ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ»

Μαρία Μεγαγιάννη

Επιβλέπων καθηγητής:

Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος,
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2020

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο για την άψογη συνεργασία και τη διαρκή καθοδήγηση.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη διδακτορικό του Έλενα Κουμάκη για την πολύτιμη βοήθειά της στην επεξήγηση του μοντέλου που χρησιμοποίησα για την εργασία.

Τέλος, ευχαριστώ τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου σε αυτή, όπως και σε κάθε άλλη προσπάθειά μου.

Αθήνα, Μάρτιος 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών μεθόδων ελέγχου του συστήματος αερισμού εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων μέσω μαθηματικής προσομοίωσης με κριτήρια την ποιότητα εκροής, την ενεργειακή κατανάλωση και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.

Το μοντέλο ενεργού ιλύος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση αποτελεί τροποποίηση του διεθνώς αναγνωρισμένου ASM1 της Διεθνούς Επιτροπής Νερού (IWA) και είναι ενσωματωμένο σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Στο ολοκληρωμένο μοντέλο, το οποίο αναπτύσσεται με τη χρήση της FORTRAN, περιγράφεται αναλυτικά η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε παραμέτρου του μοντέλου σε κάθε υπομονάδα της εγκατάστασης. Με την εφαρμογή του μοντέλου είναι δυνατός ο υπολογισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών των επεξεργασμένων λυμάτων και της παραγόμενης ιλύος, η καταναλισκόμενη και παραγόμενη ενέργεια, καθώς επίσης και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε κατάλληλη τροποποίηση-συμπλήρωση του ανωτέρω ολοκληρωμένου μοντέλου προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα διαφόρων εναλλακτικών μεθόδων ελέγχου του συστήματος αερισμού. Στα σενάρια τα οποία εξετάστηκαν ο έλεγχος του συστήματος αερισμού πραγματοποιήθηκε με κατάλληλη ρύθμιση της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου με βάση την επιθυμητή συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου ή/και του αμμωνιακού αζώτου στα αεριζόμενα διαμερίσματα ενός συστήματος ενεργού ιλύος. Όλα τα σενάρια μελετήθηκαν σε δυναμικές συνθήκες φόρτισης μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων για δύο τιμές του χρόνου παραμονής στερεών (5d και 10d).

Με βάση τα αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μέθοδος αναλογικού ελέγχου (proportional control) είναι η πιο ικανοποιητική ως προς τη διατήρηση του διαλυμένου οξυγόνου στα επιθυμητά επίπεδα χωρίς έντονες διακυμάνσεις, γεγονός που συνεπάγεται πολλά οφέλη για το σύστημα ελέγχου του αερισμού. Αντίθετα, η μέθοδος διακοπτόμενης λειτουργίας (on/off control) οδηγεί σε έντονες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου, κυρίως όταν το χρονικό βήμα ρύθμισης της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου είναι μεγαλύτερο από 1min. Αυτό οδηγεί σε διαταραχές στην πραγματοποίηση των βιοχημικών διεργασιών και σε επακόλουθες αστοχίες του συστήματος ελέγχου του αερισμού.

- Για επαρκή χρόνο παραμονής στερεών (SRT=10d) υπάρχουν περιθώρια μείωσης της επιθυμητής συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου από 2 mg/L σε 1,5 mg/L σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα. Οι τιμές διαλυμένου οξυγόνου που είναι πάνω από 2 mg/L όχι μόνο δεν είναι αναγκαίες στην περίπτωση αυτή, αλλά προκαλούν και διαταραχές στην ισορροπία του συστήματος.
- Για μικρό χρόνο παραμονής στερεών (SRT=5d) απαιτούνται τιμές διαλυμένου οξυγόνου πάνω από 2 mg/L.
- Ενδιαφέρουσες βελτιστοποιήσεις παρουσιάζονται σε περιπτώσεις διατήρησης διαφορετικών επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου με μειωτική τάση από διαμέρισμα σε διαμέρισμα.
- Η ενσωμάτωση της συγκέντρωσης ελέγχου του αμμωνιακού αζώτου στο σύστημα ελέγχου βελτιώνει την ποιότητα εκροής όταν αυτό είναι αναγκαίο και δημιουργεί μεγαλύτερα περιθώρια ασφαλείας κατά τη λειτουργία ενός συστήματος ενεργού ιλύος.

Λέξεις κλειδιά: *Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων, βελτιστοποίηση, σύστημα ελέγχου του αερισμού, ενεργειακή κατανάλωση, ASM1, εκπομπές υποξειδίου του αζώτου, συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, χρόνος παραμονής στερεών, έλεγχος αμμωνιακού αζώτου, ποιότητα εκροής, βιοαντιδραστήρας, νιτροποίηση, απονιτροποίηση*

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis was the evaluation of the effectiveness of alternative methods for the Wastewater Treatment Plants' aeration control system via mathematical simulation according to specific criteria; the effluent quality, the energy consumption and the greenhouse gas (GHG) emissions.

The activated sludge model that was used for the simulation, is a modification of the internationally recognised ASM1 of International Water Association (IWA) and is incorporated in a full featured model that simulates the operation of a Wastewater Treatment Plant and is developed in the Sanitary Engineering Laboratory of NTUA. In this complete model, simulated in FORTRAN, is described extensively the temporal change in the concentration of every model's parameter in every part of the plant. With the implementation of the model, the quality features of the treated wastewater and the sludge produced, as well as the consumed and produced energy and the greenhouse gas emissions can be calculated.

In the frame of this work, the proper modification-supplementation in the above complete model was carried out in order to be investigated the effectiveness of different alternative aeration system control methods. In the scenarios that were investigated the control of the aeration system was carried out with the appropriate calibration of the Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in accordance with the intended set-point for the dissolved oxygen or/and the ammoniacal nitrogen in the aerated compartments of an activated sludge system. All the scenarios were tested in dynamic loading states of a waste water treatment plant for two different Solids Retention Time values (5d and 10d).

According to the results of the mathematical simulation, the most notable conclusions are the following:

- The method of proportional control is the most satisfactory as for the maintenance of the dissolved oxygen concentration in the intended levels without significant variations and it results to many benefits in the aeration control system. Conversely, the method of on/off control results to strong fluctuations of the dissolved oxygen concentration, especially when the Volumetric Oxygen Transfer Coefficient's calibration time step is longer than 1min. It leads to disturbances in biochemical processes and subsequent failures in the aeration control system.

- For adequate Solids Retention Time (SRT=10d) the dissolved oxygen's concentration can be reduced from 2 mg/L to 1.5 mg/L in every aerated compartment of the bioreactor. Values of dissolved oxygen greater than 2 mg/L not only are useless in this occasion, but also disturb the system's balance.
- For short Solids Retention Time (SRT=5d) is required concentration of dissolved oxygen greater than 2 mg/L.
- Interesting optimizations are presented in scenarios with different concentration of dissolved oxygen in each compartment with downward trend from the one compartment to the next one.
- The inclusion of the ammoniacal nitrogen's control concentration in the control system improves the effluent quality when it is required and increases the safety margins for the operation of an activated sludge system.

Key words: *Wastewater Treatment Plants, optimization, aeration control system, energy consumption, ASM1, nitrous oxide's emissions, dissolved oxygen's concentration, Solids Retention Time, ammoniacal nitrogen control, effluent quality, bioreactor, nitrification, denitrification*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πολυπλοκότητα από την οποία χαρακτηρίζεται η λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων καθιστά σύνθετη τη μελέτη για οποιοδήποτε από τα επιμέρους στοιχεία που τη συνιστούν. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί, κυρίως από τη Διεθνή Επιτροπή Νερού (IWA), πολλά μαθηματικά μοντέλα με τα οποία προσομοιώνονται τα συστήματα ενεργού ιλύος. Με την ενσωμάτωση των μοντέλων αυτών σε ολοκληρωμένα μοντέλα προσομοίωσης Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, υπάρχει μια καθολική εικόνα της λειτουργίας, με δυνατότητα διερεύνησης των επιμέρους στοιχείων και της επίδρασης που έχουν στο σύνολο της Εγκατάστασης.

Μία από τις βασικότερες μονάδες σε μια ΕΕΛ είναι το σύστημα αερισμού, γιατί είναι υπεύθυνο σε μεγάλο βαθμό για την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αζώτου, κατά συνέπεια και για την ποιότητα εκροής της εγκατάστασης. Η παρουσία διαλυμένου οξυγόνου είναι καθοριστική για πολλές από τις βιοχημικές διεργασίες που συμβαίνουν στη μονάδα του βιολογικού αντιδραστήρα της ΕΕΛ. Παράλληλα, το σύστημα αερισμού είναι υπεύθυνο για το 45-75% της ενεργειακής κατανάλωσης σε μια ΕΕΛ, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη διαρκή προσπάθεια για βελτιστοποίησή του. Εκτός από το ενεργειακό αποτύπωμα της εγκατάστασης, το σύστημα αερισμού επηρεάζει και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και κυρίως υποξειδίου του αζώτου (N_2O). Συνολικά, το σύστημα αερισμού είναι αναγκαίο να τροποποιείται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά και τις συνθήκες λειτουργίας της ΕΕΛ, προκειμένου να ελαχιστοποιείται η ενεργειακή και περιβαλλοντική επιβάρυνση, με γνώμονα πάντα τη διατήρηση της ποιότητας εκροής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόζονται και αναλύονται εναλλακτικά σενάρια για τον έλεγχο του αερισμού στην προσομοιωμένη εγκατάσταση και διερευνάται η ευαισθησία που παρουσιάζει κάθε παράμετρος του μοντέλου σε καθένα από αυτά τα σενάρια. Οι παράμετροι που μελετώνται είναι η ποιότητα εκροής της εγκατάστασης (με χρήση του δείκτη EQI), οι τιμές του συνολικού αζώτου (TN) και του αμμωνιακού αζώτου (NH) στην έξοδο της εγκατάστασης, η ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου (KLA), ο δείκτης μεταφοράς οξυγόνου σε πρότυπες συνθήκες (SOTR), η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος αερισμού και η εκπομπή N_2O. Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά στη βασική δομή της εργασίας:

- Στο 2^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας.

- Στο 3^{ο} κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή του ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης ΕΕΛ που χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την παρούσα εργασία και στη συνέχεια των τροποποιήσεων που έγιναν πάνω στο συγκεκριμένο μοντέλο για να μελετηθεί το σύστημα ελέγχου του αερισμού.
- Στο 4^{ο} κεφάλαιο αναφέρονται αρχικά (4.1) τα βασικά χαρακτηριστικά της προσομοιωμένης εγκατάστασης και στη συνέχεια γίνεται διεξοδική ανάλυση των σεναρίων που εφαρμόστηκαν και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή τους. Πιο συγκεκριμένα, στη 2^{η} ενότητα των αποτελεσμάτων (4.2) τα τροποποιητικά σενάρια που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο αφορούν σε διαφορετικές μεθόδους ρύθμισης της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου KLA με συγκεκριμένη και σταθερή συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου. Στην 3^{η} ενότητα (4.3) εφαρμόζονται, για συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου, διαφορετικά σενάρια συγκεντρώσεων ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου. Στην 4^{η} ενότητα (4.4) στον έλεγχο του συστήματος αερισμού, ενσωματώνεται και ο έλεγχος βάσει αμμωνιακού αζώτου, εκτός από τον έλεγχο βάσει διαλυμένου οξυγόνου.
- Στο 5^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικότερα από τα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗ ΜΟΝΑΔΑ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΥΤΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση της λειτουργίας ενός συστήματος ενεργού ιλύος είναι ένα πολύτιμο εργαλείο το οποίο μπορεί να βοηθήσει τους λειτουργούς μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) να αξιολογήσουν διάφορα σενάρια λειτουργίας με στόχο τη βελτιστοποίηση. Εδώ και αρκετά χρόνια η διεθνής επιτροπή για τα νερά (IWA) έχει αναπτύξει μια σειρά μοντέλων ενεργού ιλύος τα οποία προσομοιώνουν τις βιολογικές διεργασίες απομάκρυνσης οργανικού άνθρακα και των θρεπτικών (ASIM1, ASIM2, ASIM2d, ASIM3). Η ανάγκη για βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συνόλου των έργων μίας ΕΕΛ οδήγησε στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων προσομοίωσης (BSM1, BSM2).

Το παρόν κεφάλαιο ξεκινάει με μια σύντομη περιγραφή του μοντέλου BSM1, ενός ευρέως διαδεδομένου μοντέλου που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της λειτουργίας Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων. Η προσομοίωση γίνεται για κάθε επιμέρους μονάδα του συστήματος επεξεργασίας: τις δεξαμενές αερισμού, τις δεξαμενές καθίζησης, τα συστήματα επανακυκλοφορίας, τις μονάδες πάχυνσης και αφυδάτωσης κ.ο.κ. Η περιγραφή, ωστόσο, που θα ακολουθήσει, εστιάζει στην προσομοίωση της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, καθώς εκεί χρησιμοποιείται το σύστημα αερισμού που είναι και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται μία σύντομη περιγραφή των μεθόδων αερισμού και των κύριων τρόπων ελέγχου και βελτιστοποίησης ενός συστήματος αερισμού με στόχο την μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος μίας ΕΕΛ.

Τέλος, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, και ειδικότερα στο υποξείδιο του αζώτου (N_2O), το οποίο παράγεται κατά τις αερόβιες και ανοξικές διεργασίες.

