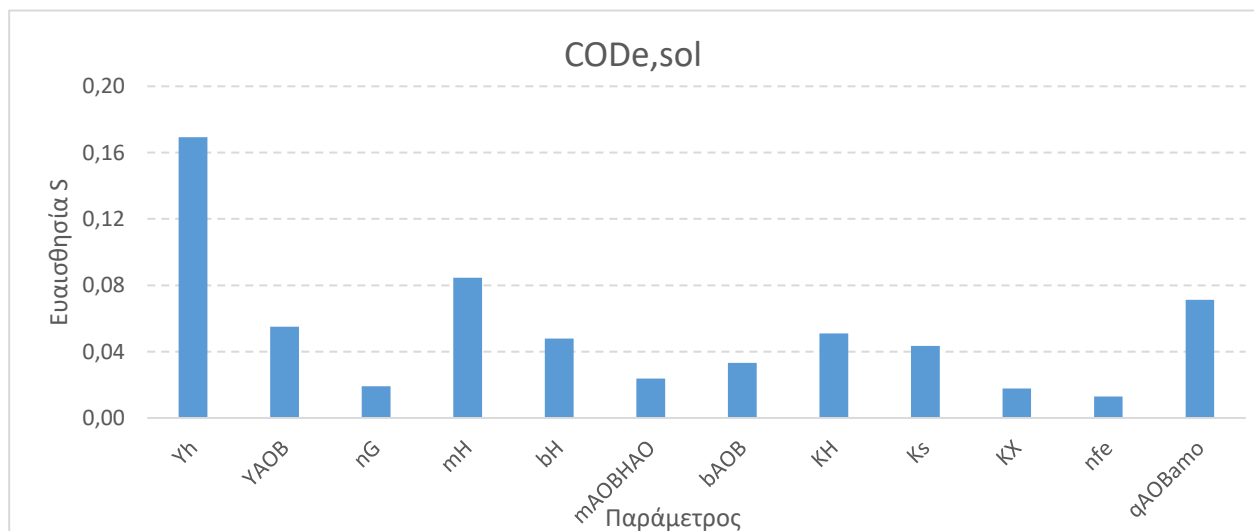
Μικρή σχετική ευαισθησία του COD_{e,tot} παρατηρήθηκε στις μεταβολές του q_{AOBamo}, που είναι ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας NH₃ σε υδροξυλαμίνη NH₂OH. Η συγκεκριμένη διεργασία προηγείται της σύνθεσης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, γεγονός που αποτυπώνεται στη μικρή μεταβολή του ολικού COD εξόδου. Επίσης, καθώς είναι η αρχική οδός της νιτροποίησης επηρεάζει και την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

Αντίστοιχα, το nG που μειώνει το ρυθμό της ανοξικής ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών σε σχέση με την αερόβια ανάπτυξη, επηρεάζει και εδώ, το COD εξόδου λόγω της προτίμησης της ετεροτροφικής βιομάζας στο αερόβιο περιβάλλον και του προϋπάρχοντος χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης σε ανοξικό περιβάλλον.

Μικρή σχετική ευαισθησία παρουσιάζει το COD_{e,tot} σε παραμέτρους που ρυθμίζουν τη σύνθεση και τη φθορά των αυτοτροφικών μικροοργανισμών, όπως είναι οι Y_{ΑΟΒ} και Β_{ΑΟΒ}, καθώς η συγκεκριμένοι μικροοργανισμοί αποτελούν μικρό ποσοστό της συνολικής βιομάζας και ως εκ τούτου μικρή συνεισφορά έχουν και στα στερεά που φεύγουν στην έξοδο.

Τέλος, μικρή σχετική ευαισθησία παρατηρήθηκε και στη μεταβολή του μέγιστου ειδικού ρυθμού υδρόλυσης. Με την αύξηση του ρυθμού μειώθηκε το ολικό COD εξόδου καθώς ο οργανικός άνθρακας ήταν πιο γρήγορα διαθέσιμος για κατανάλωση από τους μικροοργανισμούς.

Για το διαλυτό COD στην έξοδο της εγκατάστασης τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.22.



Σχήμα 4.22 Ευαισθησία της μεταβλητής COD_{e,sol} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

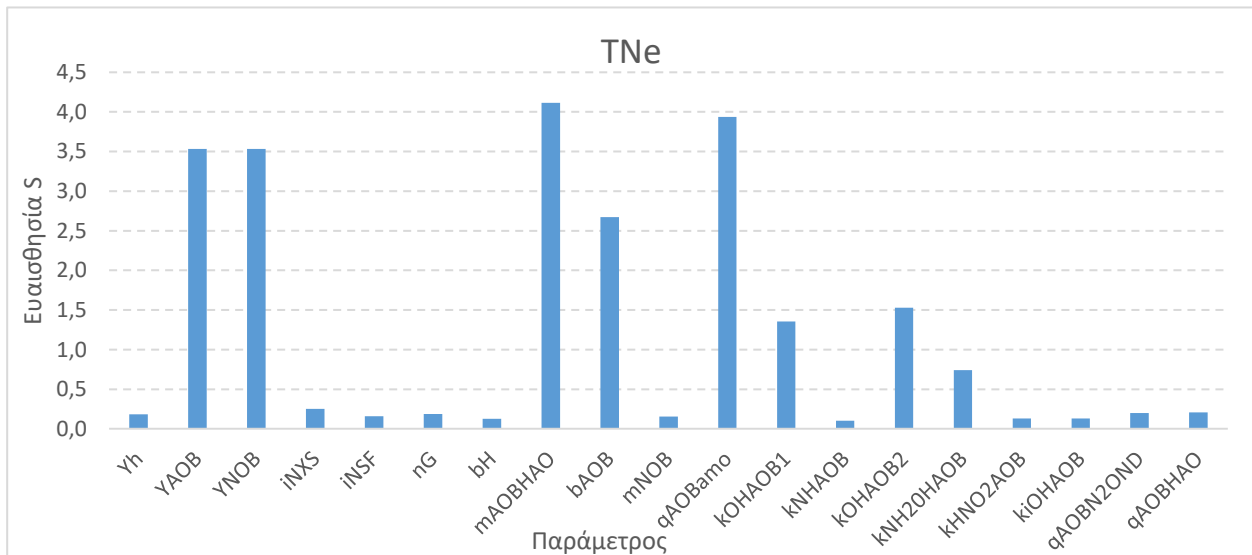
Και για το διαλυτό COD εξόδου η εικόνα που παρουσιάζεται είναι ανάλογη εκείνης για το COD_{e,tot}.

Τη μεγαλύτερη σχετική επιρροή παρουσιάζει ο συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας Y_h καθώς η βιομάζα αναπτύσσεται αλλά μόνο υπό αερόβιες συνθήκες λόγω ατελούς νιτροποίησης, με αποτέλεσμα τη μειωμένη κατανάλωση οργανικού υλικού λόγω έλλειψης απονιτροποίησης.

Το διαλυτό COD εξόδου παρουσιάζει, επίσης, κάποια ευαισθησία στη μεταβολή του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας m_H, καθώς πρόκειται για τους μικροοργανισμούς που επικρατούν στο σύστημα ενεργού ιλύος και κατά συνέπεια η αύξηση του ρυθμού αερόβιας ανάπτυξής τους σημαίνει ότι καταναλώνουν περισσότερη διαλυτή τροφή και μειώνεται το COD_{e,sol}. Παρόλο που για τους λόγους που αναφέρθηκαν αμέσως παραπάνω

η συγκεκριμένη συνεισφορά είναι μειωμένη λόγω μικρού χρόνου παραμονής στερεών στο σύστημα.

Μικρότερη επιρροή από την μη στη μεταβολή του $CODe_{sol}$ παρουσιάζουν οι παράμετροι $qAOB_{amo}$ και Y_{AOB} . Καθώς σχετίζονται με την ανάπτυξη των αυτοτροφικών μικροοργανισμών επηρεάζουν τη νιτροποίηση με αποτέλεσμα να μειώνεται και η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών που είναι ακόμα μια οδός κατανάλωσης διαλυτής τροφής.



Σχήμα 4.23 Ευαισθησία της μεταβλητής TNe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για το ολικό N εξόδου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.23 και είναι πλήρως διαφοροποιημένα από εκείνα του συστήματος που λειτουργεί με μεγάλο χρόνο παραμονής.

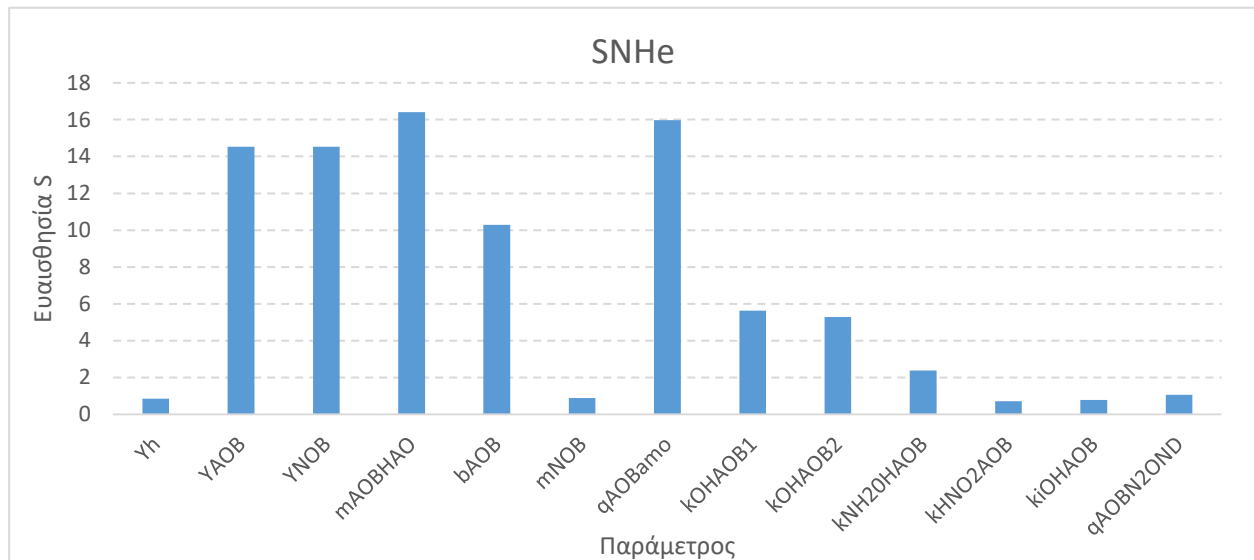
Τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζει το TNe στο mAOBHAO που είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των αυτοτροφικών βακτηρίων. Με $SRT = 4,5$ ημέρες, ο χρόνος δεν επαρκεί για την ανάπτυξη των AOB, επομένως η αύξηση του ειδικού ρυθμού ανάπτυξής τους αυτομάτως ενεργοποιεί την νιτροποίηση που είχε ανασταλεί, άρα και τις οδούς απονιτροποίησης, και μειώνει σημαντικά το ολικό άζωτο στην έξοδο, κυρίως λόγω της μείωσης του αμμωνιακού αζώτου.

Στην ίδια κατεύθυνση και η αύξηση του $qAOB_{amo}$, δηλαδή του μέγιστου ειδικού ρυθμού οξειδωσης της αμμωνίας NH_3 σε υδροξυλαμίνη NH_2OH , οδηγεί σε μείωση του διαθέσιμου αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο, άρα και του TNe.

Αντίστοιχα υψηλή σχετική ευαισθησία παρουσιάζει το TNe στους συντελεστές απόδοσης αυτοτροφικών και νιτροποιητών Y_{AOB} και Y_{NOB} . Η μείωση των συντελεστών σε ένα επιβαρυμένο σύστημα που δεν οξειδώνεται το αμμωνιακό άζωτο επιφέρει μεγάλη αύξηση στο TNe λόγω αύξησης του αμμωνιακού αζώτου στη έξοδο.

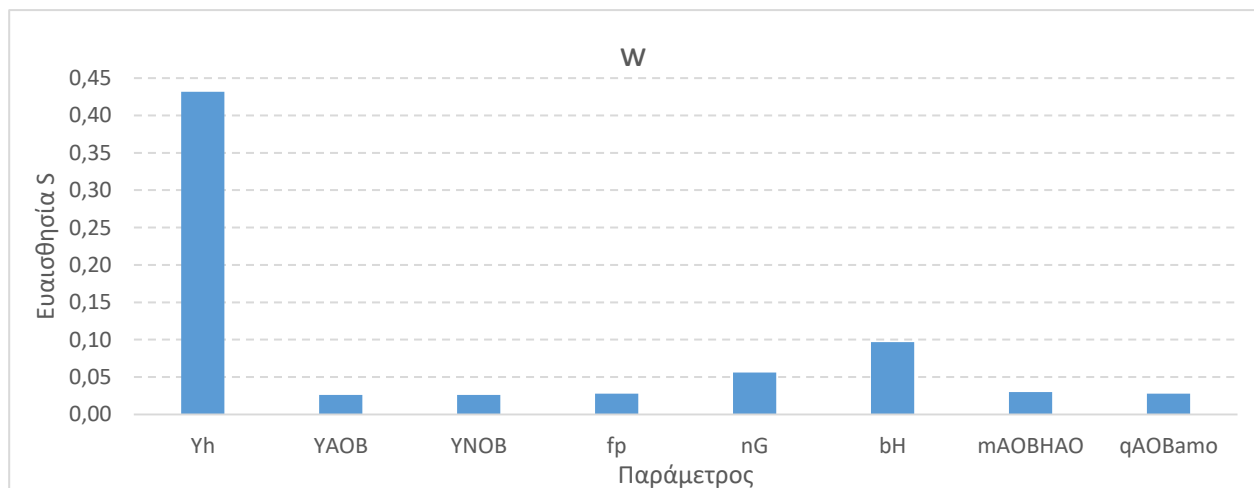
Ακολουθεί σε σχετική ευαισθησία ο ρυθμός φθοράς των AOB. Η μείωση του bAOB έχει θετική επίδραση στο σύστημα γιατί οι αυτοτροφικοί παραμένουν περισσότερο στην ενεργό ιλύ συμβάλλοντας στη νιτροποίηση και μειώνοντας το αμμωνιακό άζωτο στην έξοδο και συνεπώς το TNe.

Για το SNHe τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.24 και είναι πανομοιότυπα με τα αποτελέσματα για το TNe καθώς η έξοδος επιβαρύνεται από την έλλειψη νιτροποίησης για την οποία ευθύνεται ο μικρός χρόνος παραμονής στερεών. Επομένως όσα αναφέρθηκαν για το TNe ισχύουν για το SNHe.



Σχήμα 4.24 Ευαισθησία της μεταβλητής SNHe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για την περίσσεια ιλύος w , τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.25.



Σχήμα 4.25 Ευαισθησία της μεταβλητής W στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Η μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζεται, όπως αναμενόταν, για το συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας. Πρόκειται για το συντελεστή που ρυθμίζει την αναλογία μικροοργανισμών που συντίθενται προς το COD που καταναλώνεται και κατά συνέπεια, η μεταβολή του Y_h παρασύρει προς την ίδια κατεύθυνση την παραγωγή της βιομάζας που κυριαρχεί στο σύστημα ενεργού ιλύος, γεγονός που μεταφράζεται σε μεταβολή των MLSS και τελικά της περίσσειας που απομακρύνεται από το σύστημα.

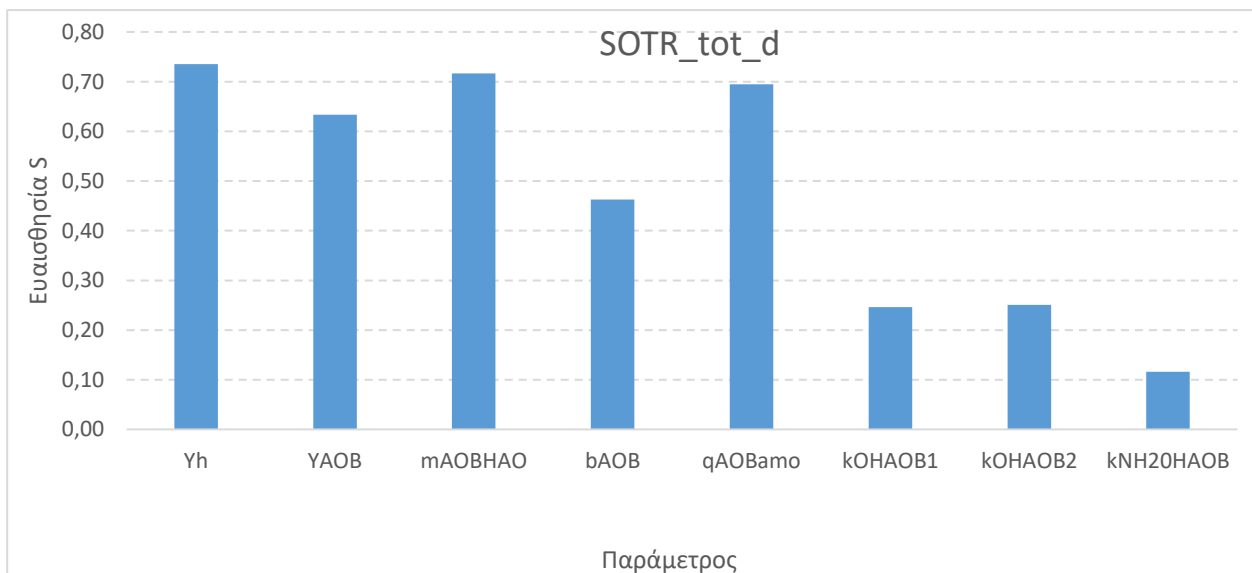
Μικρή σχετική ευαισθησία αποδεικνύεται ότι παρουσιάζει το w και στον ειδικό ρυθμό αποσύνθεσης ετεροτροφικής βιομάζας. Δηλαδή η αύξηση του ρυθμού αποσύνθεσης συνδέεται με μείωση της περίσσειας ιλύος που απομακρύνεται από το σύστημα.

Μικρότερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζεται για το μειωτικό συντελεστή που ρυθμίζει την ανάπτυξη των ετεροτροφικών σε ανοξικό περιβάλλον κατ' αντιστοιχία με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αλλά που λαμβάνουν χώρα σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο, με παρουσία νιτρικών και με μικρότερες ταχύτητες. Να επισημανθεί ότι υπό αυτές τις συνθήκες μικρής παραμονής στερεών στο σύστημα, η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών είναι ήδη πολύ περιορισμένη.

Ακολουθούν ο συντελεστής απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας, Y_{aob} , ο μέγιστος ειδικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη $q_{aob}m_0$ και ο μέγιστος ειδικός ρυθμός οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου $q_{aob}h_0$. Όλες οι παράμετροι συνδέονται με την ανάπτυξη των AOB, η αύξησή τους ενεργοποιεί στάδια της νιτροποίησης και επιφέρουν αύξηση της αυτοτροφικής βιομάζας από την οξείδωσης της NH_2OH σε NO και της ετεροτροφικής σε ανοξικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα την περιορισμένη αύξηση της περίσσειας.