2.2 BENCHMARK SIMULATION MODEL

2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) είναι ιδιαίτερα σημαντικό και ταυτόχρονα δύσκολο να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας της. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός οτι το σύστημα λειτουργίας της είναι αρκετά περίπλοκο αποτελούμενο από πολλά συστατικά, παραμέτρους, βιοχημικές και βιολογικές διεργασίες οι οποίες εκφράζονται μέσα από πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις. Επιπροσθέτως, τα δεδομένα εισόδου σε μια ΕΕΛ παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις και είναι αρκετοί οι αστάθμητοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το εύρος των τιμών τους. Παρόλα αυτά, είναι αναγκαίο να γίνονται διαρκείς προσπάθειες για την εύρεση του βέλτιστου δυνατού τρόπου λειτουργίας, ο οποίος προϋποθέτει τη διατήρηση της ποιότητας εκροής σε επιθυμητά επίπεδα με τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, εκπομπή ρύπων και το χαμηλότερο δυνατό κόστος λειτουργίας. Τα όρια που πρέπει να ικανοποιούνται στην έξοδο μιας ΕΕΛ καθορίζονται από την Ευρωπαϊκή οδηγία 91/271.

Η παραπάνω αναγκαιότητα οδήγησε στην ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης Benchmark. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε αρχικά (1998-2004) από την COST Action 682 and 624 (Alex et al., 1999) και συνεχίστηκε στην πορεία από την ομάδα του International Water Association (IWA) που εξειδικεύεται σε μοντέλα Benchmark πάνω σε στρατηγικές ελέγχου σε Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων. Το μοντέλο Benchmark δεν αντιστοιχεί σε κάποιο συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοίωσης, αλλά μπορεί να αναπτυχθεί με χρήση κώδικα (C,C++, FORTRAN).

2.2.2 BENCHMARK SIMULATION MODEL 1 (BSM1)

Το BSM1 είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο ενεργού ιλύος. Αποτελείται από βιοαντιδραστήρα με 5 διαμερίσματα εκ των οποίων τα πρώτα δύο είναι σε ανοξικές συνθήκες, ενώ τα επόμενα 3 σε αερόβιες. Ο συνδυασμός απονιτροποίησης (στις ανοξικές συνθήκες) και νιτροποίησης (στις αερόβιες συνθηκες) εξασφαλίζει την απομάκρυνση αζώτου από το σύστημα. Στα αερόβια διαμερίσματα ρυθμίζονται τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (DO) για να πραγματοποιούνται οι αερόβιες διεργασίες. Στα πρώτα 2 αερόβια διαμερίσματα ο συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου KLA είναι σταθερός και ίσος με 10 h^{-1}, ενώ στο 3^o και τελευταίο αερόβιο διαμέρισμα το KLA ρυθμίζεται προκειμένου να διατηρείται το DO σε συγκεκριμένα επίπεδα (2 mg/L). Ο έλεγχος των νιτρικών στο σύστημα γίνεται στην τελευταία ανοξική δεξαμενή με τη ρύθμιση της εσωτερικής επανακυκλοφορίας των λυμάτων. Οι αερόβιες δεξαμενές έχουν όγκο V=1333 m^3 έκαστη, ενώ οι ανοξικές έχουν V=1000 m^3 έκαστη. Στο μοντέλο περιλαμβάνεται και δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης της οποίας ο όγκος είναι 6000 m^3.

Το BSM1 είναι σχεδιασμένο για παροχή εισόδου (υπό ξηρές συνθήκες) 18.446 m^3/d κατά μέσο όρο. Το εισερχόμενο COD είναι 300 mg/L, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, όπως προκύπτει από τη δεδομένη παροχή και από τον όγκο του βιοαντιδραστήρα και της δεξαμενής καθίζησης μαζί, είναι 14.4 h. Οι απώλειες (λάσπη) του συστήματος είναι 385 m^3/d και αντιστοιχούν σε χρόνο παραμονής στερεών στο σύστημα 9d. Στο μοντέλο μπορούν να εισαχθούν 3 διαφορετικά σενάρια για τις δυναμικές συνθήκες: ξηρές συνθήκες, συνδυασμός βροχερών και ξηρών συνθηκών και συνδυασμός ξηρών συνθηκών με έντονη καταιγίδα.

Οι βιολογικές διεργασίες του μοντέλου, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσα στο βιολογικό αντιδραστήρα, περιγράφονται από το Activated Sludge Model 1 (ASM1).

2.2.3 ACTIVATED SLUDGE MODEL 1 (ASM1)

Το μοντέλο ενεργού ιλύος ASM1 χρησιμοποιείται για τη μαθηματική προσομοίωση των βιολογικών διεργασιών του μοντέλου BSM1. Αποτελείται από ένα σύνολο συστατικών, διεργασιών και μαθηματικών εξισώσεων που υπολογίζουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε στοιχείου κάθε χρονική στιγμή.

<u>ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ASM1</u>

S_I : μη βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη

S_S : εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη

X_I : μη βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη

X_S : αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη

X_{BH} : ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί

X_{BA} : αυτοτροφικοί μικροοργανισμοί

X_P : σωματιδιακή ύλη από τη φθορά των μικροοργανισμών

S_O : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου

S_{NO} : νιτρικά

S_{NH} : αμμωνιακό άζωτο

S_{ND} : διαλυτό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο

X_{ND} : σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο

S_{ALK} : αλκαλικότητα

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ASM1

Αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών:

$\rho_1 = \mu_H * \frac{Ss}{Ks+Ss} * \frac{SO}{KOH+SO} * X_{BH}$

Ανοξική ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών:

$\rho_2 = \mu_H * \frac{Ss}{Ks+Ss} * \frac{SNO}{KNO+SNO} * \frac{KOH}{KOH+SO} * X_{BH}$

Αερόβια ανάπτυξη αυτοτροφικών μικροοργανισμών:

$\rho_3 = \mu_A * \frac{SNH}{KNH+SNH} * \frac{SO}{KOA+SO} * X_{BA}$

Αποσύνθεση ετεροτροφικών μικροοργανισμών:

$\rho_4 = b_H * X_{BH}$

Αποσύνθεση αυτοτροφικών μικροοργανισμών:

$\rho_5 = b_A * X_{BA}$

Αμμωνιοποίηση του διαλυτού οργανικού αζώτου:

$\rho_6 = ka * S_{ND} * X_{BH}$

Υδρόλυση παγιδευμένης οργανικής ύλης:

$\rho_7 = k_H * \frac{Xs/XBH}{Kx + Xs/XBH} * [\frac{SO}{KOH+SO} + \eta_h * \frac{KOH}{KOH+SO} * \frac{SNO}{KNO+SNO}] * X_{BH}$

Υδρόλυση παγιδευμένου οργανικού αζώτου:

$\rho_8 = k_H * \frac{Xs/XBH}{Kx + Xs/XBH} * [\frac{SO}{KOH+SO} + \eta_h * \frac{KOH}{KOH+SO} * \frac{SNO}{KNO+SNO}] * X_{BH} * \frac{XND}{Xs}$

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι διεργασίες αυτές προκαλούν τη μεταβολή των συγκεντρώσεων των 13 συστατικών του μοντέλου ASM1 που αναφέρθηκαν παραπάνω, σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$DS_I = 0$ (η συγκέντρωση της αδρανούς οργανικής ύλης δεν μεταβάλλεται μέσα στο σύστημα)

$DS_S = -\frac{1}{YH} * \rho_1 - \frac{1}{YH} * \rho_2 + \rho_7$

$DX_I = 0$ (ομοίως με το DS_I)

$DX_S = (1-f_p)*\rho_4 + (1-f_p)*\rho_5 - \rho_7$

$DX_{BH} = \rho_1 + \rho_2 - \rho_4$

$DX_{BA} = \rho_3 - \rho_5$

$DX_P = f_p*\rho_4 + f_p*\rho_5$

$DS_O = -\frac{1-YH}{YH} * \rho_1 - \frac{4.57-YA}{YA} * \rho_3$

$DS_{NO} = -\frac{1-YH}{2.86*YH} * \rho_2 + \frac{1}{YA} * \rho_3$

$DS_{NH} = -i_{XB}*\rho_1 - i_{XB}*\rho_2 - (i_{XB} + \frac{1}{YA})*\rho_3 + \rho_6$

$DS_{ND} = -\rho_6 + \rho_8$

$DX_{ND} = (i_{XB} - f_p*i_{XP})*\rho_4 + (i_{XB} - f_p*i_{XP})*\rho_5 - \rho_8$

$DS_{ALK} = -\frac{iXB}{14} * \rho_1 + (\frac{1-YH}{14*2.86*YH} - \frac{iXB}{14}) * \rho_2 - (\frac{iXB}{14} - \frac{1}{7*YA}) * \rho_3 + \frac{1}{14} * \rho_6$

2.2.4 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ BSM1

Για να πραγματοποιηθεί η αρχικοποίηση του μοντέλου, το πρόγραμμα εκτελείται πρώτα για σταθερές συνθήκες εισόδου σε κλειστό βρόχο. Συγκεκριμένα, εισάγονται οι μέσοι όροι των δεδομένων εισόδου και δεν λαμβάνονται υπόψιν οι διακυμάνσεις. Ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης με σταθερές συνθήκες εισόδου εξαρτάται από το χρόνο παραμονής στερεών στο σύστημα και πρέπει να είναι περίπου 10πλάσιος από αυτόν. Για το μοντέλο αυτό η περίοδος σταθεροποίησης των συνθηκών είναι 100d. Στη συνέχεια εισάγονται στο σύστημα τα πραγματικά δεδομένα εισόδου (φορτία και παροχή).

Βασικός στόχος της προσομοίωσης είναι να εξεταστούν τρόποι βελτίωσης της λειτουργίας της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων με γνώμονα πάντα τη διατήρηση της ποιότητας εκροής. Τα όρια που πρέπει να ικανοποιούνται στην έξοδο σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 91/271 παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2.2.4.1 Μέγιστα επιτρεπόμενα όρια εκροής για το μοντέλο BSM1, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 91/271

	Όρια εκροής
N_{tot}	18 mg N/L
COD	100 mg/L
S_{NH}	4 mg N/L
TSS	30 mg SS/L
BOD_5	10mg/L

Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας του μοντέλου γίνεται με δύο βασικούς τρόπους:

- Μέσω των διακυμάνσεων που παρουσιάζει η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου και της απόκλισης από την τιμή της συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου
- Μέσω της γενικότερης επίδρασης που έχει ο έλεγχος του οξυγόνου στους εξής επιμέρους παράγοντες
    I. ποιότητα εκροής
    II. κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης (παραγωγή ιλύος για διάθεση, ενέργεια συστήματος αερισμού, ενέργεια αντλιοστασίου, χρήση πηγής άνθρακα εκτός αυτής του ίδιου του συστήματος, ενέργεια ανάδευσης)

Διεξοδικότερη ανάλυση και περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα εισόδου, τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης που προσομοιώνει το μοντέλο BSM1 μπορεί να αναζητήσει κανείς στο εγχειρίδιο των J. Alex et al., 2008 "Benchmark Simulation Model No 1(BSM1)"

2.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 2% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, αφορά στην ενέργεια που καταναλώνεται για την παροχέτευση νερού και για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε όλο τον κόσμο (M.Vaccari et al.,2018). Σε μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων η συνολική κατανάλωση ενέργειας καθορίζεται κυρίως από την ενέργεια που καταναλώνεται για τον αερισμό, καθώς αυτή αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της (45-75%)(Mogens Henze et al., 2008).

Τις τελευταίες δεκαετίες αναζητούνται τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος αερισμού, κατά συνέπεια και το κόστος αερισμού, ακόμα και σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Για τη βελτίωση του ενεργειακού αποτυπώματος είναι σκόπιμο να δοθεί έμφαση στη ρύθμιση της ζήτησης και όχι μόνο στη διαχείριση της ενέργειας . Μελετώνται εναλλακτικοί τρόποι ρύθμισης της παροχέτευσης οξυγόνου και γίνονται προσπάθειες για καλύτερη αυτοματοποίηση της διαδικασίας αυτής ώστε το οξυγόνο που διοχετεύεται στο σύστημα να είναι όσο ακριβώς απαιτείται (με κάποια επιτρεπόμενη απόκλιση) ώστε να διατηρούνται οι συνθήκες που είναι αναγκαίες για την πραγματοποίηση των διεργασίων του συστήματος.

2.3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Στο υποκεφάλαιο αυτό ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των βασικών συστημάτων αερισμού που χρησιμοποιούνται στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων και αναφέρονται τα οφέλη που παρουσιάζει καθένα από αυτά.

Τα συστήματα αερισμού είναι υπέυθυνα για τη μεταφορά οξυγόνου στο υγρό μέσο. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με ανάμιξη της υγρής επιφάνειας με αναμικτήρα ή τουρμπίνα είτε με απελευθέρωση αέρα μέσα από οπές ή πορώδη υλικά είτε με άμεση επαφή του αέρα με μια μεγάλη επιφάνεια νερού.