Ακολουθεί σε σχετική ευαισθησία το f_r που αποτελεί το κλάσμα αδρανών σωματιδιακών προϊόντων από τη λύση της βιομάζας. Είναι φανερό ότι η μεταβολή της παραμέτρου αυτής έχει παρασύρει σε ίδιας κατεύθυνσης μεταβολή την περίσσεια ιλύος, καθώς εκεί καταλήγουν τα μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα της φθοράς των μικροοργανισμών.

Για την $SOTR_{tot_d}$ τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.26.



Σχήμα 4.26 Ευαισθησία της μεταβλητής $SOTR_{tot_d}$ στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Η μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζεται για τον συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας Y_h καθώς η μείωση του συντελεστή μεταφράζεται σε μειωμένη σύνθεση βιομάζας σε σχέση με το COD που καταναλώνεται, το οποίο οξειδώνεται περισσότερο προς CO_2 με συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης οξυγόνου.

Σημαντική ευαισθησία παρουσιάζεται για το μέγιστο ειδικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, $\alpha\text{OBa}\mu\text{o}$, και το μέγιστο ειδικό ρυθμό οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε μονοξειδίο του αζώτου, $\mu\alpha\text{OB}\eta\alpha\text{o}$, καθώς οι διεργασίες της νιτροποίησης δεν πραγματοποιείται με αποτέλεσμα η αύξηση του ρυθμού των διεργασιών αυτών να αυξάνει την κατανάλωση οξυγόνου του συστήματος καθώς πρόκειται για οξειδώσεις.

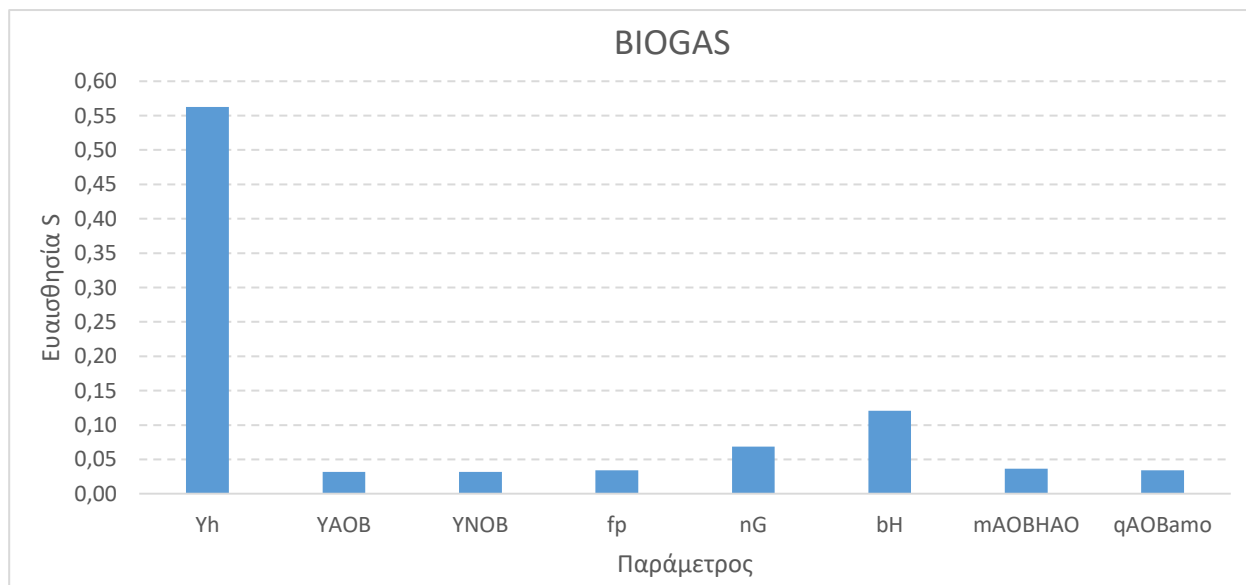
Αντίστοιχα η αύξηση του συντελεστή απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας $\Upsilon\alpha\text{o}\beta$ επηρεάζει αρκετά την κατανάλωση O_2 καθώς η αύξηση του συντελεστή συνδέεται με αύξηση της βιομάζας η οποία προκύπτει από διεργασία οξείδωσης, δηλαδή κατανάλωσης O_2 .

Επίσης ο ρυθμός φθοράς βAOB επηρεάζει την κατανάλωση O_2 σύμφωνα με τη λογική που αναπτύχθηκε αμέσως παραπάνω.

Ακολουθεί ο ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης ετεροτροφικής βιομάζας σε σχετική ευαισθησία, καθώς η φθορά της ετεροτροφικής βιομάζας συνδέεται με κατανάλωση οξυγόνου στη φάση της ενδογενούς αναπνοής.

Τέλος, οι συντελεστές ημικορεσμού για το O_2 στις αντιδράσεις της οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, της υδροξυλαμίνης σε μονοξειδίο του αζώτου και του μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη, επηρεάζουν την κατανάλωση O_2 . Η μείωση των συντελεστών αύξησε την ταχύτητα των αντιδράσεων, άρα και την κατανάλωση O_2 και το αντίστροφο.

Για την μεταβλητή BIOGAS τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.27.



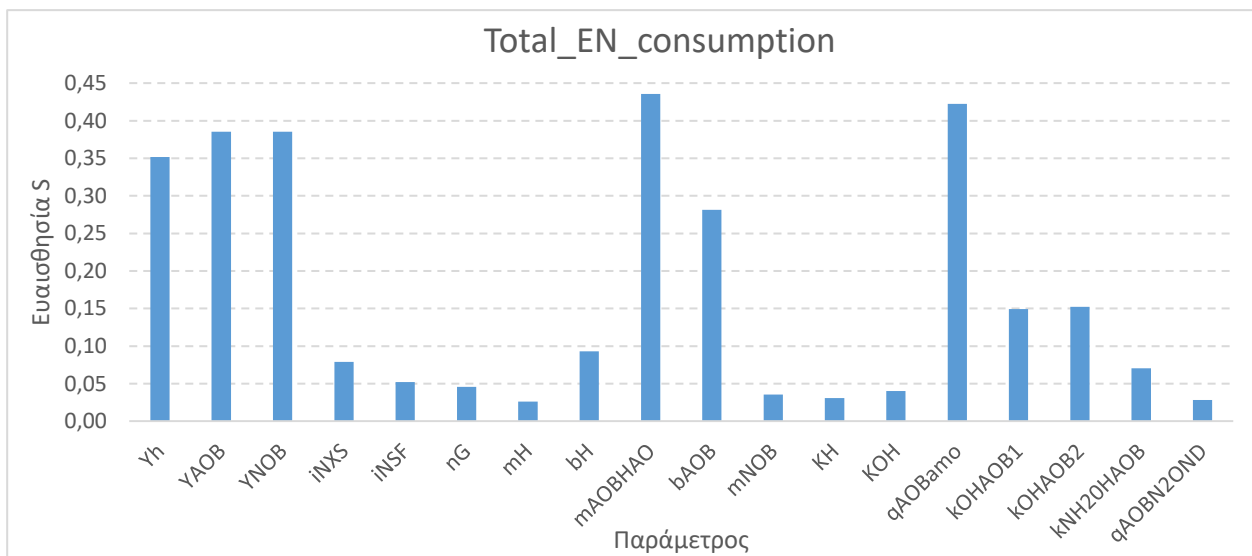
Σχήμα 4.27 Ευαισθησία της μεταβλητής BIOGAS στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Και στην περίπτωση του βιοαερίου, στον συντελεστή $\Upsilon\eta$ παρουσιάζεται η μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία καθώς η ανάπτυξη περισσότερης βιομάζας συνδέεται άμεσα με την παραγωγή περισσότερου βιοαερίου στο χωνευτή.

Μικρότερη σχετική ευαισθησία παρουσιάζει και στο ρυθμό αποσύνθεσης ετεροτροφικών μικροοργανισμών, bH, καθώς η φθορά της βιομάζας συνδέεται με μείωση του οργανικού υλικού διαθέσιμου για χώνευση και παραγωγή βιοαερίου.

Ακολουθεί σε σχετική ευαισθησία ο διορθωτικός συντελεστής ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών nG, καθώς και στην περίπτωση αυτή πρόκειται για σύνθεση βιομάζας που μεταφράζεται σε οργανικό υλικό για χώνευση προς παραγωγή βιοαερίου.

Για την μεταβλητή Total_EN_consumption τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.28.

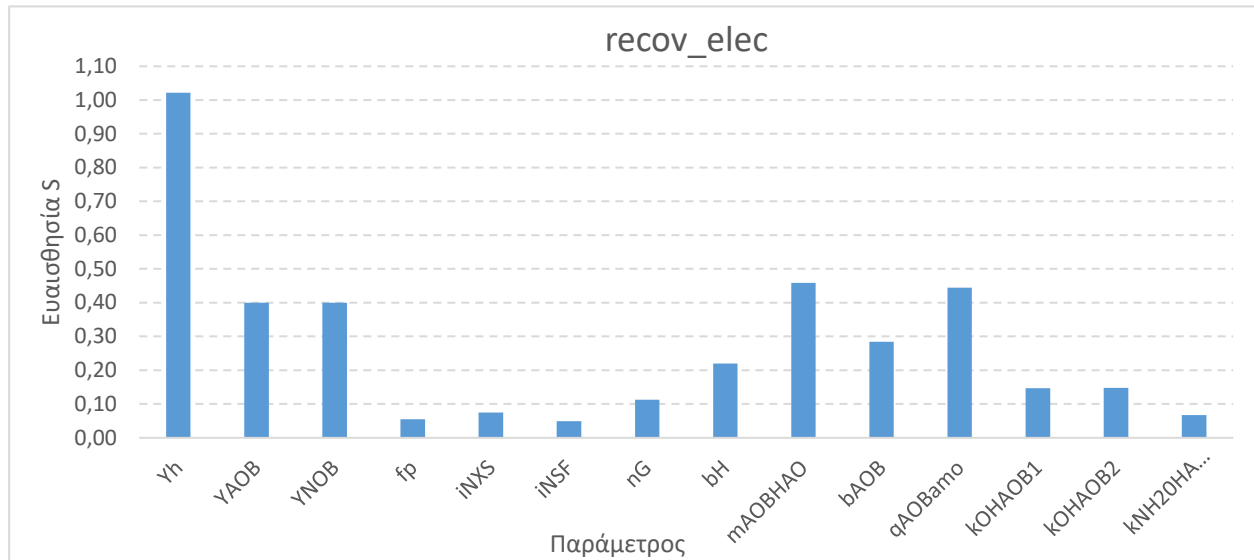


Σχήμα 4.28 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_EN_consumption στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία στις παραμέτρους που συνδέονται με την οξείδωση της NH₂OH σε NO, maObhao, και της NH₂ σε NH₂OH, qaObamo, καθώς οι μεταβολές των ειδικών ρυθμών σχετίζονται με κατανάλωση O₂ που συνδέεται με την ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος αερισμού. Αντίστοιχα οι συντελεστές απόδοσης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών και της ετεροτροφικής βιομάζας, YaOb και Yh, σχετίζονται με μεταβολές στις ενεργειακές καταναλώσεις καθώς η μείωση του Yh αφήνει διαθέσιμο περισσότερο οργανικό C για οξείδωση, άρα αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος αερισμού, ενώ η μείωση του YaOb έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης λόγω μείωσης της οξείδωσης αζωτούχων συστατικών και επιλογής διαφορετικών βιοχημικών οδών απομάκρυνσης αζώτου, όπως η αναγωγή NO και NO₂ σε N₂O.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28, οι παράμετροι στις οποίες εμφανίζει τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία η μεταβλητή της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης της ΕΕΛ είναι εκείνες στις οποίες παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία και η μεταβλητή της συνολικής κατανάλωσης οξυγόνου, καθώς το σύστημα αερισμού του συστήματος ενεργού λύου αποτελεί το πιο ενεργοβόρο υποσύστημα της ΕΕΛ.

Για την μεταβλητή `recov_elec` τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.29.



Σχήμα 4.29 Ευαισθησία της μεταβλητής `recov_elec` στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Όπως ήταν αναμενόμενο και εδώ ο συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας `Yh` επηρεάζει περισσότερο από όλες τις άλλες παραμέτρους την μεταβλητή ενδιαφέροντος. Η μείωση του συντελεστή επιφέρει μείωση της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η μείωση της βιομάζας που συντίθεται οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή βιοαερίου που οδηγείται στη μονάδα συμπαραγωγής και αυξάνονται οι ανάγκες ενεργειακής κατανάλωσης λόγω χρήσης του συστήματος αερισμού για τις ανάγκες οξειδωσης του οργανικού άνθρακα.

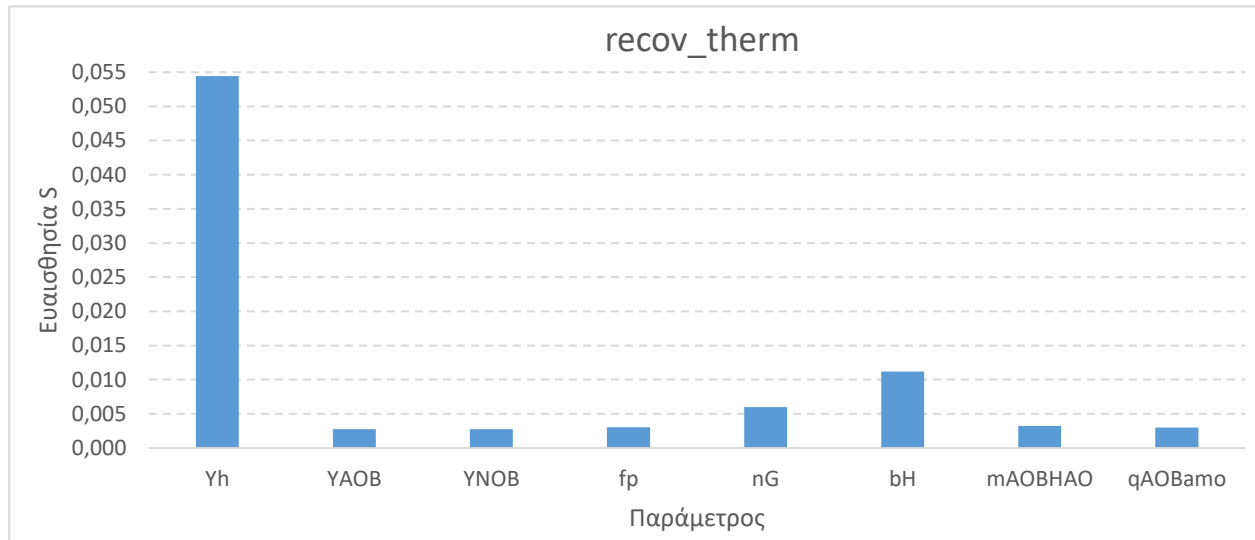
Και σε αυτή την περίπτωση οι παράμετροι `mAOBHAO`, `qAOBamo` και `YAOb` συνδέονται με την ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια λόγω των μεταβολών που επιφέρουν στην ενεργειακή κατανάλωση και που αναπτύχθηκαν για το προηγούμενο σχήμα.

Οι παράμετροι φθοράς `bAOB` των αυτοτροφικών, `bH` των ετεροτροφικών και `nG`, ανοξικής ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών επηρεάζουν την ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια καθώς μεταβάλλουν την ποσότητα της βιομάζας με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται, αντίστοιχα, το οργανικό περιεχόμενο της ιλύος που οδηγείται στον αναερόβιο χωνευτή για παραγωγή βιοαερίου και, κατά συνέπεια η ενέργεια που ανακτάται σε σχέση με εκείνη που καταναλώνεται από τις διεργασίες οξειδωσης. Κάθε διεργασία που αυξάνει τη βιομάζα έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω αύξησης βιοαερίου και λόγω μείωσης της ενέργειας που καταναλώνεται από το σύστημα αερισμού.

Για την μεταβλητή `recov_therm` τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.30.

Και σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας `Yh` επηρεάζει περισσότερο από όλες τις άλλες παραμέτρους την μεταβλητή ενδιαφέροντος. Η μείωση του συντελεστή επιφέρει μείωση της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας, καθώς η μείωση της βιομάζας που συντίθεται οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή βιοαερίου που οδηγείται στη μονάδα

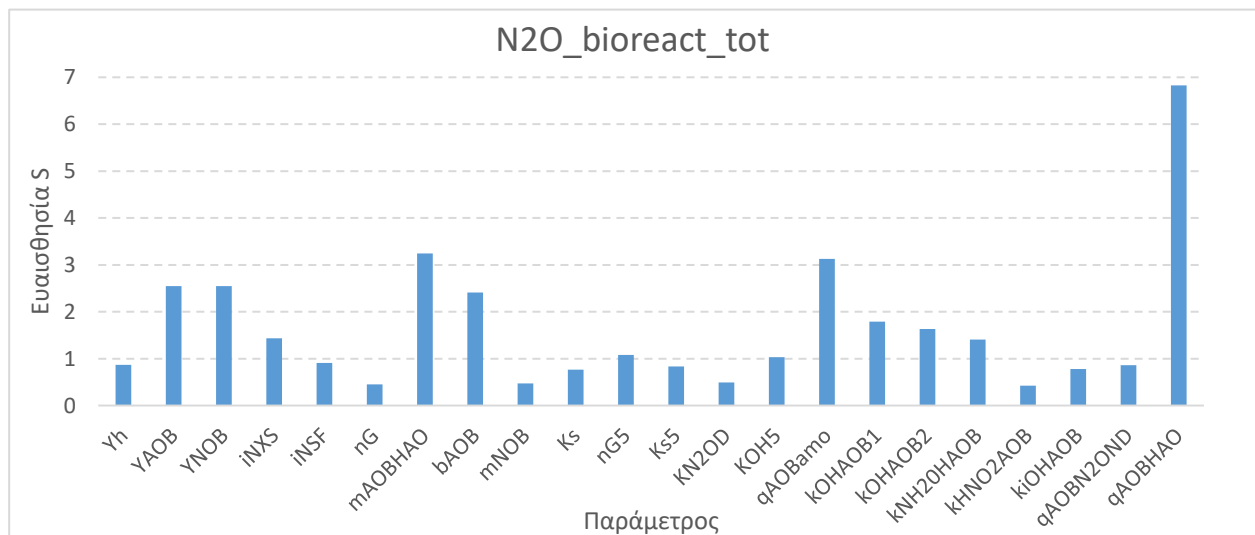
συμπαράγωγής και αυξάνονται οι ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης της ιλύος στον αναερόβιο χωνευτή.



Σχήμα 4.30 Ευαισθησία της μεταβλητής recov_therm στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Κατ' αντιστοιχία ο ρυθμός φθοράς των ετεροτροφικών μικροοργανισμών bH επηρεάζει την ανακτώμενη θερμική ενέργεια μεταβάλλοντας προς την αντίθετη κατεύθυνση την ποσότητα της ετεροτροφικής βιομάζας.

Για την μεταβλητή N2O_bioreact_tot τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.31.