Όταν αναλύονται τα διάφορα συστήματα αερισμού είναι σημαντικό να καθορίζονται κάποιες παράμετροι αποδοτικότητας. Η πιο βασική παράμετρος είναι ο δείκτης μεταφοράς οξυγόνου, OTR (Oxygen Transfer Rate) , ο οποίος εκφράζεται από τον τύπο OTR=KLA*(DO-DOsat)*V. Ως KLA ορίζεται ο συντελεστής μεταφοράς μάζας

(h^{-1}), ως DO το διαλυμένο οξυγόνο (kgO_2/m^3) ενώ DOsat είναι το διαλυμένο οξυγόνο στο βιοαντιδραστήρα σε συνθήκες κορεσμού. V είναι ο όγκος του υγρού στοιχείου. Το OTR ποσοτικοποιεί το οξυγόνο που μπορεί να διοχετευτεί στο νερό ανά μονάδα χρόνου. Όμως, η απόδοση του αερισμού διαφέρει στην περίπτωση των λυμάτων που είναι υπό επεξεργασία σε σχέση με την περίπτωση του καθαρού νερού, γιατί τα λύματα περίεχουν διάφορα συστατικά που εμποδίζουν τη μεταφορά του οξυγόνου. Για το λόγο αυτό ορίζεται ο συντελεστής α ο οποίος εκφράζει το λόγο του συντελεστή μεταφοράς μάζας λυμάτων προς τον αντίστοιχο συντελεστή για το καθαρό νερό.

Τα βασικά συστήματα με τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η διαδικασία του αερισμού σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων είναι:

- επιφανειακοί αεριστές: είναι από τα πρώτα συστήματα αερισμού που εφαρμόστηκαν σε εγκαταστασεις επεξεργασίας λυμάτων. Υπάρχουν αεριστές υψηλής και χαμηλής ταχύτητας. Δεν συνιστώνται για χρήση σε δεξαμενές μεγάλου βάθους (πάνω από 4-5 m). Επιπρόσθετα σε δεξαμενές μεγάλου πλάτους, ενδέχεται να μην καλύπτουν τις ανάγκες αερισμού στα ακραία τμήματα των δεξαμενών.

- διαχυτήρες με μεγάλη φυσαλίδα (Coarse-bubble systems): απελευθερώνουν φυσαλίδες αέρα διαμέτρου μεγαλύτερης από 50mm. Παρουσιάζουν πιο έντονη τύρβη σε σχέση με τους διαχυτήρες λεπτής φυσαλίδας (Fine-bubble systems) και συνεπώς ο συντελεστής α είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν των Fine-bubble systems (Kessener and Ribbius, 1935; Rosso and Stenstrom 2006). Ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των διαχυτήρων στον πυθμένα της δεξαμενής, είναι διαφορετική η αποδοτικότητα του συστήματος και το ενεργειακό κόστος. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται γενικά από μειωμένη αποδοτικότητα (μικρός λόγος επιφάνειας προς όγκο), αλλά από την άλλη λόγω των μεγάλων τους διαστάσεων και της έντονης τύρβης δεν παρεμποδίζεται εύκολα η κίνησή τους.

- διαχυτήρες με λεπτή φυσαλίδα (Fine-bubble systems): Μπορούν να παραχθούν είτε με απελευθέρωση αέρα από μια πορώδη επιφάνεια, είτε με μηχανική διάσπαση μεγάλων φυσαλίδων σε μικρότερες. Τα τελευταία χρόνια είναι διαδεδομένη η χρήση διαχυτήρων (Fine-pore diffusers), οι οποίοι απελευθερώνουν συμπιεσμένο αέρα μέσω μεμβρανών ή κάποιου πορώδους υλικού. Χαρακτηρίζονται από καλή αποδοτικότητα, αλλά έχουν χαμηλό λόγο α.

Ένα σύστημα διάχυτου αερισμού απαιτεί τη χρήση φυσητήρων. Πρόκειται για συμπιεστές του αέρα που λειτουργούν σε χαμηλή πίεση για αερισμό που πραγματοποιείται κάτω από την επιφάνεια του υγρού.

Σχήμα 2.3.2.1 Σύστημα διάχυτου αερισμού στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας (πηγή: Σημειώσεις μαθήματος "Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας & Διάθεσης Αστικών Απόβλητων" 9^{ου} εξαμήνου της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών)

2.3.3 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ ΖΗΤΗΣΗΣ ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΚΑΤΑ ΤΙΑ ΑΕΡΟΒΙΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

Οι έντονες αυξομειώσεις (peaks) στη ζήτηση οξυγόνου προκαλούν μεγάλη ενεργειακή επιβάρυνση στη λειτουργία των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (I.Aymerich et al.,2015). Υπάρχουν αρκετά πιθανά μέτρα τα οποία θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για τη μείωση ή τη χρονική ρύθμιση των ακραίων τιμών ζήτησης στο χρόνο. Ένα από αυτά είναι ο έλεγχος του αερισμού, ο οποίος αποτελεί το βασικό καταναλωτή ενέργειας σε ένα σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (Reardon, 1995; Rosso and Stenstrom, 2005; WEF, 2009). Ο έλεγχος του αερισμού έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία τις τελευταίες δεκαετίες και έχει επιτευχθεί μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης μέχρι και 30% (Olsson, 2012; Amand et al., 2013).

Ο έλεγχος του αερισμού σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων βασίζεται κυρίως στη ρύθμιση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα και στη διατήρηση της ποιότητας εκροής. Στα πλαίσια μελέτης περίπτωσης (*I. Aymerich et al.,2015)* σχετικά με τη διαβαθμισμένη κοστολόγηση της ενέργειας σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, προσομοιώθηκαν 3 διαφορετικά σενάρια ρύθμισης της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια. Σε κάθε περίπτωση η ρύθμιση γίνεται μέσω του ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου (DO) και του αμμωνιακού αζώτου (NH) .

Με τους τρόπους ελέγχου του αερισμού που μελετώνται, επιδιώκεται αρχικά η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου να είναι σε συγκεκριμένα προκαθορισμένα επίπεδα τα οποία δεν θα αφήνουν το περιθώριο δημιουργίας ελλείμματος. Σε δεύτερη φάση, διερευνώνται τρόποι με τους οποίους η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου κάθε χρονική στιγμή στο σύστημα, όχι μόνο θα μπορεί να προσεγγίζει επαρκώς μια προκαθορισμένη τιμή ελέγχου, αλλά και θα προσαρμόζεται στις ανάγκες που υπάρχουν σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει οτι η τιμή αυτή μπορεί να μην είναι προκαθορισμένη, αλλά ανάλογα με τα φορτία που δέχεται το σύστημα ή την αποδοτικότητα των διεργασίων μπορεί να απαιτηθεί να είναι υψηλότερη ή να υπάρχει η δυνατότητα να είναι χαμηλότερη.

Ένας από τους πιο διαδεδομένους πλεόν μηχανισμούς ελέγχου των μεταβλητών ενός μοντέλου ώστε οι τιμές τους να κυμαίνονται γύρω από συγκεκριμένα όρια είναι ο PID (Proportional, Integral, Derivative) controller. Είναι διαδεδομένος γιατί αποτελεί απλό μηχανισμό που όμως επιτυγχάνει μεγάλη ακρίβεια καθώς ο έλεγχος πραγματοποιείται σε κλειστό βρόχο ανάδρασης. Αυτό σημαίνει οτι κάθε αλλαγή της μεταβλητής γίνεται βάσει της τελευταίας τιμής που είχε η μεταβλητή με αναλογική αύξηση ή μείωση αυτής, ελέγχοντας με αυτό τον τρόπο να είναι μικρές οι “μετατοπίσεις” γύρω από τη συγκέντρωση ελέγχου (set-point).

Οι εναλλακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν σε καθένα από τα σενάρια προσομοίωσης για τη μελέτη περίπτωσης (I. Aymerich et al., 2015) είναι:

- <u>Βασική στρατηγική ελέγχου DO με αναλογικό τρόπο (PI controller)</u>
  Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ρυθμίζεται στο 2^{o} αεριζόμενο διαμέρισμα ώστε να είναι ίση με 2.5 mg/L. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση των PI controllers, που μετρούν τη συγκέντρωση και ρυθμίζουν τη διοχέτευση οξυγόνου στο σύστημα ανάλογα με την έλλειψη ή την περίσσεια που υπάρχει, ώστε να διατηρείται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα καθορισμένα επίπεδα των 2.5 mg/L.

- <u>Έλεγχος NH με διακοπτόμενη λειτουργία (on/off)</u>
  Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο κριτήρια ελέγχου: το κύριο κριτήριο βασίζεται στο αμμωνιακό άζωτο και το δευτερεύον στο διαλυμένο οξυγόνο.

Αρχικά, ελέγχεται αν το αμμωνιακό άζωτο στο τελευταίο αερόβιο διαμέρισμα είναι κάτω από το όριο ελέγχου (NH set-point). Όταν το αμμωνιακό άζωτο στο σημείο αυτό της εγκατάστασης είναι πάνω από 3.5 mg/L, τότε ενεργοποιείται ο PI controller του διαλυμένου οξυγόνου, ενώ όταν το αμμωνιακό άζωτο είναι κάτω από 2.5 mg/L, τότε ο PI controller του διαλυμένου οξυγόνου απενεργοποιείται. Όταν ο PI controller είναι ενεργοποιημένος, η συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου καθορίζεται στα 2.5 mg/L.

- Έλεγχος NH με αναλογικό τρόπο (PID controller)

  Η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στο τελευταίο αερόβιο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα ελέγχεται ώστε να είναι ίση με 3mg/L . Η διατήρηση του NH σε αυτά τα επίπεδα επιτυγχάνεται με χρήση PID controller που προσαρμόζει τα ρυθμιζόμενα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου στο 2^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα μεταξύ των τιμών 0.1mg/L και 2.5mg/L.

Έπειτα από σύγκριση των παραπάνω μεθόδων, προέκυψε οτι ο έλεγχος NH με χρήση PID controller, δηλαδή η 3^{η} μέθοδος, οδηγεί σε καλύτερη απομάκρυνση αζώτου από το σύστημα και με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Δεύτερη καλύτερη μέθοδος φάνηκε να είναι ο έλεγχος NH με διακοπτόμενη λειτουργία. Η λιγότερο αποτελεσματική μέθοδος ήταν ο απλός έλεγχος διαλυμένου οξυγόνου χωρίς προσαρμογή βάσει των ορίων του αμμωνιακού αζώτου.

Εστιάζοντας στην κοστολόγηση ελέγχου του αερισμού, για καθεμία από τις 3 μεθόδους, όπου λαμβάνονται περισσότερο υπόψιν οι ακραίες τιμές της ενεργειακής κατανάλωσης, οι μέθοδοι που λειτουργούν βάσει των PI controllers (1^{η} και 3^{η} μέθοδος), δηλαδή με αναλογικό τρόπο προσαρμογής της διοχέτευσης διαλυμένου οξυγόνου, είναι λιγότερο κοστοβόρες σε σχέση με αυτές που λειτουργούν διακοπτόμενα (on/off). Αυτό συμβαίνει γιατί η διακοπτόμενη λειτουργία, λόγω της απότομης μεταβολής της παροχέτευσης οξυγόνου, οδηγεί σε μεγάλες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου από το ένα χρονικό διάστημα στο επόμενο. Αυτό οδηγεί και σε μεγάλη διακύμανση των τιμών της ζήτησης οξυγόνου με αποτέλεσμα πιο ακραίες τιμές στην κατανάλωση ενέργειας. Αντίθετα, με PI controller η ζήτηση μεταβάλλεται πολύ πιο ομαλά με αποτέλεσμα να μην δημιουργεί απότομες αιχμές (peaks), που δημιουργούν υψηλές απαιτήσεις για ενέργεια στο σύστημα.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη μελέτη περίπτωσης μπορεί να ανατρέξει κανείς στη σχετική δημοσίευση των I. Aymerich , L. Rieger, R. Sobhani , D. Rosso, Ll.

Corominas,2015, The difference between energy consumption and energy cost: Modelling energy tariff structures for water resource recovery facilities.