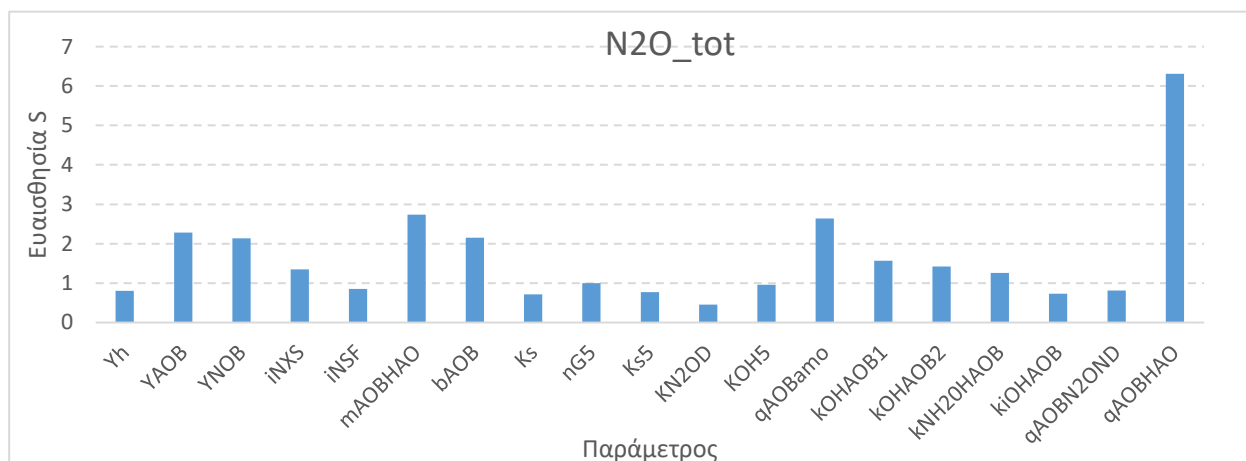


Σχήμα 4.31 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O_bioreact_tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Φαίνεται πως παραγωγή N2O στο βιοαντιδραστήρα παρουσιάζει αυξημένη σχετική ευαισθησία στο μέγιστο ειδικό ρυθμό οξείδωσης του μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη, qAOBHАО. Η μείωση του ρυθμού οξείδωσης του NO σε NO2 οδηγεί σε αναγωγή του NO σε N2O κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών.

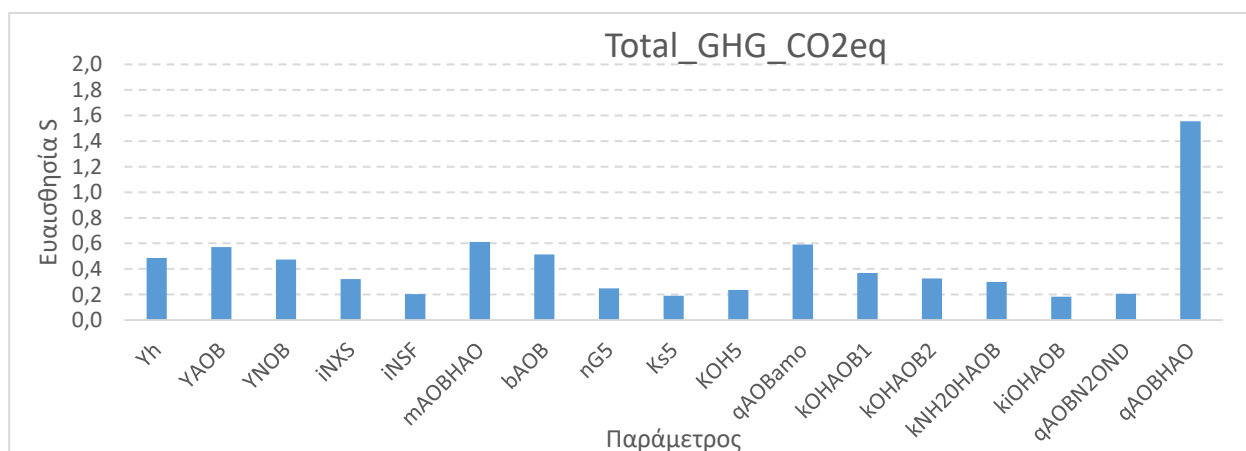
Και σε αυτή την περίπτωση οι παράμετροι μ_{aobhao} , q_{aobhao} και Y_{aob} συνδέονται με την παραγωγή N_2O στο βιοαντιδραστήρα, ειδικά οι δύο πρώτοι, καθώς είναι οι προαπαιτούμενες διεργασίες για παραγωγή N_2O είτε μέσω χημικής διάσπασης, είτε μέσω νιτροποίησης και απονιτροποίησης νιτροποιητών. Η μείωση του ειδικού ρυθμού μειώνει την παραγωγή N_2O στο βιοαντιδραστήρα.

Για την μεταβλητή N_2O_{tot} τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.32.

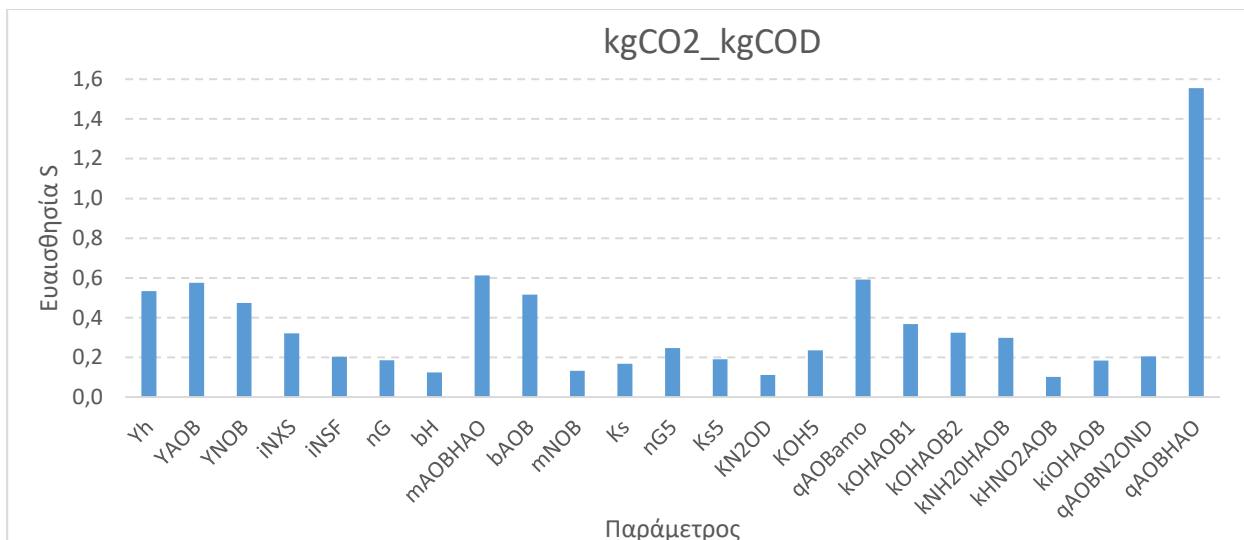


Σχήμα 4.32 Ευαισθησία της μεταβλητής N_2O_{tot} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Η ανάλυση ευαισθησίας για τη μεταβλητή N_2O_{tot} ανέδειξε τις ίδιες παραμέτρους που παρουσιάστηκαν για τη μεταβλητή $N_2O_{bioreact_tot}$, καθώς η κύρια παραγωγή υποξειδίου του αζώτου στην ΕΕΛ λαμβάνει χώρα στο βιοαντιδραστήρα. Κατ' αναλογία ίδια εικόνα παρουσιάζει και η ανάλυση ευαισθησίας για τις μεταβλητές $Total_GHG_CO_2eq$, $kgCO_2_kgCOD$ και kgN_2O_kgTNin , όπως φαίνεται στα σχήματα 4.33, 4.34, 4.36, καθώς η μεγάλη αύξηση της παραγωγής N_2O λόγω μείωσης του q_{aobhao} μεταφράζεται σε άνοδο των αντίστοιχων αριθμητών των κλασμάτων. Η σχετική ευαισθησία εμφανίζεται μικρότερη στην περίπτωση του $Total_GHG_CO_2eq$ λόγω του ότι δεν συνεισφέρει μόνο το N_2O στη συγκεκριμένη μεταβλητή.



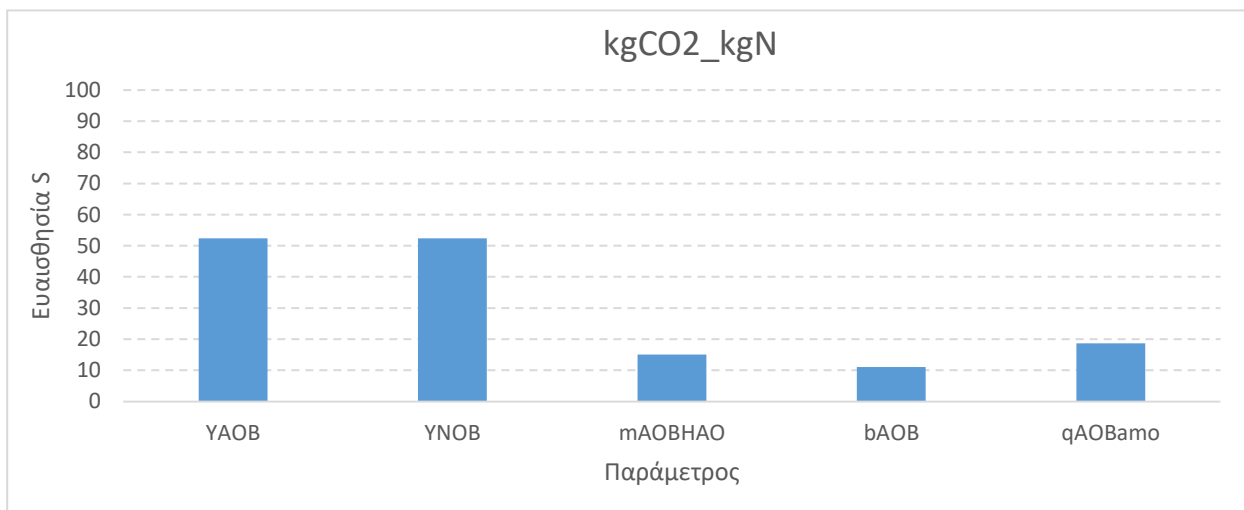
Σχήμα 4.33 Ευαισθησία της μεταβλητής $Total_GHG_CO_2eq$ στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.



Σχήμα 4.34 Ευαισθησία του δείκτη Total_GHG_CO2eq στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για το δείκτη kgCO2_kgN τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.35.

Οι συντελεστές απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας και νιτροποιητών, Y_{aoB} και Y_{noB}, είναι οι παράμετροι για τις οποίες η μεταβλητή εμφανίζει τη μεγαλύτερη σχετική ευαισθησία. Η μείωση του συντελεστή Y_{aoB} συνεπάγεται αύξηση του CO₂ που καταναλώνεται στην αντίδραση οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε οξείδιο του αζώτου κατά τη σύνθεση των AOB.



Σχήμα 4.35 Ευαισθησία του δείκτη kgCO2_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το δείκτη kgN₂O_kgTN_{in} παρουσιάζονται στο σχήμα 4.36.

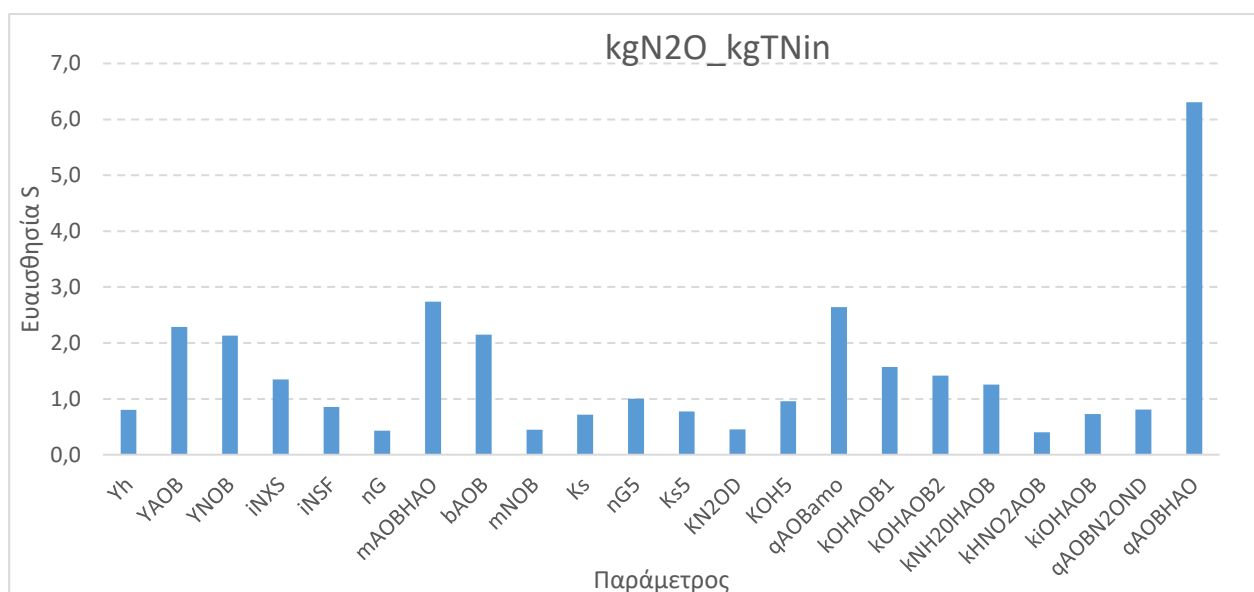
Ως σημαντικότερη παράμετρος αναδεικνύεται ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης του μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδες, qAOB_{hao}, και ειδικά η μείωση του ρυθμού της αντίδρασης έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην παραγωγή N₂O. Η συσσώρευση NO στον αντιδραστήρα κατευθύνει

το σύστημα στην παραγωγή N₂O μέσω αναγωγής του NO κατά τη διεργασία της νιτροποίησης των νιτροποιητών.

Επίσης σημαντική σχετική ευαισθησία παρουσιάζεται για το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης των αυτοτροφικών μικροοργανισμών κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου, mAOBhao, και κατά την οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, qAOBamo, που αποτελούν τα προηγούμενα στάδια της διεργασίας οξείδωσης της αμμωνίας NH₃ έως την παραγωγή νιτρωδών NO₂. Και σε αυτή την περίπτωση η μείωση των παραμέτρων επιφέρει τη μεταβολή του εξεταζόμενου δείκτη. Συγκεκριμένα, οι διεργασίες αναστέλλονται και συσσωρεύεται αμμωνία στο σύστημα με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται η παραγωγή N₂O.

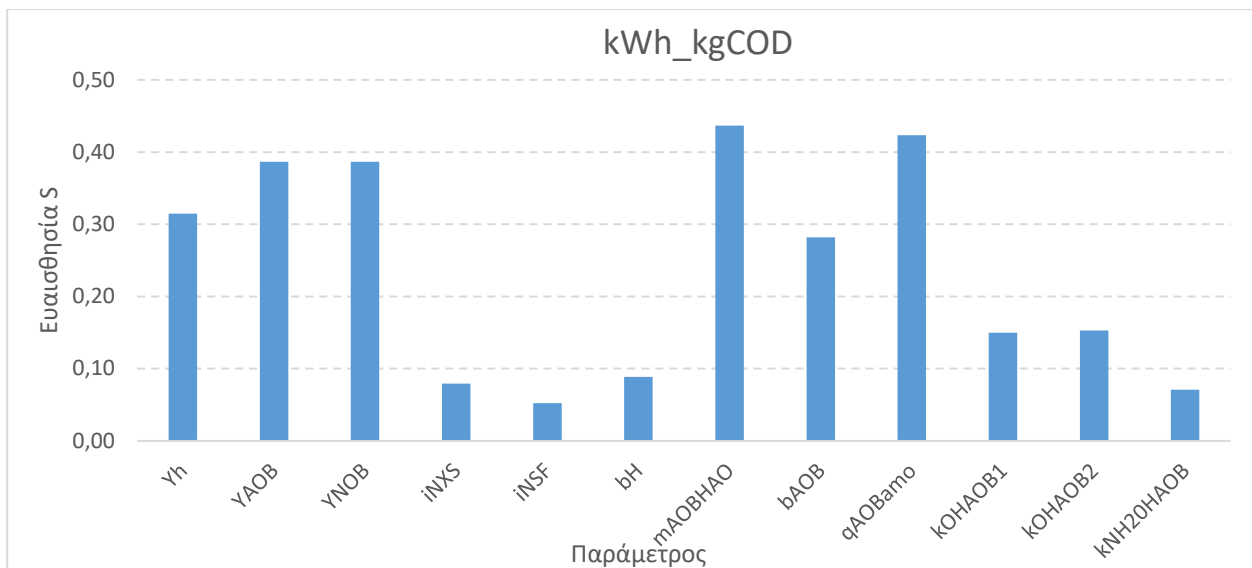
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το δείκτη kWh_kgCOD παρουσιάζονται στο σχήμα 4.37.

Ο δείκτης εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία για το μέγιστο ειδικό ρυθμό οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου και αμέσως μετά για το μέγιστο ειδικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη. Οι συγκεκριμένες διεργασίες απαιτούν την κατανάλωση ενέργειας για το σύστημα αερισμού καθώς λαμβάνουν χώρα σε αερόβιες συνθήκες και η αναστολή τους μειώνει την κατανάλωση ενέργειας ως προς τον οργανικό άνθρακα που απομακρύνεται.



Σχήμα 4.36 Ευαισθησία του δείκτη kgN₂O_kgTNin στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

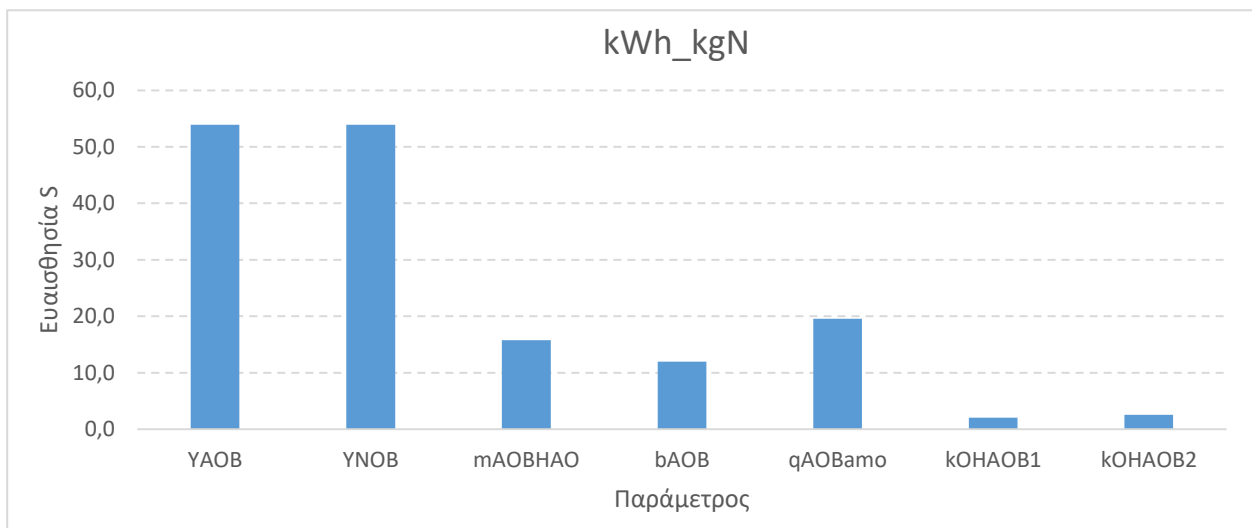
Επίσης ο δείκτης κατανάλωσης ενέργειας ως προς το COD που απομακρύνεται παρουσιάζει σχετική ευαισθησία ως προς τους συντελεστές απόδοσης της ετεροτροφικής και αυτοτροφικής βιομάζας και λιγότερο προς το ρυθμό φθοράς της αυτοτροφικής βιομάζας. Η μείωση του συντελεστή απόδοσης της αυτοτροφικής βιομάζας συνδέεται με αύξηση της ενέργειας που καταναλώνεται η οποία αποδίδεται στον αερισμό για την οξείδωση του οργανικού C, ενώ στην περίπτωση της αυτοτροφικής βιομάζας μειώνεται η διεργασία της οξείδωσης υδροξυλαμίνης κατά την οποία συντίθενται οι AOB και κατά συνέπεια μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας για τον αερισμό του συστήματος.



Σχήμα 4.37 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το δείκτη kWh_kgN παρουσιάζονται στο σχήμα 4.38.

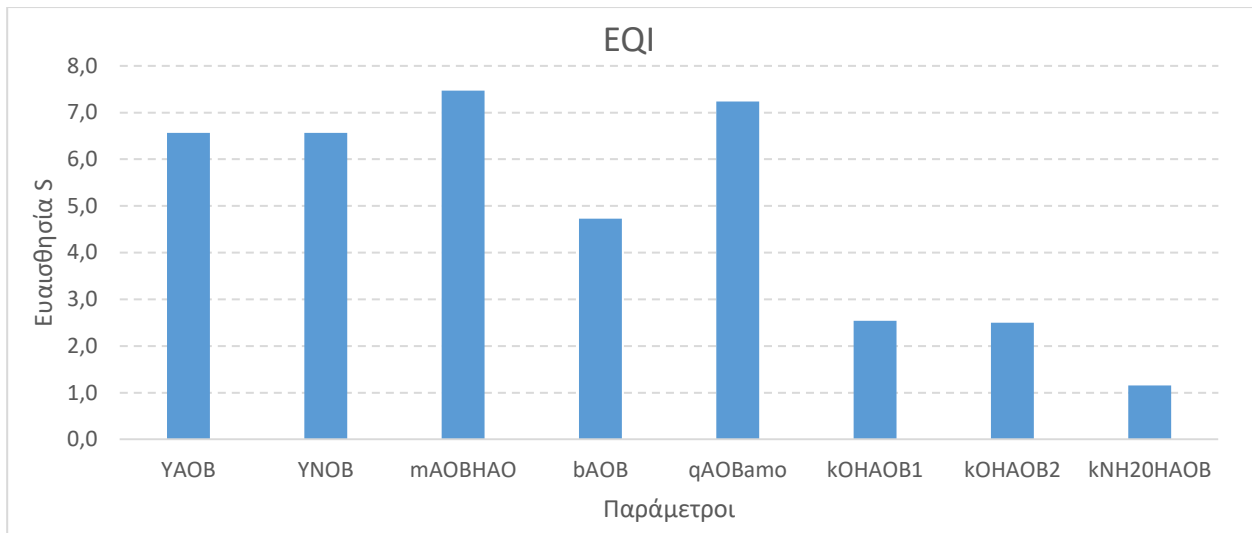
Λόγω της οξείδωσης της υδροξυλαμίνης, κατά την οποία συντίθενται οι ΑΟΒ, η μείωση του συντελεστή απόδοσης Y_{aob} συνδέεται με τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης προς το N που απομακρύνεται από το σύστημα.



Σχήμα 4.38 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Σε μικρότερο βαθμό συνεισφέρει ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, που με τη μείωσή του μειώνεται, επίσης, η ενεργειακή κατανάλωση από το σύστημα αερισμού που απαιτείται για τη διεργασία της οξείδωσης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το δείκτη ποιότητας EQI παρουσιάζονται στο σχήμα 4.39.



Σχήμα 4.39 Ευαισθησία του δείκτη EQI στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, qAOBamo, και της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου, mAObhao, κατά την ανάπτυξη των αυτοτροφικών μεταβάλλουν σημαντικά το δείκτη EQI λόγω μεγάλης επιδείνωσης της ποιότητας εκροής από την ατελή νιτροποίηση που έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία σημαντικής συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης.

Ανάλογη επίδραση έχει και ο συντελεστής απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας, Yaob, η μείωση του οποίου επιφέρει λιγότερους AOB στο, ήδη επιβαρυνμένο με ατελή νιτροποίηση, σύστημα με αποτέλεσμα την επιδείνωση της ποιότητας εκροής από την παρουσία υψηλής συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου. Στην πραγματικότητα η νιτροποίηση σε αυτές τις συνθήκες αναστέλλεται πλήρως και το σύνολο της αμμωνίας φεύγει την έξοδο. Αντίστοιχο είναι το αποτέλεσμα που επιφέρει η παράμετρος Baob με την αύξηση της φθοράς των AOB. Επομένως, η επιδείνωση της εκροής αποτυπώνεται στο δείκτη EQI.

4.5.4 3^η σειρά σεναρίων: Δυναμική φόρτιση με SRT=10d

4.5.4.1 Δεδομένα προσομοίωσης

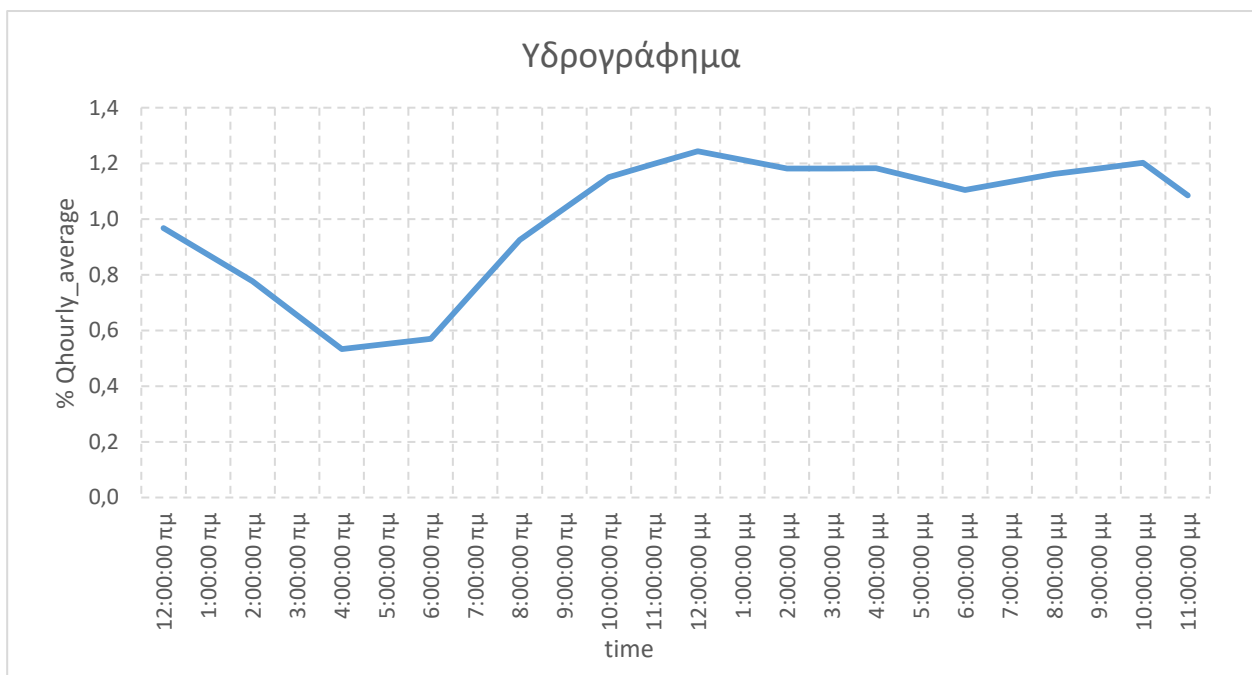
Στην 3^η σειρά σεναρίων η εγκατάσταση δέχεται μεταβαλλόμενη ημερήσια παροχή η οποία κατανέμεται στις ώρες της ημέρας σύμφωνα με υδρογράφημα το οποίο δίνει, για κάθε ώρα, ένα ποσοστό της μέσης ωριαίας παροχής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.7. Το υδρογράφημα και η παροχή εισόδου που προκύπτει από αυτό παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.40 και 4.41 αντίστοιχα.

Ο χρόνος παραμονής στερεών είναι SRT = 10 d και οι τιμές αναφοράς με τις οποίες θα συγκριθούν τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων της σειράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

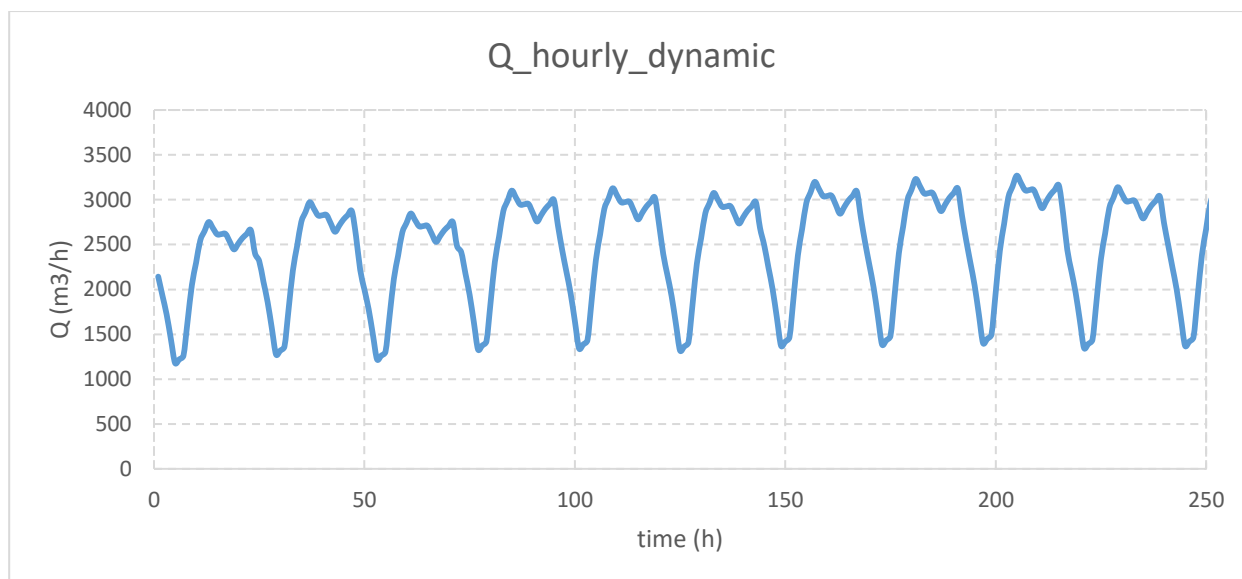
Πίνακας 4.7 Υδρογράφημα παροχής εισόδου σεναρίων δυναμικής φόρτισης.

Ωρα	% Q_hourly_average
-----	--------------------

12:00:00 π.μ.	0,968
1:00:00 π.μ.	0,873
2:00:00 π.μ.	0,777
3:00:00 π.μ.	0,655
4:00:00 π.μ.	0,533
5:00:00 π.μ.	0,552
6:00:00 π.μ.	0,570
7:00:00 π.μ.	0,748
8:00:00 π.μ.	0,925
9:00:00 π.μ.	1,038
10:00:00 π.μ.	1,151
11:00:00 π.μ.	1,197
12:00:00 μ.μ.	1,243
1:00:00 μ.μ.	1,212
2:00:00 μ.μ.	1,181
3:00:00 μ.μ.	1,182
4:00:00 μ.μ.	1,183
5:00:00 μ.μ.	1,144
6:00:00 μ.μ.	1,105
7:00:00 μ.μ.	1,134
8:00:00 μ.μ.	1,162
9:00:00 μ.μ.	1,182
10:00:00 μ.μ.	1,202
11:00:00 μ.μ.	1,085



Σχήμα 4.40 Υδρογράφημα παροχής εισόδου σεναρίων δυναμικής φόρτισης.



Σχήμα 4.41 Μεταβαλλόμενη παροχή εισόδου σεναρίων δυναμικής φόρτισης.

Πίνακας 4.8: Τιμές αναφοράς σεναρίου δυναμικής φόρτισης για SRT=10.

α/α	Μεταβλητή/Δείκτης	Τιμή Αναφοράς			Μονάδα Μέτρησης
		4:00	9:00	12:00	
1	CODe,tot	45,33517297	58,65158858	64,99348	mgCOD/l
2	CODe,sol	40,4170217	42,70998855	42,90231	mgCOD/l
3	TNe	15,88985285	14,57684143	11,58888	mgN/l
4	SNHe	0,047941488	0,032624254	0,027991	mgNH ₃ /l
5	w	331,9766209	450,494922	461,8208	kg/d
6	SOTR_tot_d	1764,808003	2064,796875	2191,491	kgO ₂ /d
7	BIOGAS	192,3828187	278,1820678	303,4007	m ³ /d
8	Total_EN_consumption	789,8073969	908,417401	957,497	kWh/d
9	recov_elec	0,597713145	0,639956468	0,688309	%
10	recov_therm	2,296166868	2,407802627	2,515312	%
11	N2O_bioreact_tot	2,169139743	3,82248742	3,208616	kgN ₂ O/d
12	N2O_tot	2,297487715	4,058190124	3,428286	kgN ₂ O/d
13	Total_GHG_CO2eq	3121,008118	4713,81973	4710,061	kgCO ₂ /d
14	kgCO2_kgCOD	3,978788466	3,143004674	2,658599	kgCO ₂ /kgCOD(day)
15	kgCO2_kgN	83,08709871	65,48043831	48,36705	kgCO ₂ /kgN(day)
16	kgN2O_kgTNin	0,03854741	0,032624343	0,026174	kgN ₂ O/kgN(day)
17	kWh_kgCOD	1,006726229	0,605607411	0,540374	kWh/kgCOD(day)
18	kWh_kgN	21,02297276	12,61704733	9,830859	kWh/kgN(day)
19	EQI	307,6330126	717,153582	852,6526	kgPollution/d

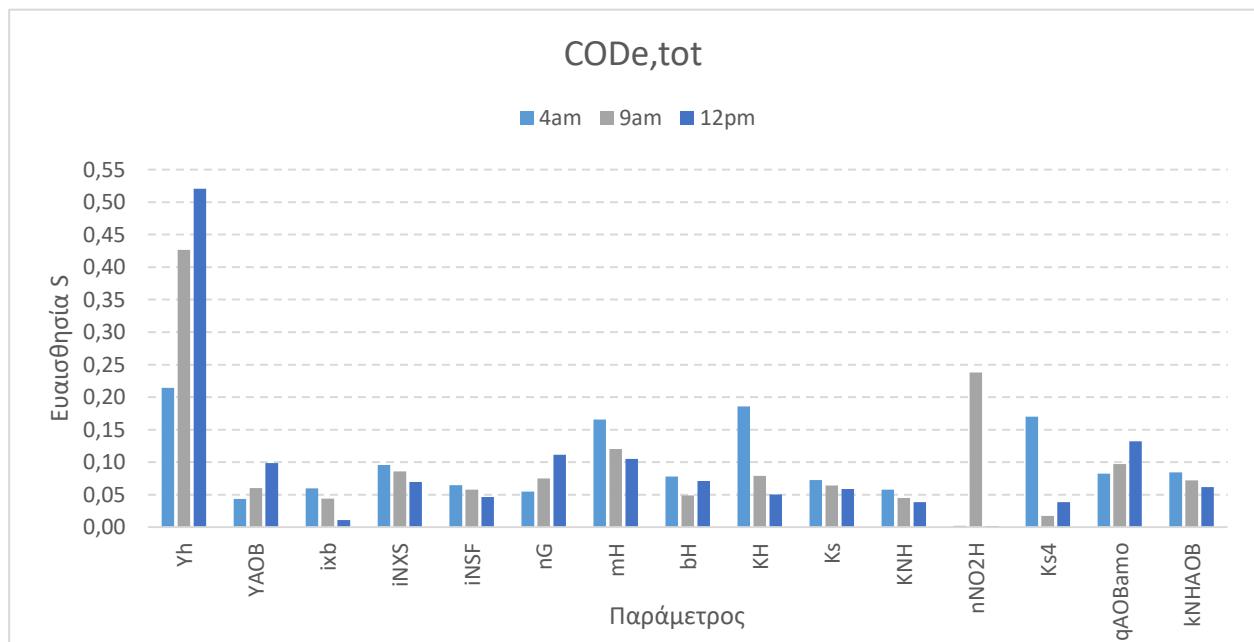
4.5.4.2 Στόχος σειράς σεναρίων

Στόχος του σεναρίου της δυναμικής φόρτισης με χρόνο παραμονής στερεών SRT = 10 d είναι να υπολογιστεί η σχετική ευαισθησία του συστήματος στις 67 στοιχειομετρικές και κινητικές

παραμέτρους, ώστε να αναδειχθούν εκείνες στις οποίες είναι περισσότερο ευαίσθητο, υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες οι οποίες προσομοιάζουν στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας μιας ΕΕΛ, και να υπολογιστεί η επίδραση της αλλαγής τους σε συγκεκριμένες μεταβλητές και δείκτες απόδοσης. Επιπλέον, θα δοθεί η δυνατότητα της σύγκρισης μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την αλλαγή των συνθηκών φόρτισης του συστήματος, για την ώρα της ημέρας της οποίας η παροχή προσεγγίζει τη μέση ωριαία παροχή που δέχεται η εγκατάσταση.

4.5.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το ολικό COD εξόδου παρουσιάζονται στο σχήμα 4.42.



Σχήμα 4.42 Ευαισθησία της μεταβλητής COD_{e,tot} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Η σημαντικότερη παράμετρος για το COD_{e,tot} είναι ο συντελεστής απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας Y_h. Μάλιστα, καθώς αυξάνεται η παροχή εισόδου αυξάνεται και η επίδραση της παραμέτρου στο COD στην έξοδο για λόγους που σχετίζονται με την αύξηση των MLSS στο σύστημα και την όλο και μεγαλύτερη αστοχία της καθίζησης που μεταφράζεται σε διαφυγή στερεών στην έξοδο και αύξηση της μεταβλητής ενδιαφέροντος.