2.3.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΔΙΑΛΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ

Ο καθορισμός της τιμής για τη συγκέντρωση ελέγχου (set-point) του διαλυμένου οξυγόνου στο βιολογικό αντιδραστήρα μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων είναι κρίσιμο στοιχείο για την αποτελεσματική απομάκρυνση των θρεπτικών (φωσφόρου και αζώτου), για τα οποία πρέπει να τηρούνται συγκεκριμένα όρια στην εκροή σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 91/271/ΕΕ (F.J. Fernández et al., 2011). Ταυτόχρονα, είναι σημαντικός, γιατί όπως προαναφέρθηκε, ο αερισμός αποτελεί το βασικότερο παράγοντα καθορισμού του λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης. Συνεπώς, καθίσταται αναγκαίος ο καθορισμός μιας τιμής για το set-point που θα οδηγεί σε ικανοποιητική ποιότητα εκροής με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

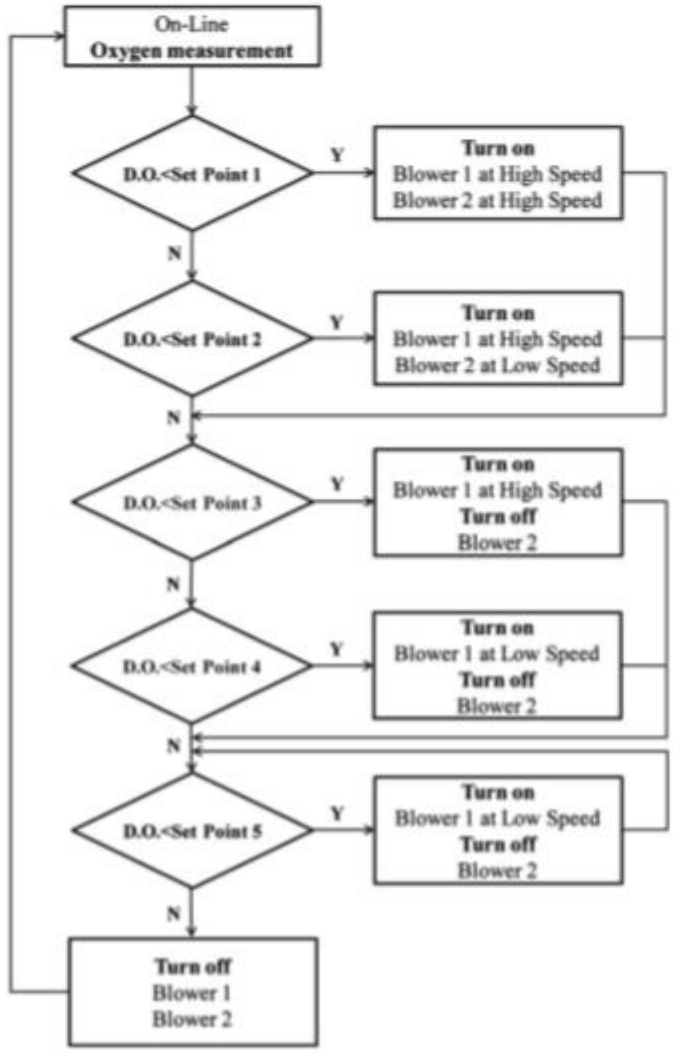
Πρώτο βήμα για την επιλογή του set-point είναι να ικανοποιούνται τα όρια εξόδου. Στη συνέχεια, με τη χρήση ενός εκ των μοντέλων ASM, που προτείνονται από τη Διεθνή Επιτροπή Νερών (International Water Association) (IWA, 2000), γίνεται περαιτέρω διερεύνηση για τη βέλτιστη επιλογή. Ακολουθεί ο σχεδιασμός και η παραμετροποίηση του βρόχου ελέγχου, ώστε σε κάθε χρονικό βήμα η τιμή της συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου να μην έχει μεγάλη διαφορά από την τιμή του προηγούμενου χρονικού βήματος. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω είναι απαραίτητες μερικές προσομοιώσεις σε δυναμικές συνθήκες εισόδου με διαφορετικές παροχές και φορτία. (F.J. Fernández et al., 2011)

Μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες μέθοδοι ελέγχου του αερισμού: με απλή διακοπτόμενη λειτουργία (on/off), διακοπτόμενης λειτουργίας με πολλαπλά ρυθμιζόμενα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (multi-set point), με χρήση των PID controllers, και με χρήση ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, οι PID controllers αποτελούν μια αρκετά ικανοποιητική επιλογή για τα συστήματα ελέγχου του αερισμού. Ωστόσο, σε μικρές εγκαταστάσεις όπου δεν υπάρχουν εξελιγμένα συστήματα για να παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες και ο εξοπλισμός είναι ελλιπής , η χρήση των PID controllers δεν είναι συνηθισμένη και επιλέγεται συχνότερα η μέθοδος on/off (O’Brien, Mack, Lennox, Lovett, &Wall, 2011). Με αυτή τη μέθοδο, όταν η συγκέντρωση του οξυγόνου φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα, διακόπτεται η παροχέτευση αέρα. Επειδή πρόκειται για αρκετά απλουστευτική μέθοδο, έχουν αναπτυχθεί και πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι, βασισμένοι σε αυτή, με τους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα εκροής με ταυτόχρονη μείωση του κόστους. (Ferrer, Rodrigo, Seco, & Penya-roja, 1998; Piotrowski, Brdys, Konarczak, Duzinkiewicz,& Chotkowski, 2008; Rodrigo, Seco, Ferrer, Penya-roja, & Valverde, 1999).

Μία μέθοδος που βασίζεται στη διακοπτόμενη λειτουργία (on/off control) και αποτελεί εξέλιξη αυτής είναι η μέθοδος διακοπτόμενης λειτουργίας με πολλαπλά επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (multi-set point on/off controller). Σε αυτή την περίπτωση, η παροχέτευση αέρα δεν έχει μόνο 2 επίπεδα λειτουργίας, το “on” και το “off”, αλλά λειτουργεί και σε πεπερασμένες ενδιάμεσες θέσεις ανάλογα με το βαθμό έλλειψης ή περίσσειας οξυγόνου στο σύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τιμή διαλυμένου οξυγόνου που θα προσφέρεται κάθε χρονική στιγμή στο σύστημα να ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στις πραγματικές ανάγκες του συστήματος.

Στα πλαίσια της μελέτης περίπτωσης των F.J. Fernández et al.,(2011), διερευνήθηκε η βελτιστοποίηση του συστήματος αερισμού με χρήση του multi-set point on/off controller, μέσω της κατάλληλης επιλογής ρυθμιζόμενων επιπέδων οξυγόνου.

Στη συγκεκριμένη μελετη, ο αερισμός της εγκατάστασης βασίζεται στη λειτουργία 3 φυσητήρων, εκ των οποίων μόνο οι δύο μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα. Οι φυσητήρες έχουν 3 καταστάσεις λειτουργίας: ανενεργοί, χαμηλής ταχύτητας, υψηλής ταχύτητας. Η λειτουργία τους ελέγχεται με τη μέθοδο multi-set point on/off controller στην οποία υπάρχουν 5 ενδιάμεσα επίπεδα ελέγχου οξυγόνου. Το διάγραμμα ροής που περιγράφει την αρχή λειτουργίας της μεθόδου ελέγχου που εφαρμόστηκε για τη μελέτη περίπτωσης των F.J. Fernández et al.,(2011) φαίνεται στη συνέχεια.



Σχήμα 2.3.4.1 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου multi-set point on/off control (F.J. Fernández et al.,2011)

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της συγκεκριμένης μελέτης βασίστηκε στο ASM1, το οποίο λαμβάνει υπόψιν τις βασικότερες από τις διεργασίες κατανάλωσης διαλυμένου οξυγόνου στο βιοαντιδραστήρα: την απομάκρυνση αζώτου και οργανικού φορτίου. Για την εύρεση των βέλτιστων συγκεντρώσεων ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου ώστε να ελαχιστοποιείται η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος αερισμού, αναπτύχθηκε λογισμικό βασισμένο στον αλγόριθμο Rosenbrock (Rosenbrock, 1960). Στη συνέχεια, η βέλτιστη λύση ελέγχθηκε με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης ASIM v. 3.0 (Gujer & Larsen, 1995), για να επιβεβαιωθεί οτι γίνεται ικανοποιητική απομάκρυνση αζώτου και οργανικού φορτίου.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα λογισμικά και τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν για τη μελέτη αυτή μπορεί κανείς να ανατρέξει στη δημοσίευση F.J. Fernández, M.C. Castro, M.A. Rodrigo, P. Cañizares, 2011, Reduction of aeration costs by tuning a multi-set point on/off controller: A case study

Η εύρεση των βέλτιστων τιμών για τη συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου οδηγεί σε καλύτερη σταθεροποίηση των επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου στο βιοαντιδραστήρα. Παρατηρείται σταθερότερη και χαμηλότερη παροχή οξυγόνου στο σύστημα, τα οποία συνεπάγονται εξοικονόμηση ενέργειας. Συγκεκριμένα, για τη μελέτη περίπτωσης στην οποία γίνεται αναφορά, η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε μια περίοδο 5 ημερών ήταν της τάξεως του 17%.

Συμπερασματικά, παίρνοντας ως παράδειγμα και αναλύοντας τη μελέτη των F.J. Fernández et al.,2011, η βέλτιστη επιλογή των ρυθμιζόμενων επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά και πρόσθετα οφέλη, όπως την βελτίωση της ποιότητας της ιλύος.

2.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

2.4.1 ΑΕΡΙΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΙ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

Η παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου είναι βασική παράμετρος για την αξιολόγηση της λειτουργίας μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ). Τα βασικότερα αέρια του θερμοκηπίου που παράγονται σε μία ΕΕΛ είναι το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το μεθάνιο (CH_4) (T.M.Massara et al.,2017)

Διοξείδιο του άνθρακα:

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) παράγεται μέσω του οργανικού φορτίου BOD σε αναερόβιες συνθήκες. Επίσης ένα μέρος της βιομάζας μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα, μέσω της ενδογενούς αναπνοής. Μια ακόμη διαδικασία που ευθύνεται για την παραγωγή CO_2 είναι η αναερόβια χώνευση της ιλύος. Σε αερόβιες συνθήκες το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται από τη διάσπαση της οργανικής ύλης. Τέλος, ποσότητα CO_2 παράγεται και κατά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. (Gupta and Singh,2012)

Μεθάνιο:
Σε αναερόβιες συνθήκες, το μεθάνιο παράγεται από ένα μέρος του οργανικού φορτίου BOD. Επίσης, όπως και το διοξείδιο του άνθρακα, παράγεται μέσω της ενδογενούς αναπνοής από ένα μέρος της βιομάζας. Εκτός από την επεξεργασία των λυμάτων, μεθάνιο εκλύεται και κατά την επεξεργασία της ιλύος. Γενικά, το μέγεθος των εκπομπών CH_4 εξαρτάται από την ποσότητα της διασπάσιμης οργανικής ύλης, από τη θερμοκρασία και από το σύστημα επεξεργασίας.

Υποξείδιο του αζώτου
Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται κατά τις διεργασίες της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης. Η νιτροποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής του αμμωνιακού αζώτου (NH) σε νιτρικά (NO_3), ενώ η απονιτροποίηση είναι η μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο (N_2) το οποίο στη συνέχεια εκλύεται στην ατμόσφαιρα. Οι δύο αυτές διεργασίες πραγματοποιούνται σε πολλά στάδια αλλά το υποξείδιο του αζώτου παράγεται σε συγκεκριμένα από αυτά. Οι τρόποι με τους οποίους προκαλούνται οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου θα αναλυθούν εκτενέστερα στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται μόνο οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου, καθώς το σύστημα αερισμού που είναι το αντικείμενο μελέτης της εργασίας σχετίζεται κυρίως με το συγκεκριμένο αέριο του θερμοκηπίου. Για περισσότερα στοιχεία σχετικά με τα επιμέρους αέρια του θερμοκηπίου, μπορεί κανείς να πληροφορηθεί από τη δημοσίευση των Diksha Gupta and Santosh Kumar Singh, 2012, Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A Case Study of Noida.

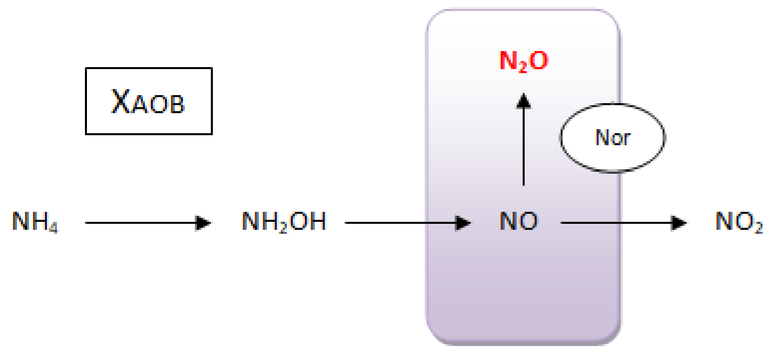
2.4.1 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΥΠΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ

Το υποξείδιο του αζώτου σε μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων παράγεται μέσω των διεργασιών της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης που πραγματοποιούνται σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες, αντίστοιχα. Καθεμία από αυτές τις διεργασίες πραγματοποιείται σε περισσότερα από ένα στάδια και η παραγωγή υποξειδίου του αζώτου γίνεται σε συγκεκριμένα από αυτά τα στάδια. Ειδικότερα, τα N_2O παράγονται με 4 διαφορετικούς τρόπους (Poquet, 2015). Η Νιτροποίηση Νιτροποιητών, η Χημική διάσπαση και η Απονιτροποίηση Νιτροποιητών πραγματοποιούνται από τα υπεύθυνα για την οξείδωση της αμμωνίας βακτήρια

(XAOB), ενώ η τέταρτη διαδικασία παραγωγής N_2O είναι η απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

Νιτροποίηση Νιτροποιητών:

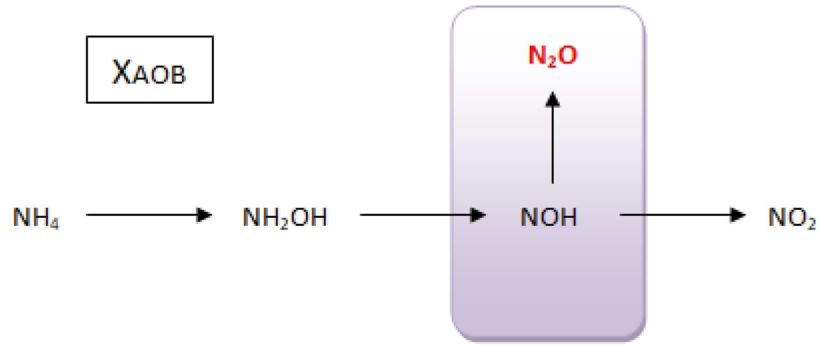
Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης μέσω της οξείδωσης του μονοξειδίου του αζώτου (NO) σε νιτρώδη (NO_2). Η ανάπτυξη του μοντέλου που περιγράφει αυτή τη διαδικασία παραγωγής N_2O πραγματοποιήθηκε από τους Ni et al., (2013). Κατά τη διαδικασία αυτή, ένα μέρος του NO παράγει N_2O με παρουσία του ενζύμου Nor, ενώ το υπόλοιπο οξειδώνεται σε NO_2.