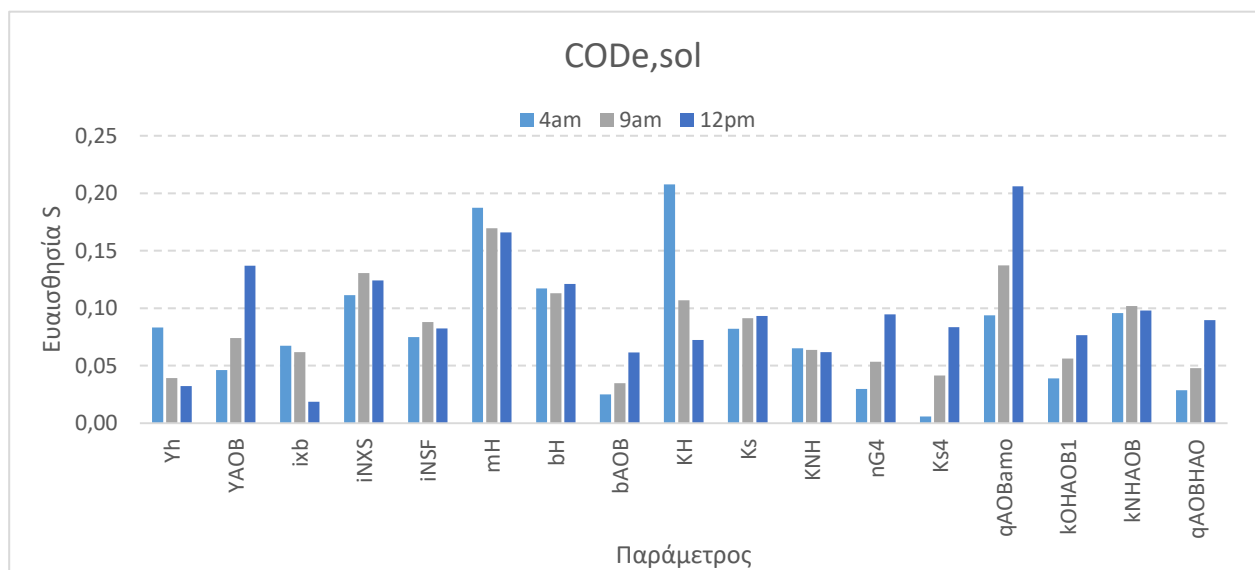
Δεύτερη παράμετρος ως προς την ευαισθησία του COD_{e,tot} είναι ο μειωτικός συντελεστής για την ταχύτητα υδρόλυσης σε ανοξικές συνθήκες παρουσία νιτρωδών και συγκεκριμένα, η μείωση του συντελεστή μεταβάλλει σημαντικά το COD_{e,tot} καθώς επιφέρει μεγαλύτερη μείωση στην ταχύτητα της διεργασίας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος συντελεστής παρουσιάζεται σημαντικός μόνο για την παροχή λυμάτων που βρίσκεται κοντά στη μέση ωριαία, δηλαδή των 9 π.μ.

Στη χαμηλή παροχή των 4 π.μ. ξεχωρίζει σε ευαισθησία, αν και βρίσκεται χαμηλά σε σημασία, η μέγιστη ειδική ταχύτητα υδρόλυσης σε αερόβιες συνθήκες, KH, γιατί επηρεάζει τη

διαθεσιμότητα του COD για κατανάλωση από τους μικροοργανισμούς. Στις υπόλοιπες παροχές παρατηρείται η μείωση της σχετικής ευαισθησίας του COD_{e,tot} σε αυτήν με την αύξηση της εισερχόμενης παροχής λυμάτων στο σύστημα. Ανάλογη είναι η εικόνα και για τη μέγιστη ειδική ταχύτητα αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών, *m_H*.

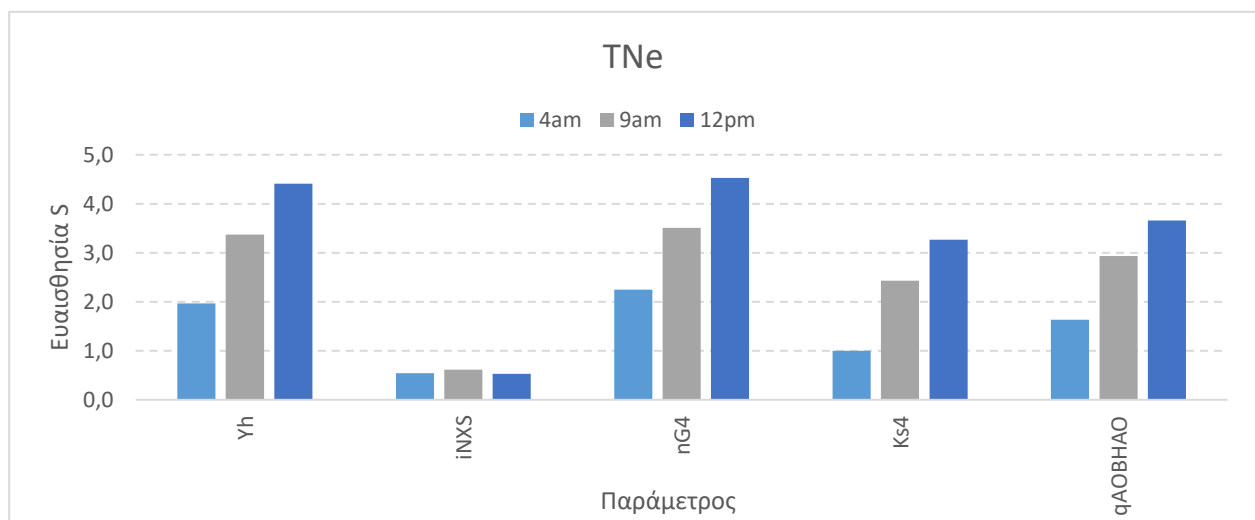
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το COD_{e,sol} παρουσιάζονται στο σχήμα 4.43.

Στις μεγάλες παροχές επικρατεί ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, *q_{AOBamo}* ενώ στις μικρές παροχές ο μέγιστος ρυθμός αερόβιας υδρόλυσης *K_H*. Φαίνεται γενικά, και από την κλιμάκωση των άλλων παραμέτρων με τις αλλαγές της παροχής, ότι για το διαλυτό COD στην έξοδο πιο σημαντική διεργασία για τις χαμηλές παροχές είναι η υδρόλυση, ενώ με την αύξηση της παροχής μεγαλύτερο ρόλο έχουν οι διεργασίες που καταλύουν οι AOB. Συνολικά βέβαια, η σχετική ευαισθησία σε όλες τις παραμέτρους είναι χαμηλή.



Σχήμα 4.43 Ευαισθησία της μεταβλητής COD_{e,sol} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το TNe παρουσιάζονται στο σχήμα 4.44.



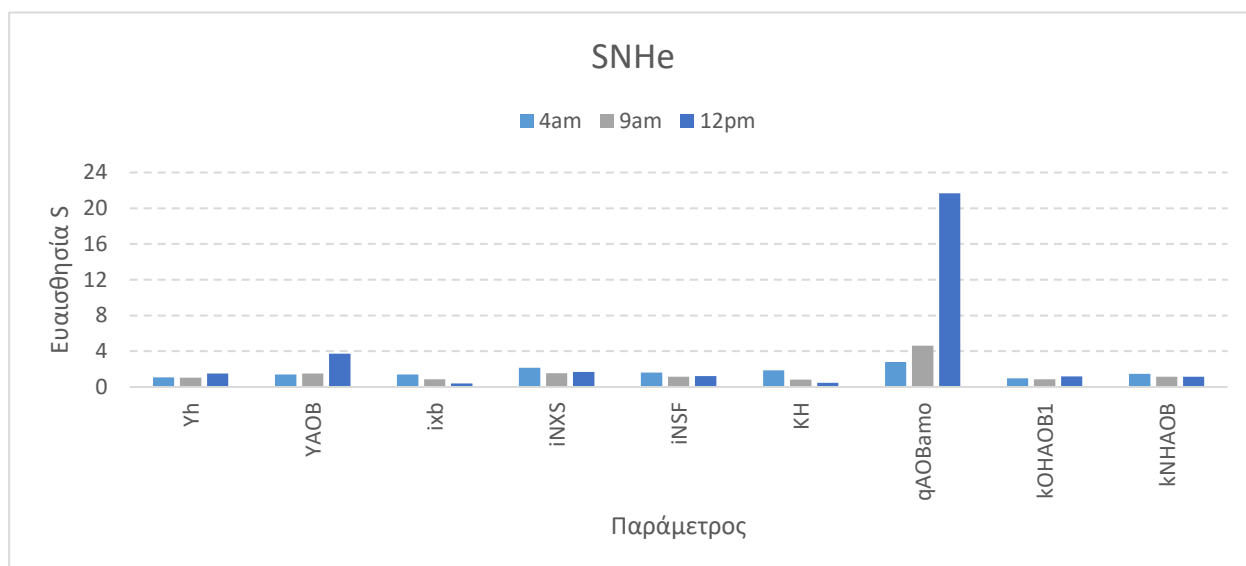
Σχήμα 4.44 Ευαισθησία της μεταβλητής TNe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για το TNe ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος είναι ο διορθωτικός συντελεστής για την ταχύτητα ανοξικής ανάπτυξης ετεροτροφικών κατά τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου, nG4, και με την αύξηση της παροχής η ευαισθησία αυξάνεται. Με την περαιτέρω μείωση της ταχύτητας συσσωρεύεται NO στον αντιδραστήρα προκαλώντας οξείδωσή του σε NO₂ από τους AOB, με αποτέλεσμα και την αύξηση κατανάλωσης O₂.

Εξίσου σημαντική παράμετρος είναι ο συντελεστής απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας Y_h με συμπεριφορά ανάλογη με τον nG4, δηλαδή η ευαισθησία του TNe στο Y_h αυξάνεται με την αύξηση της παροχής λόγω της αύξησης των MLSS που προκαλεί μεγάλη φόρτιση στη δεξαμενή τελικής καθίζησης και απώλεια στερεών στην έξοδο.

Η παράμετρος qAOB_{hao} που αποτελεί το μέγιστο ειδικό ρυθμό για την οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη επηρεάζει το TNe, ειδικά αυξανόμενης της παροχής. Συγκεκριμένα, η αύξηση της ταχύτητας αντίδρασης οδηγεί σε συσσώρευση νιτρωδών με αποτέλεσμα να μετατρέπονται σε N₂O και NO₃ και να επιβαρύνουν το TNe.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το SNHe παρουσιάζονται στο σχήμα 4.45.



Σχήμα 4.45 Ευαισθησία της μεταβλητής SNHe στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

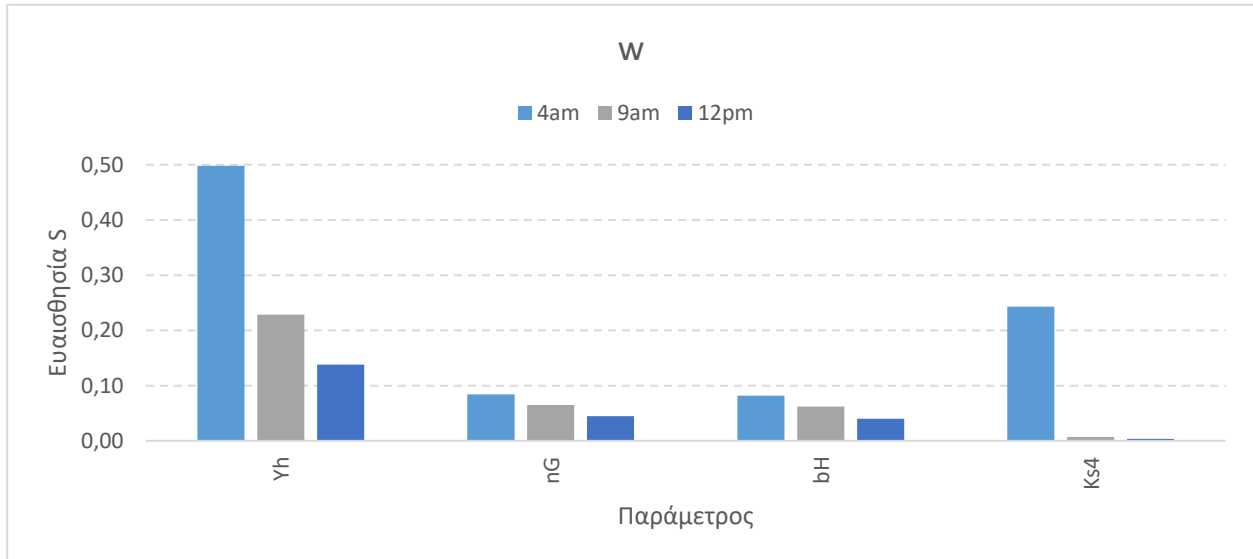
Φαίνεται για το SNHe ότι η σημαντικότερη παράμετρος είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, ειδικά για τη μεγάλη παροχή στις 12μ.μ. Η μείωση του ρυθμού της αντίδρασης οδηγεί σε αύξηση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το w παρουσιάζονται στο σχήμα 4.46.

Για την περίσσια ιλύος, όσο μικρότερη η παροχή τόσο σημαντικότερη είναι η συμβολή του συντελεστή απόδοσης ετεροτροφικών μικροοργανισμών Y_h. Με την αύξηση των ετεροτροφικών σε ένα σύστημα που δέχεται χαμηλή παροχή φαίνεται ότι αυξάνεται η περίσσεια που πρέπει να αφαιρείται από το σύστημα.

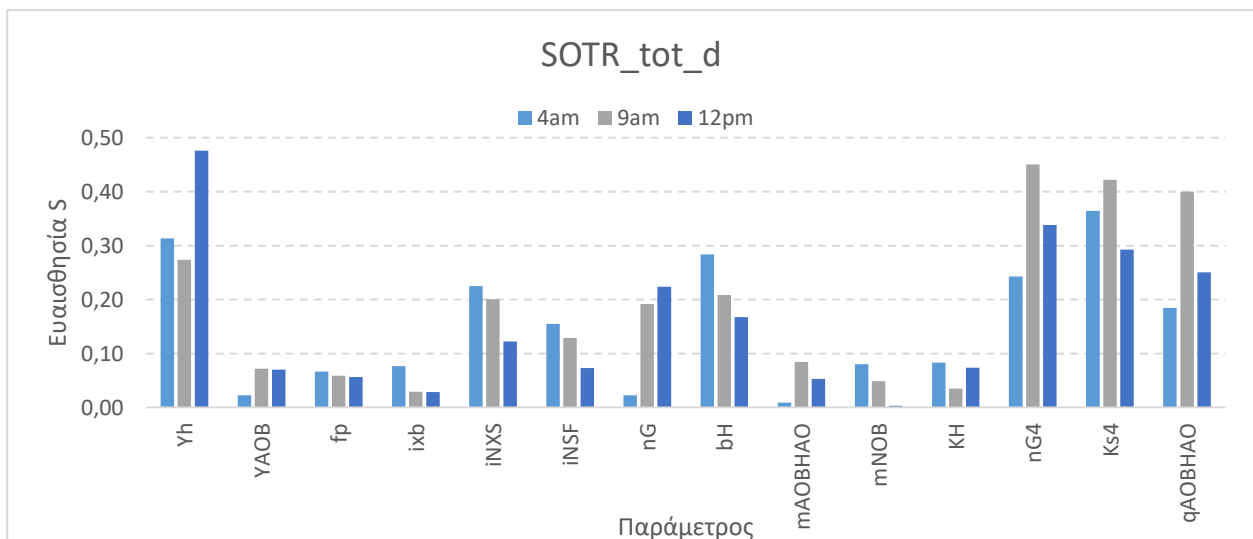
Επίσης, ο συντελεστής ημικορεσμού για τη διαλυτή τροφή K_{s4} κατά την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών με τη μετατροπή NO σε N₂O προβάλλει ως σημαντικότερος στις μικρές παροχές

αν και συνολικά δεν υπάρχει μεγάλη ευαισθησία σε αυτόν. Σε αυτές τις συνθήκες η αύξηση του συντελεστή μειώνει το ρυθμό της αντίδρασης και το NO οδηγείται προς οξείδωση από τους AOB και τελικά, παραγωγή N₂O από άλλη οδό. Σε αυτή την περίπτωση το w αυξάνεται από τη σύνθεση αυτοτροφικών και νιτρικών βακτηρίων.



Σχήμα 4.46 Ευαισθησία της μεταβλητής w στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το SOTR_{tot_d} παρουσιάζονται στο σχήμα 4.47.



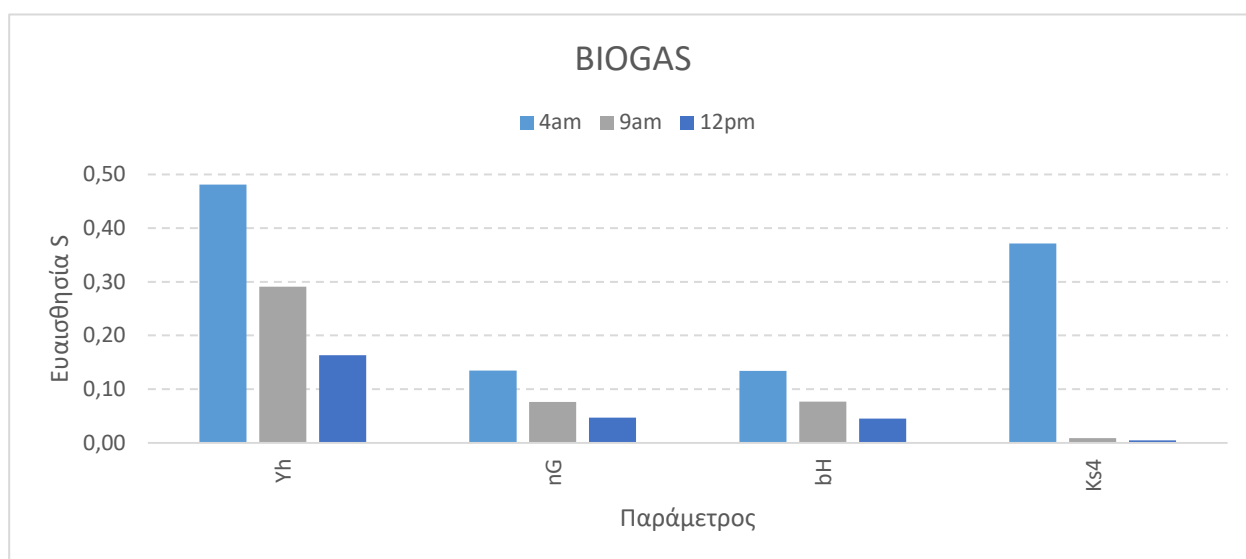
Σχήμα 4.47 Ευαισθησία της μεταβλητής SOTR_{tot_d} στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για την κατανάλωση O₂ η σημαντικότερη παράμετρος είναι η ανάπτυξη της ετεροτροφικής βιομάζας στις μεγάλες παροχές καθώς η ταχύτερη ανάπτυξή τους συντελείται υπό αερόβιες συνθήκες.

Επίσης οι παράμετροι που σχετίζονται με την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών κατά τη μετατροπή NO σε N₂O ακολουθούν σε σημασία, nG4 και Ks4, ειδικότερα για τη μέση ωριαία παροχή στις 9 π.μ.. Η επιβράδυνση της αντίδρασης οδηγεί εναλλακτικά τα NO σε οξείδωση από τους AOB και αυξάνει την κατανάλωση O₂ του αντιδραστήρα.