Σχήμα 2.4.1.1 Παραγωγή N_2O μέσω της Νιτροποίησης Νιτροποιητών (βασισμένο σε Σχηματική απεικόνιση του Poquet, 2015)

Χημική διάσπαση:

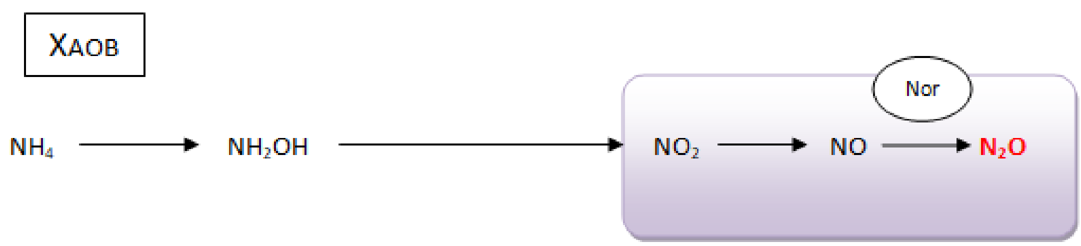
Σύμφωνα με τους Law et al., (2012), κάποια ποσότητα N_2O παράγεται μέσω της χημικής διάσπασης του NOH η οποία πραγματοποιείται κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, χωρίς έντονες καταστάσεις αιχμής, η νιτροποίηση των νιτροποιητών όπως περιγράφεται από το μοντέλο των Ni et al., (2013) είναι επαρκής για την εκτίμηση των N_2O που παράγονται σε αυτό το στάδιο της νιτροποίησης. Σε καταστάσεις αιχμής ωστόσο, είναι αναγκαίο το μοντέλο των Law et al., (2012) για την ερμηνεία των εκπομπών N_2O.



Σχήμα 2.4.1. 2 Παραγωγή N_2O μέσω της Χημικής διάσπασης (βασισμένο σε Σχηματική απεικόνιση του Poquet, 2015)

<ins>Απονιτροποίηση Νιτροποιητών</ins>:

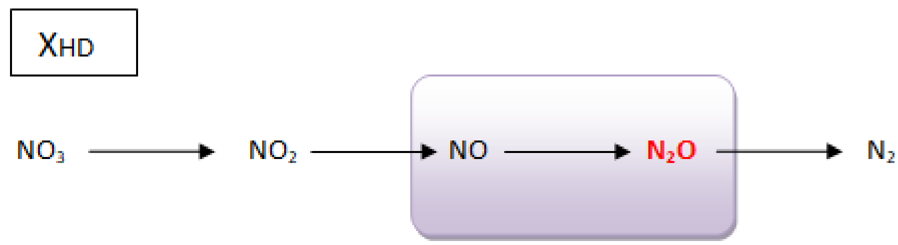
Συμφωνα με μοντέλα που έχουν αναπτύξει οι Guo and Vanrolleghem, (2014); Mampaey et al., (2013); Ni et al., (2011); Pocquet et al., (2013), τα νιτρώδη αρχικά ανάγονται σε μονοξείδιο του αζώτου και στη συνέχεια το μονοξείδιο του αζώτου με παρουσία του ενζύμου Nor ανάγεται σε N_2O.



Σχήμα 2.4.1.3 Παραγωγή N_2O μέσω της Απονιτροποίησης Νιτροποιητών (βασισμένο σε Σχηματική απεικόνιση του Poquet, 2015)

<ins>Απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών:</ins>

Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται και από ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς μέσω της σταδιακής αναγωγής των νιτρικών σε νιτρώδη, των νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου και του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου, με τη χρήση των αντίστοιχων ενζύμων. Στη συνέχεια το N_2O μετατρέπεται σε άεριο άζωτο και εκλύεται στην ατμόσφαιρα. (Schulthess and Gujer, 1996, Pan et al., 2012, 2013, Ni and Yuan, 2015)



Σχήμα 2.4.1.4 Παραγωγή N_2O μέσω της Απονιτροποίησης Ετεροτροφικών μικροοργανισμών (βάσει του σχεδιαγράμματος των T.M. Massara et al.,2015)

Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου επιδρά σημαντικά στις διαδικασίες της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης, συνεπώς και στις εκπομπές N_2O. Για το λόγο αυτό, το διαλυμένο οξυγόνο είθισται να διατηρείται γύρω στα 2 mg/L , ώστε να εξασφαλίζεται η πλήρης νιτροποίηση. Το σύστημα αερισμού επηρεάζει γενικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων. Πρέπει να επιτυγχάνεται η απομάκρυνση αζώτου με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Ταυτόχρονα όμως πρέπει να ελέγχεται αν η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης συνδέεται με κάποια αύξηση στις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου. (T. M. Massara et al, 2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας είναι ένα μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το βιοχημικό μοντέλο που χρησιμοποιείται αποτελεί τροποποίηση του μοντέλου ASM1 της διεθνούς επιτροπής νερού (IWA), έτσι ώστε να περιγράφονται αναλυτικά οι διεργασίες που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή υποξειδίου του αζώτου κατά τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων (Ε. Δημητρίου, 2017). Η αναλυτική περιγραφή των διεργασιών αυτών ενσωματώθηκε στο ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων των E. Koumaki et al., (2017) και Σαραντόπουλου (2015) που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας. Οι αλλαγές που έγιναν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αφορούν αποκλειστικά στον έλεγχο του αερισμού και στην ενέργεια που καταναλώνεται για την πραγματοποίησή του, και θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Στο μοντέλο αυτό υπολογίζεται η ζήτηση οξυγόνου στο σύστημα, η ποιότητα εκροής της εγκατάστασης, η απαιτούμενη ενέργεια για τον έλεγχο του αερισμού και οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Με τον υπολογισμό αυτών των στοιχείων ελέγχεται συνολικά το σύστημα αερισμού. Αυτό σημαίνει οτι με οποιαδήποτε παρέμβαση στο σύστημα αερισμού, ελέγχεται ταυτόχρονα τόσο η ικανοποίηση των ορίων εξόδου όσο και η ενεργειακή κατανάλωση και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρουσίαση των συστατικών στοιχείων του μοντέλου, και των βιοχημικών διεργασίων τους και στη συνέχεια θα αναλυθεί διεξοδικά ο υπολογισμός της ζήτησης οξυγόνου και της κατανάλωσης ενέργειας για έλεγχο του αερισμού, όπως αυτά τροποποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

3.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Τα συστατικά στοιχεία του μοντέλου χωρίζονται σε σωματιδιακά (που συμβολίζονται με X) και σε διαλυτά (που συμβολίζονται με S). Κάθε γράμμα ακολουθείται από ένα δείκτη που χαρακτηρίζει το κάθε στοιχείο.

S_I : μη βιοδιασπάσιμη, διαλυτή, οργανική ύλη

Δεν παράγεται, ούτε καταναλώνεται. Η συγκέντρωσή της δεν μεταβάλλεται από την είσοδο στην έξοδο.

X_I : μη βιοδιασπάσιμη, σωματιδιακή, οργανική ύλη

Η συγκέντρωσή της δεν μεταβάλλεται από την είσοδο στην έξοδο (περιλαμβάνεται σε αυτή και το X_P που είναι το σωματιδιακό προιόν λόγω φθοράς των μικροοργανισμών).

X_S : αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη

Παράγεται από τη φθορά της βιομάζας. Δεν μπορεί να αποτελέσει τροφή για τους μικροοργανισμούς , γιατί λόγω του μεγάλου μεγέθους των μορίων δεν μπορεί να εισέλθει στο κύτταρο. Με τη διαδικασία της υδρόλυσης μετατρέπεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη που μπορεί να καταναλωθεί από μικροοργανισμούς.

S_S: εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη

Παράγεται μέσω της υδρόλυσης της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης. Καταναλώνεται για την ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, τόσο σε αερόβιες όσο και σε ανοξικές συνθήκες.

X_{BH} : ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί (ετεροτροφική βιομάζα)

Αναπτύσσονται με κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (S_S) τόσο σε αερόβιες όσο και σε ανοξικές συνθήκες. Η φθορά της βιομάζας είναι η προϋπόθεση για να παραχθεί πάλι αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή ύλη, στη συνέχεια αυτή να υδρολυθεί σε εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη κ.ο.κ.

X_{AOB} : αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια

Παράγονται κάτω από αερόβιες συνθήκες, κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης (NH_2OH) σε μονοξείδιο του αζώτου (NO), και καταναλώνονται λόγω αποσύνθεσης.

X_{NOB} : νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια

Παράγονται κατά την οξείδωση των νιτρωδών (NO_2) σε νιτρικά (NO_3). Καταναλώνονται λόγω αποσύνθεσης.

X_{NV} : ανόργανη σωματιδιακή ύλη

Δεν παράγεται, ούτε καταναλώνεται μέσω κάποιας διεργασίας. Απομακρύνεται από το σύστημα μέσω της περίσσειας ιλύος

S_O : διαλυμένο οξυγόνο

Η συγκέντρωσή του καθορίζει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών

S_{N2O} : υποξείδιο του αζώτου

Το N_2O εντάσσεται στα αέρια του θερμοκηπίου, επομένως οι εκπομπές του συνυπολογίζονται στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions). Παράγεται μέσω 3 διεργασιών: κατά τη νιτροποίηση μέσω της μετατροπής της υδροξυλαμίνης (NH_2OH) σε μονοξείδιο του αζώτου (NO) και μέσω της μετατροπής του NO σε νιτρώδη (NO_2) και κατά την απονιτροποίηση, στην οποία το μονοξείδιο του αζώτου μετατρέπεται σε υποξείδιο του αζώτου. Καταναλώνεται κατά την απονιτροποίηση μέσω της μετατροπής του σε αέριο άζωτο.

S_{NH} : αμμωνιακό άζωτο

Είναι το άθροισμα της αμμωνίας (NH_3) και του αμμωνίου (NH_4). Παράγεται μέσω της αμμωνιοποίησης του διαλυτού οργανικού αζώτου (S_{ND}), το οποίο με τη σειρά του έχει προέλθει από την υδρόλυση του σωματιδιακού (X_{ND}). Καταναλώνεται μέσω της παραγωγής υδροξυλαμίνης (NH_2OH) κατά τη νιτροποίηση.

S_{NO} : μονοξείδιο του αζώτου

Κατά τη νιτροποίηση παράγεται με την οξείδωση της υδροξυλαμίνης και καταναλώνεται μέσω της οξείδωσής του σε νιτρώδη. Κατά την απονιτροποίηση παράγεται μέσω της αναγωγής των νιτρωδών και καταναλώνεται μέσω της μετατροπής του σε υποξείδιο του αζώτου.

S_{NO2} : νιτρώδη

Κατά τη νιτροποίηση, τα νιτρώδη παράγονται από την οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου (NO) αλλά και της υδροξυλαμίνης και οξειδώνονται σε νιτρικά (NO_3). Κατά την απονιτροποίηση συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή τα NO_3 ανάγονται σε NO_2 και στη συνέχεια τα NO_2 σε NO.

S_{NO3} : νιτρικά

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα νιτρικά παράγονται από την ανάπτυξη νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων κατά τη νιτροποίηση, μέσω της οξείδωσης των νιτρωδών και καταναλώνονται κατά την απονιτροποίηση, μέσω της αναγωγής τους σε νιτρώδη.

S_{NH2OH} : υδροξυλαμίνη

Παράγεται από την οξείδωση της αμμωνίας και καταναλώνεται λόγω της οξείδωσής της σε μονοξείδιο του αζώτου κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης.

S_{N2} : αέριο άζωτο

Παράγεται στο τελευταίο στάδιο της απονιτροποίησης (λόγω της αντίδρασης του υποξειδίου του αζώτου με το ένζυμο της αναγωγάσης του υποξειδίου του αζώτου).

S_{ALK} : αλκαλικότητα

Η αλκαλικότητα είναι δείκτης που βοηθάει να εντοπίζονται οι διακυμάνσεις του pH των λυμάτων στο σύστημα.

S_{CO2} : διοξείδιο του άνθρακα

Είναι ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου, συνεπώς οι εκπομπές του συνυπολογίζονται στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG Emissions). Το CO_2 παράγεται μέσω των βιολογικών διεργασιών του μοντέλου. Καταναλώνεται από τα αυτοτροφικά βακτήρια.

S_{PO4} : φωσφορικά

Παράγονται μέσω της αποσύνθεσης των βακτηρίων και των οργανισμών και καταναλώνονται για την ανάπτυξή τους.(Στην εκδοχή του μοντέλου που έχει χρησιμοποιηθεί για την παρούσα εργασία δεν λαμβάνονται υπόψιν τα φωσφορικά ως συστατικά του μοντέλου και συνεπώς δεν συμμετέχουν στις διεργασίες του μοντέλου).

Το ολικό COD (chemical oxygen demand) αφορά στα ακόλουθα συστατικά των λυμάτων: S_S, X_S, S_I, X_I, X_{BH}, X_{AOB}, X_{NOB}. Το X_P (αδρανές προιόν φθοράς των μικροοργανισμών) συμπεριλαμβάνεται στο μη βιοδιασπάσιμο φορτίο X_I. Τα συστατικά αυτά μετρώνται σε όρους COD (mg COD/L).

Τα VSS (πτητικά αιωρούμενα στερεά) είναι το άθροισμα των οργανικών στερεών (X_S, X_I, X_{BH}, X_{AOB}, X_{NOB}). Επειδή τα στοιχεία αυτά μετρώνται σε όρους COD (mg COD/L),όπως προαναφέρθηκε, για να μετατραπούν σε όρους VSS χρησιμοποιείται η σχέση:

COD/VSS=1.42 (mg COD/L)/ (mg VSS/L)

Επομένως, VSS= $(X_S + X_I + X_{BH} + X_{AOB} + X_{NOB})/1.42$ (mg VSS/L).

Τα TSS (ολικά αιωρούμενα στερεά) είναι το άθροισμα των οργανικών και των ανόργανων στερεών (X_S, X_I, X_{BH}, X_{AOB}, X_{NOB}, X_{NV}), άρα είναι TSS=VSS+X_{NV} (mg SS/L).

Το TN είναι το συνολικό άζωτο στις διάφορες μορφές του. Υπολογίζεται αθροίζοντας το αμμωνιακό άζωτο (S_{NH}), το μονοξείδιο του αζώτου (S_{NO}), τα νιτρώδη (S_{NO2}), τα νιτρικά (S_{NO3}), το υποξείδιο του αζώτου (S_{N2O}), την υδροξυλαμίνη (S_{NH2OH}), και το άζωτο που υπάρχει στην οργανική ύλη (βιοδιασπάσιμη και αδρανή) και ισούται με

$i_{xb}·(X_{BH}+X_{AOB}+X_{NOB})+i_{xp}·X_I$. TNe είναι το συνολικό άζωτο στην έξοδο της εγκατάστασης, και είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του για τον έλεγχο ποιότητας εκροής της εγκατάστασης.

3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μοντέλο που εφαρμόστηκε για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί της παρούσας εργασίας είναι μοντέλο ενεργού ιλύος, βασισμένο στο ASM1. Για λόγους αποτελεσματικότερης εφαρμογής του, δεν συμπεριλαμβάνονται όλες οι διεργασίες που πραγματοποιούνται σε έναν βιολογικό αντιδραστήρα, αλλά οι πιο απαραίτητες, οι οποίες και θα αναλυθούν στο υποκεφάλαιο αυτό.

Οι εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου διαμορφώνονται από:

- Τα συστατικά του μοντέλου
- Τις στοιχειομετρικές παραμέτρους
- Την έκφραση του ρυθμού των διάφορων διεργασιών του συστήματος
- Τη θερμοκρασιακή επίδραση στο σύστημα
- Την απαίτηση οξυγόνου για κάθε διεργασία

3.3.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Αερόβια υδρόλυση

Η αερόβια υδρόλυση είναι η διαδικασία κατά την οποία το αργά βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο μετατρέπεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη τροφή για τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Κατά την υδρόλυση απελευθερώνεται ένα μικρό ποσοστό αμμωνίας. Η διεργασία της υδρόλυσης εκφράζεται από το ρ_1. Περιοριστικοί παράγοντες είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου (S_O) και ο λόγος (X_S/X_{BH}), που εκφράζει την αργά βιοδιασπάσιμη ύλη ως προς τη συγκέντρωση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών.

$$\rho_1 = k_h * \frac{SO}{(KOH+SO)} * \frac{(XS/XBH)}{(Kx+(XS/XBH))} * X_{BH}$$

Ανοξική υδρόλυση

Η ανοξική υδρόλυση (ρ_2 και ρ_3) είναι η ίδια διεργασία με την αερόβια υδρόλυση με τη διαφορά οτι πραγματοποιείται με παρουσία νιτρικών και νιτρωδών, σε αντίθεση με την αερόβια που πραγματοποιείται με παρουσία οξυγόνου. Στις ανοξικές συνθήκες η υδρόλυση γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται ένας συντελεστής απομείωσης στην εξίσωση, ο n_{NO3H} για παρουσία νιτρικών και ο n_{NO2H} για παρουσία νιτρωδών. Περιοριστικοί παράγοντες του ρυθμού ανοξικής υδρόλυσης είναι η συγκέντρωση νιτρικών ή νιτρωδών για τις εξισώσεις ρ_2 και ρ_3 αντίστοιχα,η απουσία οξυγόνου και ο λόγος (X_S/X_{BH}).

$$\rho_2 = k_h * n_{NO3H} * \frac{KOH}{(KOH+SO)} * \frac{(XS/XBH)}{(Kx+(XS/XBH))} * \frac{SNO3}{(KNO3+SNO3)} * X_{BH}$$

$$\rho_3 = k_h * n_{NO2H} * \frac{KOH}{(KOH+SO)} * \frac{(XS/XBH)}{(Kx+(XS/XBH))} * \frac{SNO2}{(KNO2+SNO2)} * X_{BH}$$

Αναερόβια υδρόλυση

Η αναερόβια υδρόλυση είναι η ίδια διεργασία με την αερόβια και την ανοξική υδρόλυση, με τη διαφορά οτι γίνεται κάτω από αναερόβιες συνθήκες και κατά συνέπεια με πολυ πιο αργούς ρυθμούς και από την αερόβια και από την ανοξική. Ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η διεργασία εκφράζεται μέσω του ρ_4. Οι περιοριστικοί παράγοντες της διεργασίας είναι η απουσία οξυγόνου,νιτρικών και νιτρωδών καθώς επίσης και ο λόγος X_S/X_{BH}.

$$\rho_4 = k_h * n_{fe} * \frac{KOH}{(KOH+SO)} * \frac{(XS/XBH)}{(Kx+(XS/XBH))} * \frac{KNO2}{(KNO2+SNO2+SNO3)} * X_{BH}$$

Αερόβια Ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_{BH})

Η αερόβια ανάπτυξη είναι η διεργασία κατά την οποία οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί καταναλώνουν το εύκολα βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο, που έχει προέλθει από την υδρόλυση του αργά βιοδιασπάσιμου. Ταυτόχρονα, καταναλώνεται διαλυμένο οξυγόνο αλλά και μια ποσότητα αμμωνιακού αζώτου, ενώ παράγεται διοξείδιο του άνθρακα. Ο ρυθμός ανάπτυξης εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση (ρ_5) και οι περιοριστικοί παράγοντες είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, η εύκολα διασπάσιμη τροφή (S_S), η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου (S_{NH}) και ο βαθμός αλκαλικότητας (S_{ALK})

$$\rho_5 = \mu_H * \frac{SO}{(KOH+SO)} * \frac{(SS)}{(Ks+SS)} * \frac{SNH}{(KNH+SNH)} * \frac{SALK}{(KALK+SALK)} * X_{BH}$$

Απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_{BH})

Η απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών πραγματοποιείται σε ανοξικές συνθήκες. Γίνεται κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής αλλά με πιο αργούς ρυθμούς σε σχέση με τις αερόβιες συνθήκες. Καταναλώνεται ποσότητα αμμωνιακού αζώτου και νιτρικών, ενώ παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και νιτρικά. Η απονιτροποίηση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών εκφράζεται από τη διεργασία ρ_6. Περιοριστικοί παράγοντες της διεργασίας είναι η απουσία οξυγόνου, η παρουσία νιτρικών, αμμωνιακού αζώτου και οργανικής τροφής και τέλος η αλκαλικότητα

$$\rho_6 = \mu_H * n_{NO3D} * \frac{KOH}{(KOH+SO)} * \frac{(SS)}{(Ks+SS)} * \frac{SNH}{(KNH+SNH)} * \frac{SNO3}{(KNO3+SNO3)} * \frac{SALK}{(KALK+SALK)} * X_{BH}$$

Ανοξική Ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (X_{BH})

Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί αναπτύσσονται τόσο σε αερόβιες όσο και σε ανοξικές συνθήκες. Η ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών συμβαίνει σε 3 διαφορετικά στάδια: κατά τη μετατροπή των νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου, κατά την αναγωγή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου και κατά τη μετατροπή του υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο. Οι διεργασίες σε αυτά τα στάδια είναι οι ρ_7, ρ_8 και ρ_9.

- Περιοριστικοί παράγοντες της διεργασίας στο πρώτο στάδιο (ρ_7) είναι η παρουσία νιτρικών και οργανικής τροφής και η απουσία οξυγόνου και μονοξειδίου του αζώτου.

$$\rho_7 = \mu_H * n_{G3} * \frac{KOH3}{(KOH3+SO)} * \frac{(SNO2)}{(KNO2D+SNO2)} * \frac{SS}{(KS3+SS)} * \frac{KI3NO}{(KI3NO+SNO)} * X_{BH}$$

- Περιοριστικοί παράγοντες της διεργασίας στο δεύτερο στάδιο (ρ_8) είναι η παρουσία οργανικής τροφής και η απουσία οξυγόνου. Το μονοξείδιο του αζώτου υπάρχει σε δύο σημεία της εξίσωσης, από τη μία ενισχύει τη διεργασία και από την άλλη την παρεμποδίζει.

$$\rho_8 = \mu_H * n_{G4} * \frac{KOH4}{(KOH4+SO)} * \frac{(SNO)}{(KNOD+SNO+\left(\frac{SNO^2}{KI4NO}\right))} * \frac{SS}{(KS4+SS)} * X_{BH}$$

- Περιοριστικοί παράγοντες της διεργασίας στο τρίτο στάδιο (ρ_9) είναι η παρουσία οργανικής τροφής και υποξειδίου του αζώτου και η απουσία οξυγόνου και μονοξειδίου του αζώτου.

$$\rho_9 = \mu_H * n_{G5} * \frac{KOH5}{(KOH5+SO)} * \frac{(SN2O)}{(KN2OD+SN2O)} * \frac{SS}{(KS5+SS)} * \frac{KI5NO}{(KI5NO+SNO)} * X_{BH}$$

Αποσύνθεση ετεροτροφικής βιομάζας (X_{BH})

Η αποσύνθεση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών στο μοντέλο πραγματοποιείται με προκαθορισμένο, σταθερό ρυθμό φθοράς b_H, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Επομένως η διεργασία της φθοράς μικροοργανισμών είναι η ρ_{10} και περιγράφεται με την παρακάτω απλή εξίσωση. Από τη φθορά των ετεροτροφικών μικροοργανισμών προκύπτουν τα X_p (σωματιδιακά, μη βιοδιασπάσιμα προιόντα) και τα X_S (αργά βιοδιασπάσιμα προιόντα) από τα οποία μέσω της υδρόλυσης προκύπτει η τροφή των X_{BH}

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

Οξείδωση αμμωνιακού αζώτου (NH_4) σε υδροξυλαμίνη (NH_2OH)

Η νιτροποίηση πραγματοποιείται σε διαφορετικά στάδια, το πρώτο εκ των οποίων είναι η οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου σε υδροξυλαμίνη. Η διεργασία αυτή (ρ_{11}) πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ενζύμου της αμμωνίας, μονοοξυγενάση (AMO). Περιοριστικός παράγοντας ,όπως είναι προφανές βάσει των παραπάνω, είναι η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου και του διαλυμένου οξυγόνου.

$$\rho_{11} = q_{AOBAMO} * \frac{SO}{(SO+kOHAOB1)} * \frac{SNH}{(SNH+kNHAOB)} * X_{AOB}$$

Οξείδωση υδροξυλαμίνης (NH_2OH) σε μονοξείδιο του αζώτου (NO)

Το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης είναι η μετατροπή της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου, που πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ενζύμου της υδροξυλαμίνης, οξειδοαναγωγάση (HAO) . Κατά τη διεργασία (ρ_{12}) αναπτύσσονται τα αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια (X_{AOB}). Γίνεται κατανάλωση αμμωνιακού αζώτου, καθώς επίσης και διοξειδίου του άθρακα. Περιοριστικοί παράγοντες για τη διεργασία είναι το διαλυμένο οξυγόνο, η υδροξυλαμίνη και το αμμωνιακό άζωτο.

$$\rho_{12} = \mu_{AOBHAO} * \frac{SO}{(SO+kOHAOB2)} * \frac{SNH2OH}{(SNH2OH+kNH2OHAOB)} * \frac{SNH}{(SNH+10^{-12})} * X_{AOB}$$

Οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου (NO) σε νιτρώδη (NO_2)

Το τρίτο στάδιο της νιτροποίησης είναι η οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη, που πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ίδιου ενζύμου που υπήρχε και στο προηγούμενο στάδιο (HAO). Η διεργασία (ρ_{13}) πραγματοποιείται παρουσία οξυγόνου και μονοξειδίου του αζώτου.

$$\rho_{13} = q_{AOBHAO} * \frac{SO}{(SO+kOHAOB2)} * \frac{SNO}{(SNO+kNOAOBHAO)} * X_{AOB}$$

Αναγωγή του μονοξειδίου του αζώτου (NO) σε υποξείδιο του αζώτου (N_2O)

Το υποξείδιο του αζώτου προκύπτει με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Ένας από αυτούς είναι μέσω της μετατροπής του μονοξειδίου του αζώτου (NO) σε υποξείδιο του αζώτου (N_2O). Κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ενζύμου της νιτρικής οξειδοαναγωγάσης (Nor) και η διεργασία ονομάζεται Νιτροποίηση των Νιτροποιητών (NN). Περιοριστικοί παράγοντες της διεργασίας είναι το μονοξείδιο του αζώτου αλλά και η υδροξυλαμίνη

$$\rho_{14} = q_{AOBN2ONN} * \frac{SNH2OH}{(SNH2OH+kNH2OHAOB)} * \frac{SNO}{(SNO+kNOAOBNN)} * X_{AOB}$$