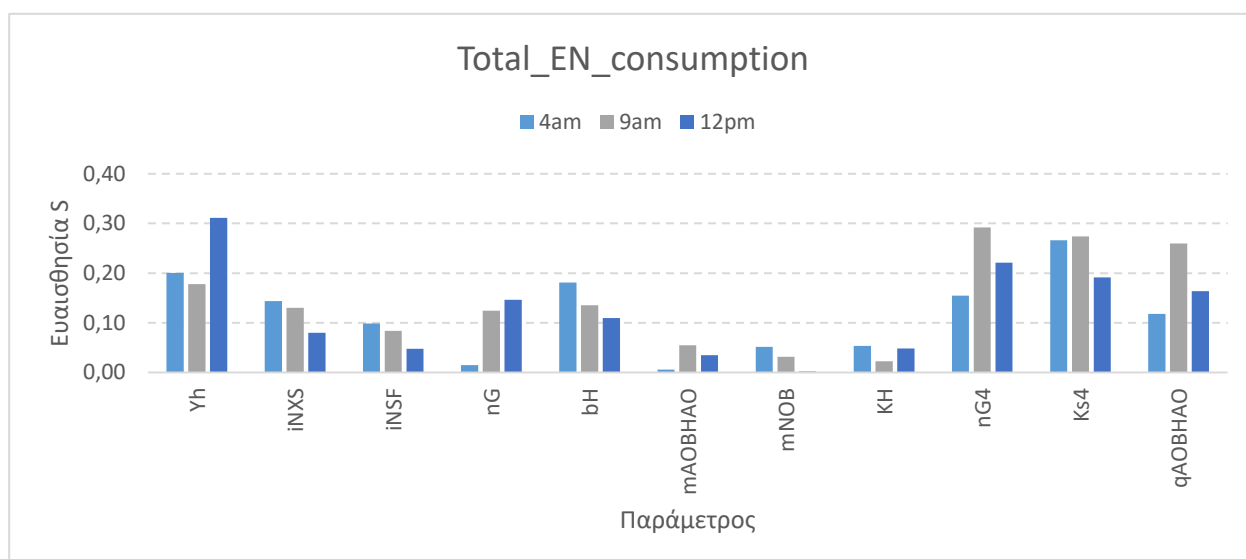
Το ίδιο συμβαίνει και με το μέγιστο ρυθμό οξείδωσης μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη, qAOBhao, που η αύξηση της παραμέτρου οδηγεί, όπως ήταν αναμενόμενο, σε αύξηση της κατανάλωσης O₂.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το BIOGAS παρουσιάζονται στο σχήμα 4.48. και είναι αντίστοιχα με τα αποτελέσματα για το w καθώς η περίσσεια οδηγείται στο χωνευτή για την παραγωγή βιοαερίου.



Σχήμα 4.48 Ευαισθησία της μεταβλητής BIOGAS στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το Total_EN_consumption παρουσιάζονται στο σχήμα 4.49.

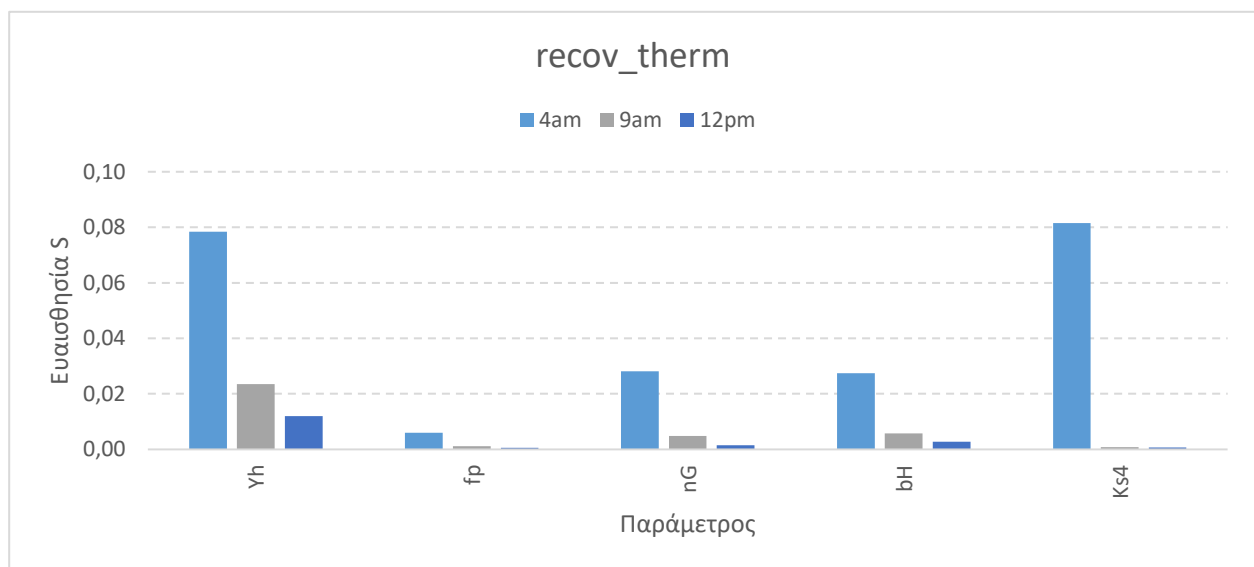


Σχήμα 4.49 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_EN_consumption στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Τα αποτελέσματα για τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση επηρεάζονται σε μικρό βαθμό από τις παραμέτρους που σχετίζονται με την αερόβια, Yh, και την ανοξική ανάπτυξη, nG4 και Ks4, των ετεροτροφικών μικροοργανισμών που αποτελούν και την πλειοψηφία στο σύστημα ενεργού ιλύος.

Ειδικά στη μέση παροχή τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση επηρεάζει και ο μέγιστος ειδικός ρυθμός οξειδωσης του μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το recov_therm παρουσιάζονται στο σχήμα 4.50.



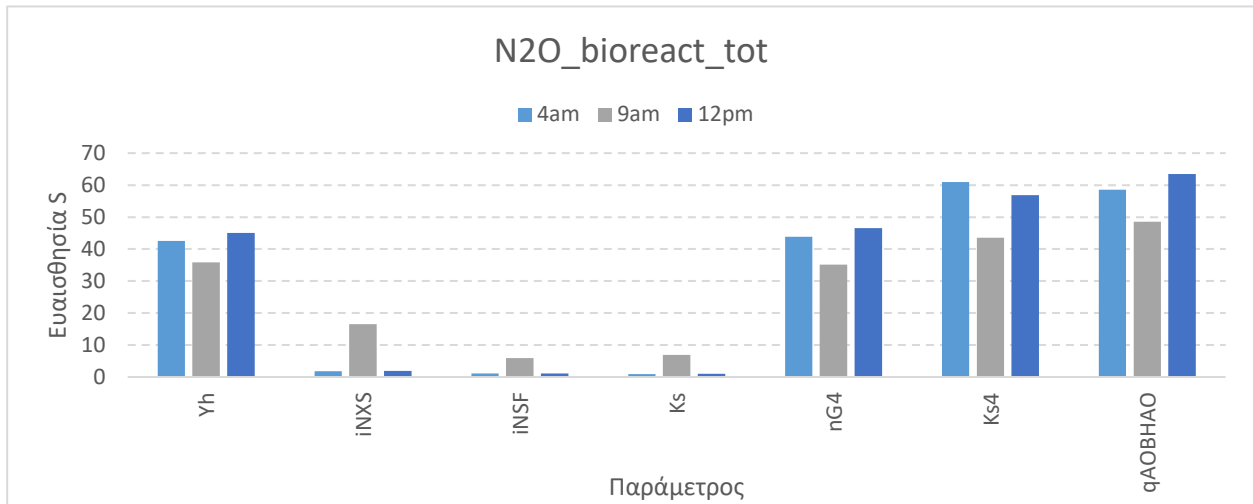
Σχήμα 4.50 Ευαισθησία της μεταβλητής recov_therm στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Για τις χαμηλές παροχές αναδεικνύονται οι παράμετροι ανάπτυξης και λύσης των ετεροτροφικών οργανισμών σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες, Ks4, Yh, nG και bH, καθώς οι ετεροτροφικοί αποτελούν την πλειοψηφία στο σύστημα ενεργού ιλύος και, ως εκ τούτου, στην ιλύ που οδηγείται στον αναερόβιο χωνευτή προς παραγωγή βιοαερίου, που συνεπάγεται και ανάκτηση μέρους της ενέργειας που καταναλώνεται. Επισημαίνεται ότι όλες οι τιμές σχετικής ευαισθησίας κινούνται σε πού χαμηλά επίπεδα.

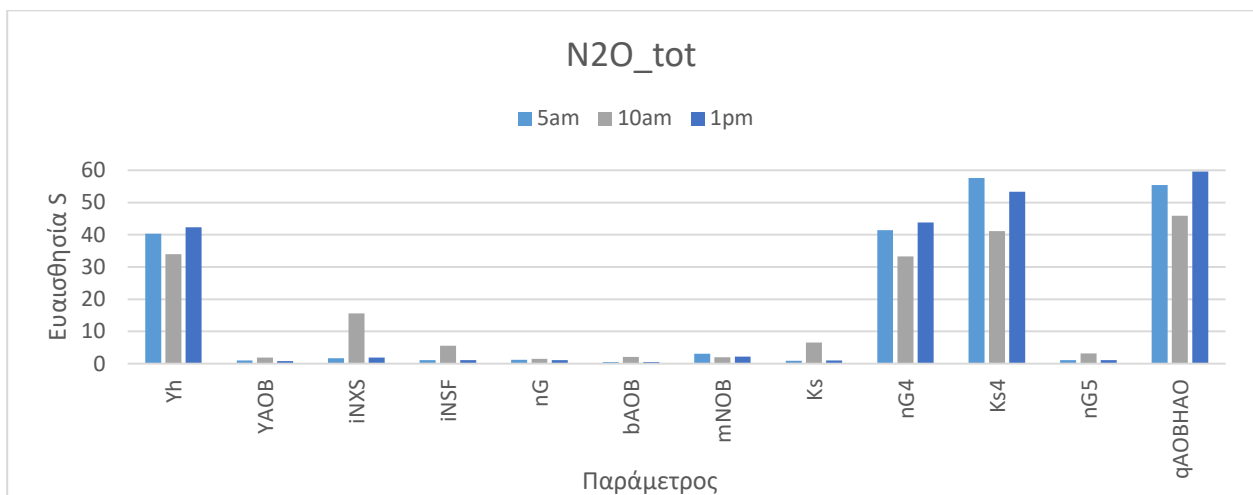
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τα N2O_bioreact_tot, N2O_tot, Total_GHG_CO2eq, kgCO2_kgCOD, kgCO2_kgN και kgN2O_kgTNin παρουσιάζονται στα σχήματα 4.51, 4.52, 4.53, 4.54, 4.55 και 4.56.

Οι δείκτες N2O_bioreact_tot, N2O_tot, Total_GHG_CO2eq, kgCO2_kgCOD, kgCO2_kgN και kgN2O_kgTNin αποδεικνύονται περισσότερο ευαίσθητοι στις παραμέτρους qAOBhao, Ks4, nG4 και Yh, που σχετίζονται με την αερόβια και ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών οργανισμών που επικρατούν στο σύστημα ενεργού ιλύος και τη διεργασία οξειδωσης του NO. Με την επιβράδυνση των διεργασιών οξειδωσης του NO και τη συσσώρευσή του, το σύστημα οδηγείται τελικά στην αναγωγή του NO σε N2O κατά τη νιτροποίηση των νιτροποιητών. Η αύξηση του N2O

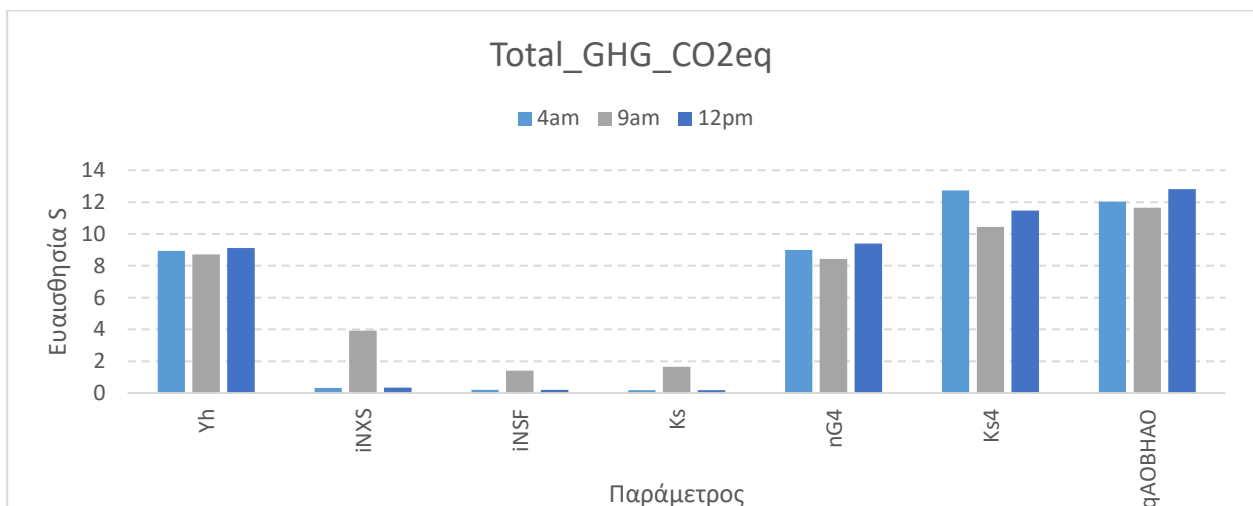
επιφέρει τη μεταβολή σε όλους τους παραπάνω δείκτες. Η εικόνα ισχύει, με μικρές αυξομειώσεις ως προς την ευαισθησία, για όλες τις παροχές που ελέγχθηκαν.



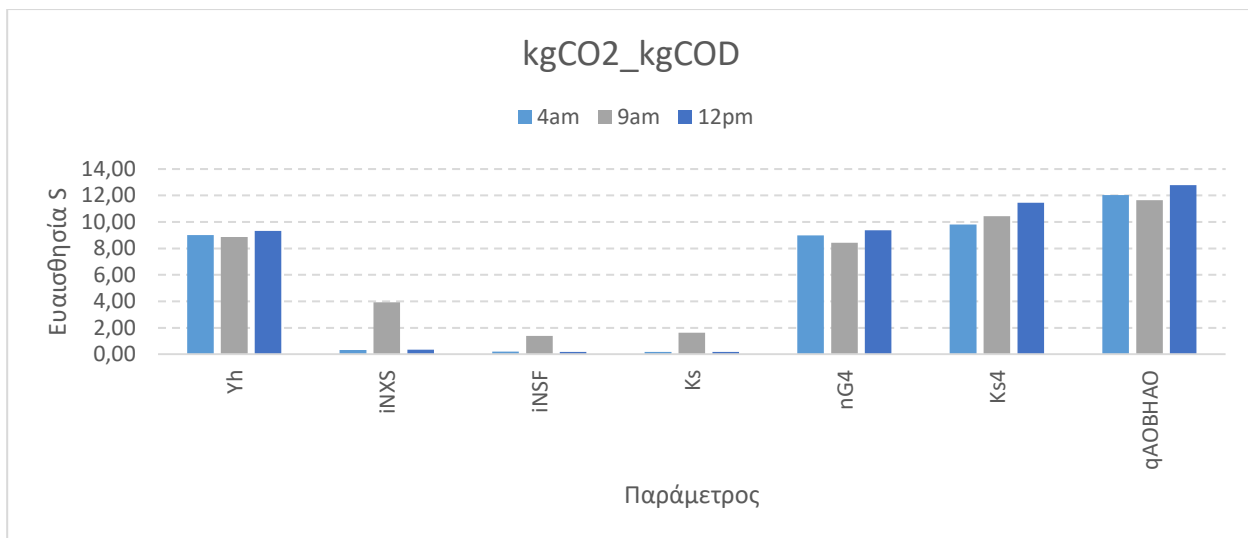
Σχήμα 4.51 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O_bioreact_tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.



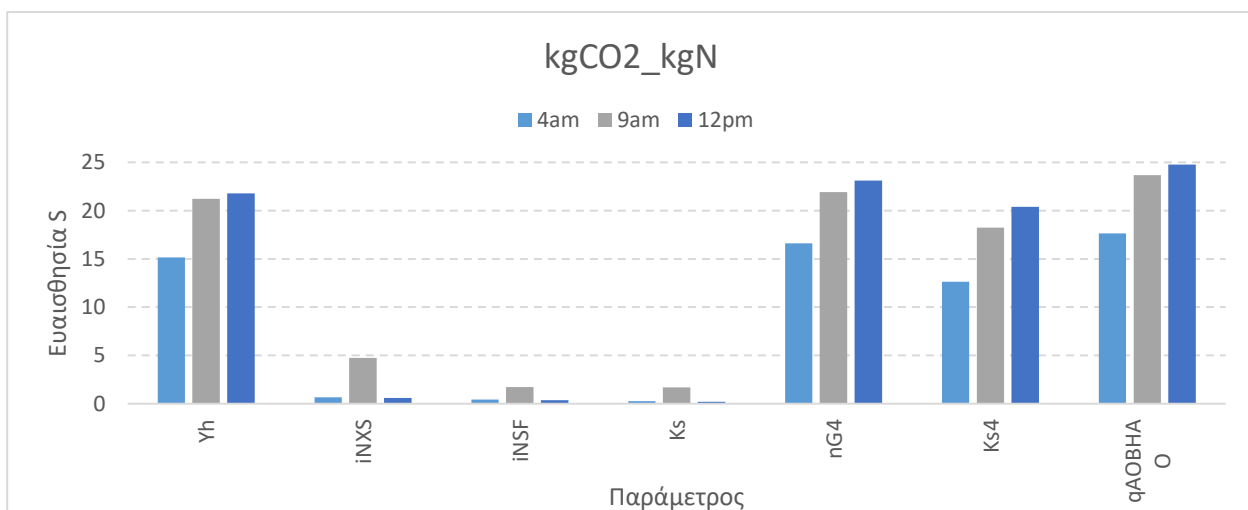
Σχήμα 4.52 Ευαισθησία της μεταβλητής N2O_tot στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.