Αναγωγή των νιτρωδών (NO_2) σταδιακά σε μονοξείδιο (NO) και σε υποξείδιο του αζώτου (N_2O)

Κατά τη διαδικασία της απονιτροποίησης, τα νιτρώδη ανάγονται πρώτα σε μονοξείδιο και έπειτα σε υποξείδιο του αζώτου. Η πρώτη διεργασία γίνεται με τη βοήθεια του ενζύμου της νιτρικής αναγωγάσης (NirK) και η δεύτερη διεργασία γίνεται με το ένζυμο της νιτρικής οξειδοαναγωγάσης (Nor) (όπως και στην αντίστοιχη διεργασία της νιτροποίησης). Συνολικά η διεργασία αναγωγής των NO_2 σε N_2O εκφράζεται από το ρ_{15}. Περιοριστικοί παράγοντες είναι η υδροξυλαμίνη και το νιτρώδες οξύ (S_{HNO2}), ο υπολογισμός του οποίου φαίνεται στη συνέχεια.

$$\rho_{15} = q_{AOBN2OND} * \frac{SNH2OH}{(SNH2OH+kNH2OHAOB)} * \frac{SHNO2}{(SHNO2+kHNO2AOB)} * f_{SO} * X_{AOB}$$

$$f_{SO} = \frac{SO}{\left(KOHAOBND+\left(1-2*\sqrt{\frac{KOHAOBND}{KIOHAOB}}\right)*SO+\left(\frac{SO^2}{KIOHAOB}\right)\right)}$$

$$Ka = e^{-2300/(273+\text{therm})}$$

$$S_{HNO2} = \frac{SNO2}{(Ka*10^{ph})+1} * \frac{47}{14}$$

Αερόβια ανάπτυξη των Νιτρικών Οξειδωτικών Βακτηρίων (X_{NOB})

Τα νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια αναπτύσσονται σε αερόβιες συνθήκες κατά την οξείδωση των νιτρωδών σε νιτρικά. Κατά την ανάπτυξή τους καταναλώνεται οξυγόνο, αμμωνία και φωσφορικά καθώς επίσης και διοξείδιο του άνθρακα. Η ανάπτυξη των (X_{NOB}) περιγράφεται από το ρ_{16}. Περιοριστικοί παράγοντες της διεργασίας αυτής στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι το διαλυμένο οξυγόνο, τα νιτρώδη και η αλκαλικότητα.

$$\rho_{16} = \mu_{NOB} * \frac{SO}{(SO+kOHNOB)} * \frac{SNO2}{(SNO2+kNO2NOB)} * \frac{SALK}{(SALK+kALKNOB)} * X_{NOB}$$

Αποσύνθεση X_{AOB} και X_{NOB}

Για τη φθορά τόσο των αμμωνιακών (X_{AOB}) όσο και των νιτρικών (X_{NOB}) οξειδωτικών βακτηρίων, ισχύει το ίδιο που ισχύει και για τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Υπάρχει σταθερός ρυθμός της διεργασίας, ο οποίος είναι b_{AOB} και b_{NOB} αντίστοιχα.

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

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

3.3.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των εξισώσεων του μοντέλου που περιγράφουν πώς μεταβάλλεται η συγκέντρωση κάθε στοιχείου σε κάθε διαμέρισμα (k) του βιολογικού αντιδραστήρα. Με Q(k) συμβολίζεται η παροχή και με V(k) ο όγκος του κάθε διαμερίσματος, ενώ d_j είναι το χρονικό βήμα εκτέλεσης της εξίσωσης στο πρόγραμμα, το οποίο είναι ίσο με 1sec.

S_I : μη βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη

Είναι αδρανές συστατικό του μοντέλου. Δεν παράγεται, ούτε καταναλώνεται μέσω κάποιας διεργασίας του μοντέλου. Η μεταβολή της συγκέντρωσής του είναι DSI(k)

DSI(k)={ [Q(k-1)*SI(k-1) - Q(k)*SI(k)] + [fSI*V(k)*(ρ1+ρ2+ρ3+ρ4)] } * dj/V(k)

Όπου για fSI=0 προκύπτει:

DSI(k)=[Q(k-1)*SI(k-1) - Q(k)*SI(k)] * dj/V(k)

Επομένως η νέα συγκέντρωση για κάθε επόμενη χρονική στιγμή (t+dt) είναι:

SI(k, t+dt) = SI(k, t) + DSI(k)

S_S: εύκολα βιοδιασπάσιμη διαλυτή οργανική ύλη

Η εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη προέρχεται από την υδρόλυση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης και αποτελεί τροφή για τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς κατά την αερόβια και την ανοξική ανάπτυξή τους. Η μεταβολή της συγκέντρωσης είναι DSS :

DSS(k)={ [Q(k-1)*SS(k-1)-Q(k)*SS(k)] + [(1.0-fSI)*V(k)*(ρ1+ρ2+ρ3+ρ4)] - [$\frac{1}{\mathrm{YH}}$*ρ5*V(k)] -

[$\frac{1}{\mathrm{YH*nG}}$ *V(k)*(ρ6+ρ7+ρ8+ρ9)] } * dj/V(k)

SS(k, t+dt) = SS(k, t) + DSS(k)

S_O : διαλυμένο οξυγόνο

Το διαλυμένο οξυγόνο καταναλώνεται κατά τις διεργασίες αερόβιας ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών, κατά την αερόβια υδρόλυση και κατά την ανάπτυξη των X_{AOB} και X_{NOB}. Γενικότερα καταναλώνεται σε όλα τα στάδια της νιτροποίησης στα οποία γίνεται οξείδωση. Η μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου είναι DSO:

$$DSO(k)= \{ [Q(k-1)*SO(k-1)-Q(k)*SO(k)] - [\frac{1-YH}{YH} *\rho5*V(k)] - [\frac{8}{7} *\rho11*V(k)] - [\frac{12/7-YAOB}{YAOB} *\rho12*V(k)] - [\frac{4}{7} *\rho13*V(k)]- [\frac{8/7-YNOB}{YNOB} *\rho16*V(k)] \} * dj/V(k)$$

$$SO(k, t+dt) = SO(k, t) + DSO(k)$$

S_{N2O} : υποξείδιο του αζώτου

Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται με 3 τρόπους: από τη χημική διάσπαση του μονοξειδίου του αζώτου (NO) σε νιτροξύλιο (HNO) και στη συνέχεια σε N_2O κάτω από αερόβιες συνθήκες, μέσω της μετατροπής της υδροξυλαμίνης (NH_2OH) σε μονοξείδιο του αζώτου (NO) επίσης σε αερόβιες συνθήκες, και τέλος από τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε N_2O κατά την απονιτροποίηση (απονιτροποίηση νιτροποιητών και απονιτροποίηση ετεροτροφικών μικροοργανισμών). Καταναλώνεται σε ανοξικές συνθήκες καθώς μετατρέπεται σε αέριο άζωτο και εκλύεται στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με αυτά, η εξίσωση μεταβολής της συγκέντρωσης είναι:

$$DSN2O(k)= \{ [Q(k-1)*SN2O(k-1)-Q(k)*SN2O(k)] + [\frac{1.0-YH*nG}{YH*nG*(4.0/7.0)} *(\rho8-\rho9)*V(k)] + [4.0*\rho14(k)*V(k)] + [2.0*\rho15*V(k)] \} *dj/V(k) - (0.91*KLA(k)*SN2O(k)*N2OSE)*dj$$

$$SN2O(k, t+dt) = SN2O(k, t) + DSN2O(k)$$

S_{NO} : μονοξείδιο του αζώτου

Παράγεται κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε αερόβιες συνθήκες, και κατά την αναγωγή των νιτρωδών σε ανοξικές συνθήκες. Καταναλώνεται μέσω της οξείδωσής του σε νιτρώδη (σε αερόβιες συνθήκες) και κατά τη μετατροπή του σε υποξείδιο του αζώτου (σε ανοξικές συνθήκες). Επομένως, η εξίσωση μεταβολής του NO στο βιολογικό αντιδραστήρα διαμορφώνεται ως εξής:

DSNO(k)={ [Q(k-1)*SNO(k-1)-Q(k)*SNO(k)] + [$\frac{1.0-YH*nG}{YH*nG*(4.0/7.0)}$*(ρ7-ρ8)*V(k)] + [$\frac{1.0}{YAOB}$*ρ12*V(k)] - [1.0*ρ13*V(k)] - [4.0*ρ14*V(k)] } *dj/V(k)

SNO(k, t+dt) = SNO(k, t) + DSNO(k)

S_{NO2} : νιτρώδη

Τα νιτρώδη, σε αερόβιες συνθήκες, παράγονται από οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου και καταναλώνονται μέσω της οξείδωσής τους σε νιτρικά, ενώ σε ανοξικές συνθήκες συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή τα νιτρικά ανάγονται σε νιτρώδη και τα νιτρώδη σε μονοξείδιο του αζώτου. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνονται στην εξίσωση μεταβολής της συγκέντρωσης των νιτρωδών:

DSNO2(k)= { [Q(k-1)*SNO2(k-1)-Q(k)*SNO2(k)] + [$\frac{1.0-YH*nG}{YH*nG*(8.0/7.0)}$ *ρ6*V(k)] – [$\frac{1.0-YH*nG}{YH*nG*(4.0/7.0)}$ *ρ7*V(k)] + [1.0*V(k)*(ρ13+ρ14+ρ15)] - [$\frac{1.0}{YNOB}$ *ρ16*V(k)] } * dj/V(k)

SNO2(k, t+dt) = SNO2(k, t) + DSNO2(k)

S_{NO3} : νιτρικά

Τα νιτρικά παράγονται μέσω της ανάπτυξης των νιτρικών βακτηρίων στο βιολογικό αντιδραστήρα και καταναλώνονται με την αναγωγή τους σε νιτρώδη στην ανοξική δεξαμενή. Η μεταβολή τους ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

DSNO3(k)={ [Q(k-1)*SNO3(k-1)-Q(k)*SNO3(k)] - [$\frac{1.0-YH*nG}{YH*nG*(8.0/7.0)}$*ρ6*V(k)] + [$\frac{1.0}{YNOB}$*ρ16*V(k)] } *dj/V(k)

SNO3(k, t+dt) = SNO3(k, t) + DSNO3(k)

S_{NH} : αμμωνιακό άζωτο

Ο όρος αμμωνιακό άζωτο αναφέρεται στο σύνολο της αμμωνίας και του αμμωνίου, αλλά είθισται για λόγους απλοποίησης να αναφέρεται ως αμμωνία. Ένα μικρό ποσοστό αμμωνίας απελευθερώνεται κατά την υδρόλυση, αλλά μέσω της αποσύνθεσης των μικροοργανισμών απομακρύνεται από το σύστημα. Η αμμωνία καταναλώνεται για την ανάπτυξη των αυτοτροφικών βακτηρίων και κατά την οξείδωσή της σε υδροξυλαμίνη. Η μεταβολή της συγκέντρωσής της φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

DSNH(k) ={ [Q(k-1)*SNH(k-1)-Q(k)*SNH(k)] + [(iNXS-(1-fSI)*iNSF)*(ρ1+ρ2+ρ3+ρ4)*V(k)] - [ixb*(ρ5+ρ6+ρ7+ρ8+ρ9+ρ12+ρ16)*V(k)] + [(ixb-ixp*fp)*(ρ10+ρ17+ρ18) *V(k)] - [1.0*ρ11*V(k)] } * dj/V(k)

SNH(k, t+dt) = SNH(k, t) + DSNH(k)

S_{NH2OH} : υδροξυλαμίνη

Η υδροξυλαμίνη παράγεται σε αερόβιες συνθήκες κατά την οξείδωση της αμμωνίας και καταναλώνεται κατά τη μετατροπή της σε μονοξείδιο του αζώτου. Μέρος αυτής καταναλώνεται επίσης κατά τη διεργασία αναγωγής νιτρωδών σε μονοξείδιο και έπειτα υποξείδιο του αζώτου σε ανοξικές συνθήκες αλλά και μέσω της παραγωγής νιτρωδών από μονοξείδιο του αζώτου σε αερόβιες συνθήκες. Η μεταβολή της NH_2OH φαίνεται συνολικά στην ακόλουθη εξίσωση:

DSNH2OH(k) ={ [Q(k-1)*SNH2OH(k-1)-Q(k)*SNH2OH(k)] + [1.0*(ρ11-ρ14-ρ15)*V(k)] - [$\frac{1.0}{\mathrm{YAOB}}$ *ρ12*V(k)] } * dj/V(k)

SNH2OH(k, t+dt) = SNH2OH(k, t) + DSNH2OH(k)

S_{N2} : αέριο άζωτο

Το αέριο άζωτο παράγεται σε ανοξικές συνθήκες από αναγωγή του υποξειδίου του αζώτου με τη βοήθεια του ενζύμου της αναγωγάσης του υποξειδίου του αζώτου (N_2OR), σύμφωνα με την εξίσωση:

DSN2(k)={ [Q(k-1)*SN2(k-1)-Q(k)*SN2(k)] + [$\frac{1.0-\mathrm{YH}}{\mathrm{YH}*(12.0/7.0)}$ *ρ9*V(k)] } * dj/V(k)

SN2(k, t+dt) = SN2(k, t) + DSN2(k)