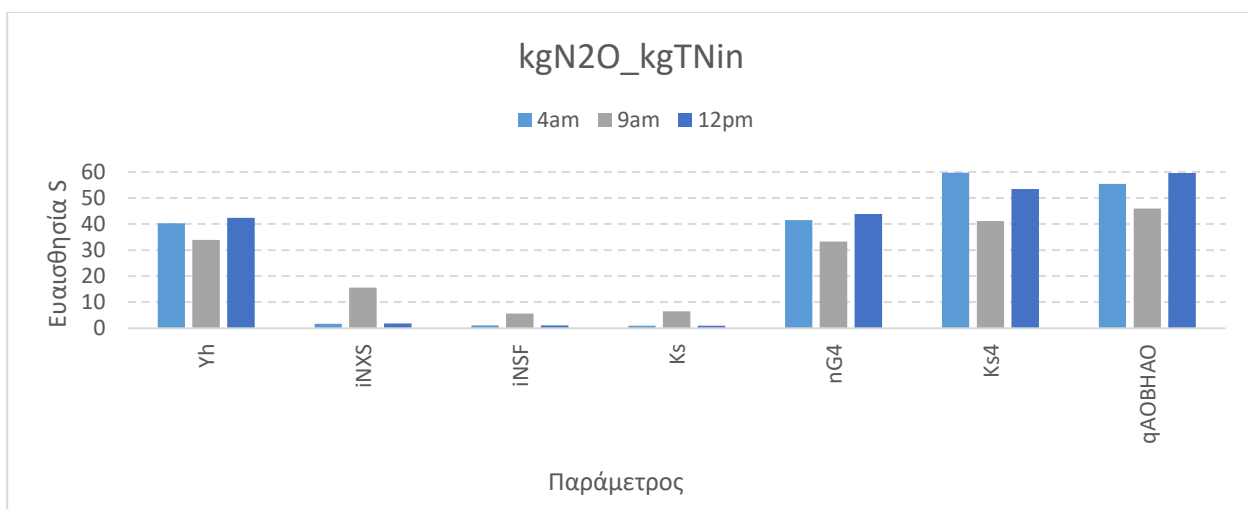
Σχήμα 4.53 Ευαισθησία της μεταβλητής Total_GHG_CO2eq στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.



Σχήμα 4.54 Ευαισθησία του δείκτη kgCO2_kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

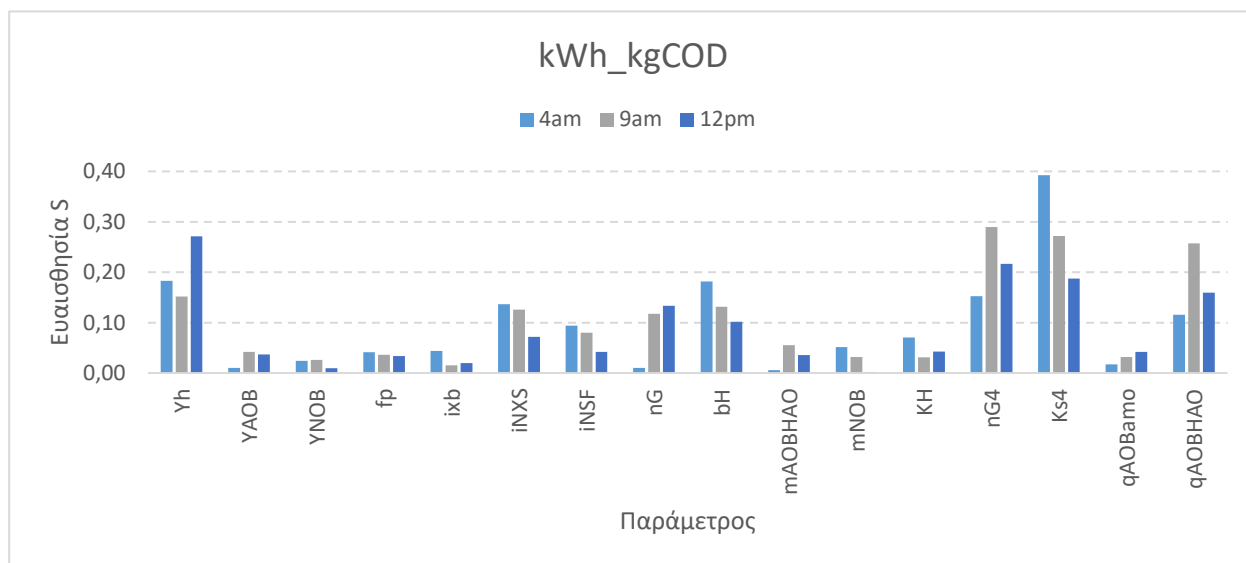


Σχήμα 4.55 Ευαισθησία του δείκτη kgCO2_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

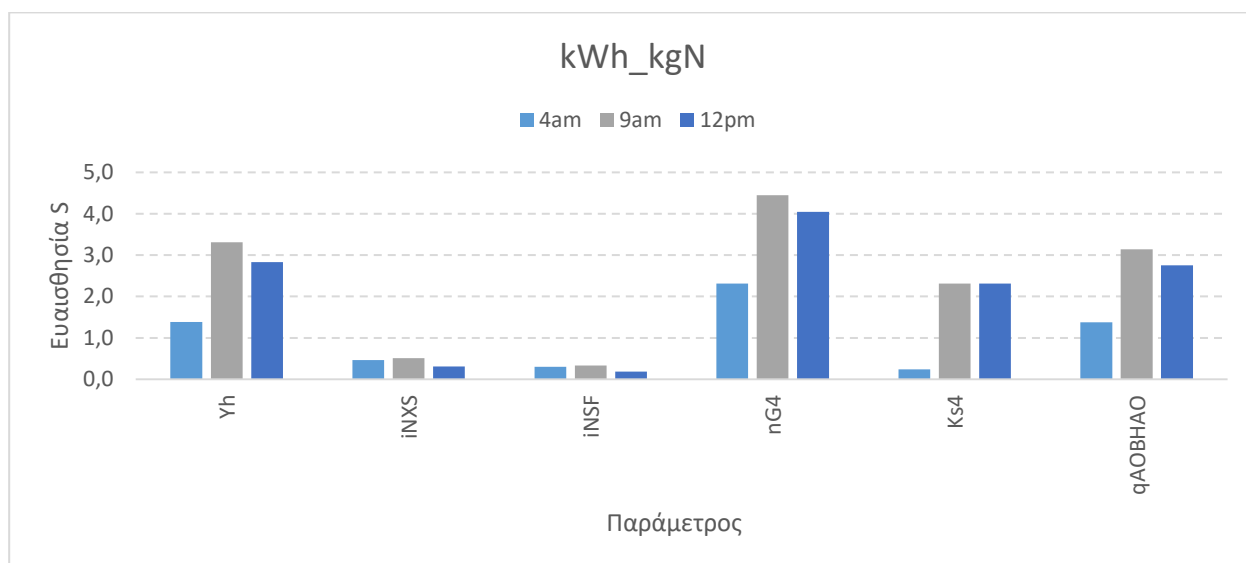


Σχήμα 4.56 Ευαισθησία του δείκτη kgN2O_kgTNin στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τα kWh_kgCOD και kWh_kgN παρουσιάζονται στα σχήματα 4.57 και 4.58.



Σχήμα 4.57 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgCOD στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.



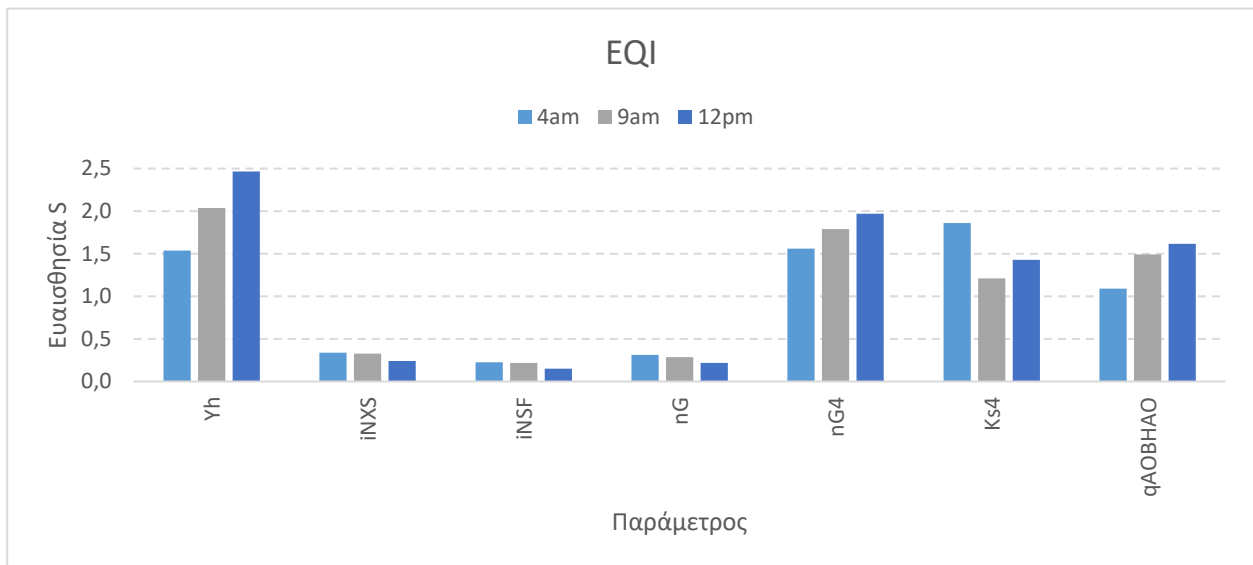
Σχήμα 4.58 Ευαισθησία του δείκτη kWh_kgN στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Οι σημαντικότερες παράμετροι είναι, όπως και προηγουμένως, αυτές που σχετίζονται με την αερόβια και ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών οργανισμών που επικρατούν στο σύστημα ενεργού ιλύος και τη διεργασία οξειδωσης του NO λόγω των καταναλώσεων του συστήματος αερισμού. Επίσης, στις χαμηλές παροχές σημαντική είναι η επίδραση της φθοράς των ετεροτροφικών bH για το δείκτη kWh_kgCOD.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το EQI παρουσιάζονται στο σχήμα 4.59.

Είναι φανερό, ότι όπως παραπάνω, οι ίδιες παράμετροι, Yh, nG4, Ks4 και qAOBHao επηρεάζουν την ποιότητα εκροής με αυξομειώσεις της ευαισθησίας ανάλογα με την παροχή. Οι

συγκεκριμένες παράμετροι επηρεάζουν την πορεία του μονοξειδίου στο σύστημα μεταξύ των διεργασιών της απονιτροποίησης των ετεροτροφικών και της νιτροποίησης των νιτροποιητών, άρα και τη σύσταση της εκροής που υπολογίζεται στο δείκτη EQI.



Σχήμα 4.59 Ευαισθησία του δείκτη EQI στη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο να αναλύσει τις σημαντικότερες μεταβλητές και τους πλέον χρήσιμους δείκτες λειτουργίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, ως προς την ευαισθησία τους στις μεταβολές όλων των στοιχειομετρικών και κινητικών παραμέτρων του συστήματος.

Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας αρχικά πραγματοποιήθηκε αναζήτηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας για εμβάθυνση στα υπάρχοντα μοντέλα προσομοίωσης της λειτουργίας μιας ΕΕΛ και ακολούθησε συστηματική μελέτη του μοντέλου που έχει αναπτυχθεί για τις ερευνητικές ανάγκες του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας και το οποίο εφαρμόστηκε για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στις εξισώσεις του Μοντέλου Ενεργού Ιλύος 1 (ASM1) αλλά έχει επεκταθεί με την προσθήκη εξισώσεων που επιτρέπουν τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG), ενώ διαθέτει υπομοντέλο ζωνικής καθίζησης για τη λειτουργία της δεξαμενής τελικής καθίζησης, υπομοντέλο αναερόβιας χώνευσης το οποίο βασίζεται στο ADM1 και ισοζύγια μαζών για τη λειτουργία των υπόλοιπων μονάδων. Με τη συνδυαστική εφαρμογή όλων των παραπάνω επιτυγχάνεται ο υπολογισμός όλων των απαραίτητων μεταβλητών λειτουργίας μιας ΕΕΛ σε όλες τις θέσεις ενδιαφέροντος.

Η γνώση των παροχών, συγκεντρώσεων και μαζών όλων των οργανικών και αζωτούχων συστατικών ενός συστήματος ενεργού ιλύος, της κατανάλωσης οξυγόνου και ενέργειας, των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και εντέλει όλων των μεταβλητών που αφορούν στις ροές των ανεπεξέργαστων, υπό επεξεργασία, επεξεργασμένων λυμάτων, στραγγιδίων και ιλύος επιτρέπει τον συστηματικό έλεγχο των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός της εγκατάστασης και την εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης, με στόχο τον έλεγχο των παραγόμενων εκροών.

Εν προκειμένω, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για 67 στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους ώστε να αναδειχθούν εκείνες, οι μεταβολές των οποίων επιδρούν σε μεγαλύτερο βαθμό σε 19 σημαντικές μεταβλητές και δείκτες λειτουργίας του συστήματος. Από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Η παράμετρος στην οποία οι περισσότερες μεταβλητές παρουσίασαν σημαντική σχετική ευαισθησία και σε αρκετές περιπτώσεις τη μέγιστη σχετική ευαισθησία είναι ο βαθμός απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας Y_h . Όπως προέκυψε από την ανάλυση ευαισθησίας, το γεγονός ότι η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει το κλάσμα του οργανικού C που οδηγείται σε σύνθεση νέας βιομάζας, ως προς τον C που απομακρύνεται από το σύστημα, επιδρά σημαντικά στο ολικό COD στην έξοδο της εγκατάστασης. Η αυξημένη παραγωγή βιομάζας έχει επίδραση στη διαδικασία της καθίζησης με αποτέλεσμα να χάνονται στερεά στην έξοδο, συνυπολογίζοντας ότι πρόκειται για τη βιομάζα που επικρατεί στο σύστημα ενεργού ιλύος έναντι των άλλων. Το συμπέρασμα ενισχύεται από το γεγονός ότι το διαλυτό COD εξόδου δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα κατά τη μεταβολή του Y_h και συνεπώς τη συγκέντρωση αυτή δημιουργεί το σωματιδιακό COD των μικροοργανισμών. Η σχετική ευαισθησία για τη συγκεκριμένη μεταβλητή διατηρείται ψηλά τόσο στον υψηλότερο χρόνο παραμονής ρευστών με $SRT=10$ ημέρες, όσο και στον χαμηλότερο χρόνο με $SRT=4.5$ ημέρες,

αλλά και για τη δυναμική φόρτιση, με την αυξανόμενη παροχή λυμάτων να ενισχύει τη σχετική ευαισθησία του COD εξόδου στην παράμετρο αυτή.

- Το Y_h αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για το ολικό N εξόδου μόνο στην περίπτωση του υψηλού χρόνου παραμονής ρευστών με $SRT=10$ ημέρες. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της σύνθεσης των μικροοργανισμών επέρχεται αύξηση των MLSS με αποτέλεσμα να αυξάνεται η φόρτιση στερεών της ΔTK και να διαφεύγουν στερεά από την καθίζηση στην έξοδο της εγκατάστασης. Αποτέλεσμα της αυξημένης φόρτισης είναι η αύξηση της μεταβλητής TNe , λόγω του οργανικού αζώτου που περιέχεται στους μικροοργανισμούς που διαφεύγουν με τα στερεά στην έξοδο. Αυτό αποδεικνύεται, μεταξύ άλλων, και από το γεγονός ότι το αμμωνιακό άζωτο έχει σχεδόν μηδενική συγκέντρωση στην έξοδο, καθώς ο χρόνος παραμονής στερεών είναι αρκετός για να πραγματοποιείται η διεργασία της νιτροποίησης.

Η εικόνα είναι διαφορετική στην περίπτωση του περιορισμένου χρόνου παραμονής ρευστών, $srt=4.5$ ημέρες, ο οποίος δεν επαρκεί για τη νιτροποίηση με αποτέλεσμα να παρατηρείται αυξημένο αμμωνιακό άζωτο στην έξοδο. Σε αυτή την περίπτωση το TNe παρουσιάζει χαμηλότερη σχετική ευαισθησία στη μεταβολή του Y_h καθώς το αμμωνιακό άζωτο είναι εκείνο που καθορίζει τη συγκέντρωση του N στην έξοδο και όχι τα στερεά που διαφεύγουν της καθίζησης. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται αυξημένη ευαισθησία στις παραμέτρους που καθορίζουν την ταχύτητα οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, $qAOB_{amo}$, και την ταχύτητα οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου, $mAOB_{hao}$, καθώς σε αυτές τις συνθήκες αναστολής της νιτροποίησης από τους νιτροποιητές, έχουν κινητοποιηθεί αυτές οι διεργασίες για την κατανάλωση του αμμωνιακού αζώτου και τη σύνθεση των AOB κατά τη δεύτερη διεργασία. Αυξημένη σχετική ευαισθησία παρουσιάζει το TNe και στο συντελεστή απόδοσης της ανάπτυξης αυτοτροφικών, Y_{aob} , γιατί στις συγκεκριμένες συνθήκες αναστολής νιτροποίησης, οποιαδήποτε μεταβολή στη σύνθεση των AOB που παρέχουν τις εναλλακτικές βιοχημικές οδούς οξείδωσης του αμμωνιακού αζώτου μεταβάλλει ανάλογα το αμμωνιακό άζωτο εξόδου, άρα και το TNe .

- Το $SNHe$, σε συνέχεια όσων αναφέρονται παραπάνω, εμφανίζει αυξημένη σχετική ευαισθησία στις μεταβολές της ταχύτητας οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, $qAOB_{amo}$, και της ταχύτητας οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου, $mAOB_{hao}$ για τις συνθήκες σταθερής φόρτισης είτε για $SRT=10$ είτε για $SRT=4.5$ ημέρες. Ειδικά για την περίπτωση του περιορισμένου χρόνου παραμονής στερεών υψηλή σχετική ευαισθησία παρουσιάζει το $SNHe$ και στο συντελεστή απόδοσης της ανάπτυξης αυτοτροφικών, Y_{aob} .

Για την περίπτωση της δυναμικής φόρτισης αναδεικνύεται μόνο η ταχύτητα οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη, $qAOB_{amo}$, ως κρίσιμη διεργασία που καθορίζει τη συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο. Μάλιστα, αυξανόμενης της παροχής εισόδου αυξάνεται η σχετική ευαισθησία του $SNHe$ στις μεταβολές της συγκεκριμένης παραμέτρου.

- Το Y_h αποδεικνύεται ως η σημαντικότερη παράμετρος που καθορίζει την περίσσεια ιλύος που παράγεται από την εγκατάσταση τόσο σε συνθήκες σταθερής φόρτισης ανεξάρτητα από το χρόνο παραμονής στερεών, όσο και σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης του συστήματος. Αποδεικνύεται δε, ότι όσο μικρότερη η εισερχόμενη στο σύστημα παροχή

λυμάτων, τόσο υψηλότερη είναι η ευαισθησία του w στις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

- Η παράμετρος Y_h των ετεροτροφικών παρουσιάζεται ως η σημαντικότερη παράμετρος που καθορίζει τις ημερήσιες ανάγκες αερισμού $SOTR_{tot_d}$ για όλα τα σενάρια φόρτισης και χρόνων παραμονής στερεών. Για τη σταθερή φόρτιση με μεγάλο χρόνο παραμονής αποτελεί με διαφορά το σημαντικότερο παράγοντα καθώς η αυξημένη σύνθεση βιομάζας μειώνει το διαθέσιμο οργανικό άνθρακα προς οξείδωση. Σε αυτή την περίπτωση μικρότερη συνεισφορά παρουσιάζει και η παράμετρος που σχετίζεται με το κλάσμα αζώτου της σωματιδιακής αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης, $iNXS$ καθώς υπόκειται σε υδρόλυση, την οποία ακολουθεί αμμωνιοποίηση, η οποία θα οδηγήσει σε κατανάλωση οξυγόνου λόγω νιτροποίησης.

Για μικρό χρόνο παραμονής ρευστών, πέραν της συνεισφοράς του Y_h , μεγάλη επίδραση στην κατανάλωση οξυγόνου ασκούν οι ειδικοί ρυθμοί που καθορίζουν τις ταχύτητες οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνης, $qAOB_{amo}$, και της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου, $mAOB_{hao}$ καθώς αποτελούν διεργασίες οξείδωσης που καταναλώνουν O_2 , και λειτουργούν ως εναλλακτικές οδοί κατανάλωσης της αμμωνίας σε αυτές τις συνθήκες. Επίσης, ο συντελεστής απόδοσης και ο ρυθμός φθοράς των AOB , δηλαδή οι παράμετροι Y_{aob} , b_{AOB} επηρεάζουν σημαντικά την κατανάλωση O_2 γιατί κατά την οξείδωση της NH_2OH σε NO που συντίθενται οι AOB απαιτείται κατανάλωση O_2 , ενώ η φθορά της βιομάζας έχει την αντίθετη επίδραση στο απαιτούμενο O_2 .

Στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης του συστήματος, εκτός της Y_h , συνεισφέρουν σημαντικά στην κατανάλωση O_2 δύο παράμετροι, nG_4 και KS_4 , που ρυθμίζουν το ρυθμό ανοξικής ανάπτυξης των ετεροτροφικών μικροοργανισμών κατά την αναγωγή NO σε N_2O . Η μείωση της ταχύτητας της αντίδρασης στρέφει την ανάπτυξη των ετεροτροφικών στην αερόβια οδό με επακόλουθη κατανάλωση O_2 και ταυτόχρονα το N_2O του βιοαντιδραστήρα αυξάνεται λόγω στροφής στη νιτροποίηση των νιτροποιητών.

- Η παράμετρος Y_h των ετεροτροφικών παρουσιάζεται ως η σημαντικότερη και για την παραγωγή βιοαερίου σε όλα τα σενάρια φόρτισης και χρόνου παραμονής στερεών, γεγονός αναμενόμενο καθώς οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί αποτελούν την επικρατούσα βιομάζα στο σύστημα ενεργού ιλύος και η ανάπτυξή τους επιφέρει αύξηση της περισσειας ιλύος που οδηγείται στον αναερόβιο χωνευτή. Μάλιστα όπως αποδεικνύεται από όλα τα σενάρια, η σχετική ευαισθησία του παραγόμενου βιοαερίου στις μεταβολές του Y_h αυξάνεται όσο μειώνεται ο χρόνος παραμονής στερεών ή η φόρτιση του συστήματος. Σημειώνεται ότι, στις συνθήκες χαμηλής παροχής του δυναμικού σεναρίου αυξημένη σχετική ευαισθησία παρουσίασε το βιοαέριο στην αύξηση του συντελεστή ημικορεσμού ευκολοδιασπάσιμης τροφής για την ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών κατά τη μετατροπή του NO σε N_2O . Με την αύξηση του συντελεστή παρατηρήθηκε αύξηση της παραγωγής βιοαερίου.
- Το Y_h αποτελεί κυρίαρχη παράμετρο, εκτός όσων προαναφέρθηκαν, στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση της ΕΕΛ, στην ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια από το βιοαέριο, στην ανακτώμενη θερμική ενέργεια από το βιοαέριο, στην παραγωγή N_2O του βιοαντιδραστήρα, στην ολική παραγωγή N_2O της ΕΕΛ, στις συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε όρους ισοδύναμου CO_2 , στα $kgCO_2$ που παράγονται σε σχέση με τα $kgCOD$ που απομακρύνονται, στα $kgCO_2$ που παράγονται σε σχέση με τα kgN που

απομακρύνονται, στα kgN_2O που παράγονται σε σχέση με το TN που εισέρχεται στην εγκατάσταση, στην ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με το COD που καταναλώνεται και στο δείκτη ποιότητας EQI σε συνθήκες πάντα σταθερής φόρτισης για χρόνο παραμονής στερεών $\text{SRT}=10\text{d}$. Καθώς το Y_h καθορίζει το ποσοστό του οργανικού C που θα διατεθεί σε σύνθεση, επηρεάζει όλους τους προαναφερθέντες δείκτες γιατί προσδιορίζει την ποσότητα υλός που θα οδηγηθεί ως περίσσεια για παραγωγή βιοαερίου και ενέργειας μέσω της μονάδας συμπαραγωγής. Απ' την άλλη καθορίζει και τις ενεργειακές καταναλώσεις γιατί προσδιορίζει το οργανικό υλικό που θα οξειδωθεί.

Όμως, σε συνθήκες περιορισμένου χρόνου παραμονής στερεών, $\text{SRT}=4.5\text{d}$, παρουσιάζονται ως κρίσιμες, για τις παραπάνω διεργασίες, παράμετροι που ρυθμίζουν την οξείδωση της NH_3 σε NH_2OH και της NH_2OH σε NO , όπως είναι οι $m_{\text{AOB}}/\text{hao}$ και $q_{\text{AOB}}/\text{amo}$ καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής απόδοσης αυτοτροφικής βιομάζας Y_{aob} , καθώς η ΕΕΛ λειτουργεί υπό συνθήκες αναστολής της νιτροποίησης και η NH_3 , χωρίς να έχει πλήρως οξειδωθεί, φεύγει στην έξοδο της εγκατάστασης. Οπότε το σύστημα αναζητά οδούς απομάκρυνσης της NH_3 .

Τέλος, για τις συνθήκες δυναμικής φόρτισης αποδεικνύεται ότι εκτός από τους προαναφερθέντες συντελεστές στους οποίους εμφανίζεται σημαντική σχετική ευαισθησία, ως κρίσιμη διεργασία παρουσιάζεται και η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών με αυξημένη σχετική ευαισθησία στις παραμέτρους n_{G4} και KS4 που ρυθμίζουν την ταχύτητα της διεργασίας και τη συγκέντρωση διαλυτής τροφής που απαιτείται για τη μετατροπή NO σε N_2O κατά την απονιτροποίηση των ετεροτροφικών.

- Συνολικά λοιπόν, για τα σενάρια σταθερής φόρτισης, με $\text{SRT}=10\text{d}$, η παράμετρος στην οποία οι περισσότερες μεταβλητές παρουσίασαν σημαντική σχετική ευαισθησία και σε αρκετές περιπτώσεις τη μέγιστη σχετική ευαισθησία είναι ο βαθμός απόδοσης ετεροτροφικής βιομάζας, Y_h που καθορίζει το κλάσμα οργανικού C που οδηγείται σε σύνθεση μικροοργανισμών ως προς το σύνολο του οργανικού C που απομακρύνεται από το σύστημα. Για τα σενάρια σταθερής φόρτισης με $\text{SRT}=4\text{d}$ οι μεταβλητές παραμένουν ευαίσθητες στις μεταβολές της παραμέτρου Y_h αλλά λόγω των συνθηκών αναστολής της νιτροποίησης αναδεικνύονται ως σημαντικότερες παράμετροι που σχετίζονται με τα αζωτούχα συστατικά του συστήματος.

Η κρίσιμη διεργασία για τα αποτελέσματα της επεξεργασίας είναι η νιτροποίηση. Η επάρκεια του χρόνου παραμονής στερεών για την ολοκλήρωση ή αναστολή της διεργασίας μεταβάλλει σημαντικά τις ισορροπίες και τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα ενεργού υλός.

Συναξιολογώντας όλα τα παραπάνω, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση ευαισθησίας κωδικοποιούνται στα ακόλουθα σημεία:

- Η σχετική ευαισθησία των μεταβλητών και δεικτών ενδιαφέροντος μιας ΕΕΛ στις στοιχειομετρικές και κινητικές παραμέτρους εξαρτάται από τις λειτουργικές συνθήκες του συστήματος. Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται για στατική ή δυναμική φόρτιση, καθώς και μεταξύ συστημάτων που λειτουργούν με μεγάλους χρόνους παραμονής ρευστών ή μικρούς χρόνους παραμονής ρευστών που δεν επιτρέπουν να συντελεστεί η διεργασία της νιτροποίησης.

- Η ίδια ανάλυση ευαισθησίας σε δυναμικές συνθήκες δίνει αρκετά διαφοροποιημένα αποτελέσματα μεταξύ των συνθηκών υψηλής, μέσης και χαμηλής φόρτισης του συστήματος και, επιπρόσθετα, η ίδια η απόκριση του μοντέλου διαφοροποιείται ακόμα και στην ίδια δυναμική φόρτιση.
- Προτείνεται η περαιτέρω εμβάθυνση με εφαρμογή και αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων ανάλυσης ευαισθησίας που θα καθορίσουν εκτός από τη σχετική ευαισθησία των μεταβλητών σε κάθε παράμετρο και τους, μεταξύ των μεταβλητών, συσχετισμούς που δημιουργούνται καθώς αυτές συνολικά επιδρούν και διαμορφώνουν τις συγκεντρώσεις των συστατικών που μελετώνται. Επιπλέον, η εφαρμογή περισσότερων μεθόδων ανάλυσης ευαισθησίας θα επιτρέψει τη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων ως προς την κατάταξη των παραμέτρων από άποψη σπουδαιότητας.

Βιβλιογραφία

Ελληνικές αναφορές

- Ανδρεαδάκης Α. (2015). *Επεξεργασία και Διαχείριση Λυμάτων και Ιλύος*. Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
- Ανδρεαδάκης Α. (1986). *Σημειώσεις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας και Διάθεσης Αστικών Αποβλήτων*. Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
- Ανδρεαδάκης Α. (2011-12). *Σημειώσεις Μαθήματος Υγειονομική Τεχνολογία, Επεξεργασία Λυμάτων-Βασικές Αρχές και Διεργασίες*. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
- Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ. (2002). Σημειώσεις για το μάθημα: *Προχωρημένες Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων: Περιγραφή Μοντέλου ΙΑΩΩ*. ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών πόρων». ΕΜΠ, Αθήνα.
- Βασιλοπούλου Μ. (1999). *Μαθηματική Προσομοίωση Βιολογικού Αντιδραστήρα και Δεξαμενής Τελικής Καθίζησης Συστήματος Ενεργού Ιλύος*. Διπλωματική εργασία. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Γκόβα Ε. (2017). *Ανάπτυξη ενός Ολοκληρωμένου Μαθηματικού Μοντέλου Προσομοίωσης της Λειτουργίας Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων με Απομάκρυνση Θρεπτικών*. Διπλωματική εργασία. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Δημητρίου Ε. (2017). *Ανάπτυξη Μοντέλου Εκτίμησης Εκπομπών Υποξειδίου του Αζώτου*. Διπλωματική Εργασία. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Ιωαννίδης Χ. (2019). *Μελέτη της Επίδρασης των Χαρακτηριστικών των Λυμάτων στην Απόδοση Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων μέσω Μαθηματικής Προσομοίωσης*. Διπλωματική εργασία. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κόκκινος Η. (2017). *Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου αναερόβιας χώνευσης ιλύος*. Διπλωματική εργασία. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κολλιριάτης Π. (2013). *Μαθηματική προσομοίωση συστημάτων αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας υπογείων υδάτων για την απομάκρυνση εξασθενούς χρωμίου*. Μεταπτυχιακή εργασία. ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών πόρων». ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μαστραντωνάς Ν. (2012). *Έλεγχος επάρκειας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων μέσω μαθηματικής προσομοίωσης*. Διπλωματική εργασία. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.

- Μπούκας Ν. (2008). *Μαθηματική προσομοίωση ανάπτυξης νηματοειδών μικροοργανισμών σε σύστημα ενεργού ιλύος*. Μεταπτυχιακή εργασία. ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών πόρων». ΕΜΠ, Αθήνα.
- Σαραντόπουλος Β. (2015). *Ανάπτυξη και εφαρμογή ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων*. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Σούρλα Φ. (2013). *Έλεγχος επάρκειας συστημάτων ενεργού ιλύος με απομάκρυνση θρεπτικών μέσω μαθηματικής προσομοίωσης*. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.

Ξενόγλωσσες αναφορές

- Alex J., Magdeburg V., Benedetti L., Copp J., Gernaey K.V., Jeppsson U., Nopens I., Pons M.N., Rosen C., Steyer J.P., Vanrolleghem P.A. (2008). *Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1). Prepared by the IWA Taskgroup on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs*.
- Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H., Vavilin V.A. (2002). *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*. Water Science & Technology. 10 (Vol 45): 65–73. IWA Publishing.
- Bozkurt H., Quaglia A., Gernaey K. V., Gürkan S. (2015). *A mathematical programming framework for early stage design of wastewater treatment plants*. Environmental Modelling & Software 64: 164-176.
- Cadet C., Martins V. D. S., Dochain D. (2015). *Dynamic modeling of clarifier-thickeners for the control of wastewater treatment plants: a critical analysis*. 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC).
- Copp B.J. (2001). *The COST Simulation Benchmark: Description and Simulator Manual (a product of COST Action 624 & COST Action 682)*. COST: European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research.
- Copp B.J., Jeppsson U., Vanrolleghem P. (2008). *The Benchmark Simulation Models – A Valuable Collection of Modelling Tools*. 4th International Congress on Environmental Modelling and Software - Barcelona, Catalonia, Spain.
- Fanga F., Nia B., Li W., Shenga G., Yua H. (2011). *A simulation-based integrated approach to optimize the biological nutrient removal process in a full-scale wastewater treatment plant*. Chemical Engineering Journal 174: 635– 643.
- Flores-Alsina X., Arnell M., Amerlinckd Y., Corominas L., Gernaey K. V., Guo L., Lindblom E., Nopens I., Porrod J., Shawi A., Snip L., Vanrolleghem P. A., Jeppsson U. (2014). *Balancing effluent quality, economic cost and greenhouse gas emissions during the evaluation of (plant-wide) control/operational strategies in WWTPs*. Science of the Total Environment 466–467, 616–624.
- Flores-Alsina X., Corominas L., Snip L., Vanrolleghem P. A. (2011). *Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies*. Water Research 45:4700 -4710.

- Flores-Alsina X., Ikumi D., Batstone D., Gernaey K. V., Brouckaert C., Ekama G. A., Jeppsson U. (2012). *Towards a plant-wide Benchmark Simulation Model with simultaneous nitrogen and phosphorus removal wastewater treatment processes*.
- Grau P., Vanrolleghem P., Ayesa E. (2007). *Plant-Wide Model construction and comparative analysis with other methodologies for integrated modeling*. Water Science & Technology 8 (Vol 56): 57–65, IWA Publishing.
- Gupta D., Singh S.K. (2012). *Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A case study of Noida*. Journal of Water Sustainability, Volume 2, Issue 2: 131-139.
- Henze M., Gujer W., Mino T., Loosdrecht M. V. (2000) *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Edited by IWA task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment. IWA Publishing Scientific and Technical Report series.
- Iacopozzi I., Innocenti V., Marsili-Libelli S., Giusti E. (2007). *A modified Activated Sludge Model No. 3 (ASM3) with two-step nitrification-denitrification*. Environmental Modelling & Software 22: 847-861.
- Jeppsson U. (2004). *A General Description of the IAWQ Activated Sludge Model No. 1*. Lund Institute of Technology, Sweden.
- Jeppsson U. (2005). *Towards a benchmark simulation model for plant-wide control strategy performance evaluation of WWTPs*. Dept of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, Sweden. Presented at Benchmark meeting, Busan, Korea.
- Jeppsson U. (2008). *General Description of the BSMs and of the Plant Designs Used*. Dept of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, Sweden. Presented at IWA TG on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs, Vienna, Austria.
- Jeppsson U., Pons M.N., Nopens I., Alex J., Copp J., Gernaey K.V., Rosen C., Steyer J.P., Vanrolleghem P.A. (2007). *Benchmark Simulation Model No 2 –General Protocol and Exploratory Case Studies*. Water Sci Technol. 56 (8): 67-78.
- Keene A. N., Reusser R.S., Scarborough J.M., Grooms A.L., Seib M., Domingo J. S., Noguera D. R. (2017). *Pilot plant demonstration of stable and efficient high rate biological nutrient removal with low dissolved oxygen conditions*. Water Research 121: 72-85.
- Koumaki E., Noutsopoulos C., Sarantopoulos V., Antoniou K., Malamis S.1, Mamais D., Andreadakis A., Gioldasi M., Rosso D., Baeza J.A., Guisasola A., Gabriel D., Colón J., Lafuente J., Katsou E., Massara T., Prado O., Krieg G. (2017). *C-FOOT CTRL-tool: Development of an integrated tool for the assessment of the greenhouse gas emissions in wastewater treatment plants*. 15th International Conference on Environmental Science and Technology Rhodes, Greece (Oral paper).
- Lee H., Yun Z. (2014). *Comparison of biochemical characteristics between PAO and DPAO sludges*. Journal of Environmental Sciences 26: 1340-1347.
- Massara T.M., Malamis S., Guisasola A., Baeza J.A., Noutsopoulos C., Katsou E. (2017). *A review on nitrous oxide (N₂O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water*. Science of the Total Environment 596-597: 106-123.

- Nopens I., Benedetti L., Jeppsson U., Pons M.-N., Alex J., Copp J. B., Gernaey K. V., Rosen C., Steyer J.-P., Vanrolleghem P. A. (2010). *Benchmark Simulation Model No 2: Finalisation of plant layout and default control strategy*. Water Science & Technology 62.9, IWA Publishing.
- Noutsopoulos C., Koumaki E., Sarantopoulos V., Mamais D. (2019). *Analytical and mathematical assessment of emerging pollutants fate in a river system*. Journal of Hazardous Materials 364: 48-58.
- Rosen C., Jeppsson U. (2006). *Aspects on ADM1 implementation within the BSM2 framework*. Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Sweden.
- Rosen C., Jeppsson U., Vanrolleghem P.A. (2004). *Towards a common benchmark for long-term process control and monitoring performance evaluation*. Water Science and Technology 11 (Vol 50): 41–49, IWA Publishing.
- Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., Ratto M. (2004). *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-87093-1.
- Sperling M., Verbyla M.E., Oliveira S.M.A.C. (2020). *Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data. A guide for Students, Researchers and Practitioners*. ISBN: 9781780409320, IWA Publishing, <https://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/643390/wio9781780409320.pdf>.
- Takacs I., Patryioand G.G., Nolasco D. (1991). *A dynamic model of the clarification-thickening process*. Wat. Res., 10 (Vol. 25): 1263-1271.
- Xu H., Vilanova R. (2015). *PI and Fuzzy Control for P-removal in Wastewater Treatment Plant*. International Journal of Computers Communications & Control. 10(6): 936-951.
- Zhang R., Xie W., Yu H., Li W. (2014). *Optimizing municipal wastewater treatment plants using an improved multi-objective optimization method*. Bioresource Technology 157: 161–165.
- Zhao H. & Kümmel M. (1995). *State and parameter estimation for phosphorus removal in an alternating activated sludge process*. J. Proc. Cont. 5 (Vol. 5): 341-351.