X_I : μη βιοδιασπάσιμη, σωματιδιακή, οργανική ύλη

Αυτό το μέρος της οργανικής ύλης, όπως και το S_I , είναι αδρανές και συνεπώς δεν παράγεται ούτε καταναλώνεται σε κάποια από τις διεργασίες. Στο X_I ωστόσο συμπεριλαμβάνονται και τα προιόντα φθοράς των μικροοργανισμών (X_p). Επομένως, η εξίσωση μεταβολής της μη βιοδιασπάσιμης, σωματιδιακής, οργανικής ύλης διαμορφώνεται ως εξής:

DXI(k)={ [Q(k-1)*XI(k-1)-Q(k)*XI(k)] + [fp*(ρ10+ρ17+ρ18)*V(k)] } * dj/ V(k)

XI(k, t+dt) = XI(k, t) + DXI(k)

X_S : αργά βιοδιασπάσιμη σωματιδιακή οργανική ύλη

Η αργά βιοδιασπάσιμη, σωματιδιακή, οργανική ύλη υδρολύεται σε εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (S_S), η οποία καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς. Παράγεται από τη φθορά των μικροοργανισμών. Η ανάπτυξη και η κατανάλωση του X_S εκφράζονται από την παρακάτω εξίσωση:

DXS(k) ={ [Q(k-1)*XS(k-1)-Q(k)*XS(k)] - [1.0*(ρ1+ρ2+ρ3+ρ4)*V(k)] + [(1.0-fp)*(ρ10+ρ17+ρ18)*V(k)] } *dj/V(k)

XS(k, t+dt) = XS(k, t) + DXS(k)

X_{BH} : ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί

Οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σε αερόβιες και ανοξικές συνθήκες, καταναλώνοντας την εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη και χρησιμοποιώντας τον αντίστοιχο αποδέκτη ηλεκτρονίων (διαλυμένο οξυγόνο στις αερόβιες και νιτρικά στις ανοξικές συνθήκες). Χάνονται από το σύστημα με την αποσύνθεσή τους. Η μεταβολή στη συγκέντρωση των ετεροτροφικών μικροοργανισμών αποτυπώνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

DXBH(k)={ [Q(k-1)*XBH(k-1)-Q(k)*XBH(k)] + [1.0*(ρ5+ρ6+ρ7+ρ8+ρ9-ρ10)*V(k)] } * dj/V(k)

XBH(k, t+dt) = XBH(k, t) + DXBH(k)

X_{AOB} : αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια

Τα αμμωνιακά οξειδωτικά βακτήρια αναπτύσσονται κατά την οξείδωση της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου κάτω από αερόβιες συνθήκες, και χάνονται από το σύστημα λόγω της φθοράς τους. Η μεταβολή της συγκέντρωσής τους είναι DX_{AOB} και περιγράφεται από τη σχετική εξίσωση.

DXAOB(k)={ [Q(k-1)*XAOB(k-1)-Q(k)*XAOB(k)] + [1.0*(ρ12-ρ17)*V(k] } * dj/V(k)

XAOB(k, t+dt) = XAOB(k,t) + DXAOB(k)

X_{NOB} : νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια

Τα νιτρικά οξειδωτικά βακτήρια παράγονται στο σύστημα μέσω της οξείδωσης των νιτρωδών σε νιτρικά και χάνονται από το σύστημα μέσω της φθοράς τους, αντίστοιχα με τους υπόλοιπους μικροοργανισμούς. Η μεταβολή της συγκέντρωσής τους είναι η ακόλουθη:

DXNOB(k)={ [Q(k-1)*XNOB(k-1)-Q(k)*XNOB(k)] + [1.0*(ρ16-ρ18)*V(k)] } * dj/V(k)

XNOB(k, t+dt) = XNOB(k,t) + DXNOB(k)

X_{NV} : ανόργανη σωματιδιακή ύλη

Η ανόργανη σωματιδιακή ύλη δεν παράγεται, ούτε καταναλώνεται μέσα στο σύστημα. Ο τρόπος με τον οποίο χάνεται από το σύστημα είναι μέσω της περίσσειας ιλύος και όχι μέσω κάποιας διεργασίας. Συνεπώς η εξίσωση μεταβολής της συγκέντρωσης του X_{NV} έχει τον εξής απλό τύπο:

DXNV(k)= [Q(k-1)*XNV(k-1)-Q(k)*XNV(k)] * dj/V(k)

XNV(k, t+dt) = XNV(k, t) + DXNV(k)

S_{ALK} : αλκαλικότητα

Η αλκαλικότητα είναι ένδειξη μεταβολής του pH. Η μεταβολή της αλκαλικότητας εκφράζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση στην οποία φαίνεται ποιες διεργασίες επιδρούν σ'αυτή.

DSALK(k)= { [Q(k-1)*SALK(k-1)-Q(k)*SALK(k)] - [$\frac{ixb}{14}$*(ρ5+ρ11+ρ12+ρ13+ρ14+ρ15+ρ16)* V(k)] + [($\frac{1.0-YH}{14.0*2.86*YH}$ - $\frac{ixb}{14}$)*(ρ6+ρ7+ρ8+ρ9)*V(k)] } * dj/V(k)

SALK(k, t+dt) = SALK(k, t) + DSALK(k)

3.3.4 ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, στις διεργασίες του μοντέλου και στις εξισώσεις που περιγράφουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης των συστατικών του μοντέλου χρησιμοποιούνται διάφορες παράμετροι που συνθέτουν το μαθηματικό μοντέλο. Κινητικές είναι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των διεργασιών του μοντέλου και μπορεί να εκφράζουν το ρυθμό πραγματοποίησης μιας διεργασίας, το βαθμό στον οποίο θα γίνεται η κάθε διεργασία, ανάλογα με τα συστατικά που υπάρχουν κάθε χρονική στιγμή στα λύματα κ.ο.κ. Στοιχειομετρικές είναι οι παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις που εκφράζουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε συστατικού. Οι παράμετροι αυτές συσχετίζουν τα συστατικά μεταξύ τους και με τις διάφορες διεργασίες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι κινητικές και στοιχειομετρικές παράμετροι με τη σειρά που εμφανίζονται στις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

<u>Κινητικές παράμετροι:</u>

K_H : Η παράμετρος αυτή εκφράζει το μέγιστο ειδικό ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιείται η διεργασία της υδρόλυσης. Ορίζεται από το μαθηματικό τύπο $K_H = K_H^{20} * 1.116^{(T-20)}$ (Σαραντόπουλος, 2015) όπου T είναι η θερμοκρασία και K_H^{20} είναι η τιμή της παραμέτρου για θερμοκρασία T=20°C. Στους 20°C ο ρυθμός αυτός είναι 0.3 $\frac{\text{g αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη (COD)}}{\text{g οργανική ύλη(COD)}}$.

K_{OH} : Ο συντελεστής κορεσμού οξυγόνου λειτουργεί σαν διακόπτης στις διεργασίες που έχουν ως περιοριστικό παράγοντα την παρουσία ή την απουσία οξυγόνου. Πιο συγκεκριμένα, δεν επιτρέπει να πραγματοποιούνται διεργασίες που απαιτούν απουσία οξυγόνου, όταν η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου είναι μη μηδενική και δεν επιτρέπει να πραγματοποιούνται διεργασίες που απαιτούν κατανάλωση οξυγόνου, οταν η συγκέντρωσή του στο σύστημα είναι μικρή ή μηδενική. Η τιμή του συντελεστή στο μοντέλο είναι 0.2 $\frac{\text{g O2}}{\text{m}^3}$.

K_X : Ο συντελεστής κορεσμού της υδρόλυσης λειτουργεί ως διακόπτης ώστε να μην πραγματοποιείται η διεργασία αν δεν υπάρχει επαρκής συγκέντρωση αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης σε σχέση με τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Ορίζεται από τον τύπο: $K_X = K_X^{20} * 1.116^{(T-20)}$ (Σαραντόπουλος, 2015) . Η τιμή που λαμβάνει στο σύστημα είναι 0.03 $\frac{\text{g αργά βιοδιασπάσιμου οργανικού φορτίου}}{\text{g βιομάζας}}$.

K_{NO2}, K_{NO3} : Οι συντελεστές κορεσμού νιτρωδών και νιτρικών λειτουργούν ως διακόπτες ώστε να αναστέλλονται οι διεργασίες που απαιτούν τα εν λόγω συστατικά, αν δεν υπάρχουν σε επαρκή συγκέντρωση στο σύστημα. Η τιμή τους στο μοντέλο είναι 0.5 $\frac{\text{g NO2}}{\text{m}^3}$ και 0.5 $\frac{\text{g NO3}}{\text{m}^3}$ αντίστοιχα.

n_{NO3H}, n_{NO2H} : Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται στην εξίσωση της υδρόλυσης υπό ανοξικές συνθήκες για την απομείωση της ταχύτητας της διεργασίας. Η υδρόλυση σε ανοξικές συνθήκες, σε σχέση με την υδρόλυση σε αερόβιες, συμβαίνει με πιο αργούς ρυθμούς. Τα n_{NO3H} και n_{NO2H} χρησιμοποιούνται στο 1^o και στο 2^o στάδιο, αντίστοιχα, της ανοξικής υδρόλυσης, και λαμβάνουν την τιμή 0.6 (αδιάστατο μέγεθος).

n_{fe} : Όπως στις ανοξικές, έτσι και στις αναερόβιες συνθήκες, η υδρόλυση πραγματοποιείται με πιο αργούς ρυθμούς. Ο συντελεστής n_{fe} χρησιμοποιείται για την απομείωση της ταχύτητας στις αναερόβιες συνθήκες και είναι ίσος με 0.4 (αδιάστατο μέγεθος).

μ_H : Είναι η μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης της ετεροτροφικής βιομάζας. Ορίζεται ως $\mu_H = \mu_H^{20} * 1.072^{(T-20)}$ (Σαραντόπουλος, 2015) όπου Τ είναι η θερμοκρασία και μ_H^{20} είναι η τιμή της παραμέτρου για θερμοκρασία Τ=20^{o}C. Για θερμοκρασία 20^{o}C το μ_H είναι ίσο με 6d^{-1}.

K_S : Είναι ο συντελεστής κορεσμού της ετεροτροφικής βιομάζας. Η τιμή του εξαρτάται από τη φύση των λυμάτων αλλά και από το είδος των βιολογικών αντιδραστήρων. Στους 20^{o}C η τιμή που λαμβάνει είναι 20 $\frac{\text{g οργανικής ύλης (COD)}}{\text{m}^3}$.

K_{NH} : Ο συντελεστής κορεσμού του αμμωνιακού αζώτου λειτουργεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο για το αμμωνιακό άζωτο όπως το K_{OH} για το οξυγόνο. Η τιμή που λαμβάνει στο μοντέλο είναι 0.05 $\frac{\text{g NH}}{\text{m}^3}$.

K_{ALK} : Αντίστοιχος συντελεστής κορεσμού υπάρχει και για τον έλεγχο της αλκαλικότητας. Η τιμή του είναι 0.082 $\frac{\text{g CaCO3}}{\text{m}^3}$.

n_{NO3D} : Πρόκειται για μειωτικό συντελεστή που χρησιμοποιείται για την απομείωση του ρυθμού ανάπτυξης ετεροτροφικών μικροοργανισμών σε ανοξικές συνθήκες. Η τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής στο μοντέλο είναι 0.8.

n_{G3}, n_{G4}, n_{G5} : Αντίστοιχα με το n_{NO3D} υπάρχουν και αυτές οι παράμετροι απομείωσης του ρυθμού διεργασιών. Συγκεκριμένα, το n_{G3} χρησιμοποιείται στη διεργασία αναγωγής των νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου, το n_{G4} χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου και το n_{G5} για τη μετατροπή του υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο. Και οι τρεις αυτοί συντελεστές στο μοντέλο αυτό λαμβάνουν την τιμή 0.5.

k_{OH3}, k_{OH4}, k_{OH5} : Οι συντελεστές αυτοί είναι αντίστοιχοι με το K_{OH} και χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση διεργασιών βάσει της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται για τις διεργασίες αναγωγής νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου, μετατροπής μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου και μετατροπής υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο, αντίστοιχα. Οι διεργασίες αυτές συμβαίνουν σε ανοξικές συνθήκες και συνεπώς απαιτείται απουσία οξυγόνου για να πραγματοποιηθούν. Η τιμή των συντελεστών αυτών στο μοντέλο είναι 0.1 $\frac{\text{g O2}}{\text{m}^3}$.

k_{NO2D}, k_{NOD}, k_{N2OD} : Για να πραγματοποιηθούν οι 3 παραπάνω διεργασίες της απονιτροποίησης (ρ_7, ρ_8, ρ_9), είναι απαραίτητη η ύπαρξη του συγκεκριμένου κάθε φορά στοιχείου που υφίσταται τη μετατροπή. Για τον έλεγχο πραγματοποίησης ή μη της κάθε διεργασίας χρησιμοποιούνται οι παράμετροι k_{NO2D} για την αναγωγή νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου, k_{NOD} για τη μετατροπή μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου και k_{N2OD} για τη μετατροπή υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο. Οι τιμές που λαμβάνουν οι συντελεστές αυτοί είναι 0.2 $\frac{\text{g NO2}}{\text{m}^3}$, 0.05 $\frac{\text{g NO}}{\text{m}^3}$ και 0.05 $\frac{\text{g N2O}}{\text{m}^3}$.

k_{S3}, k_{S4}, k_{S5} : Είναι συντελεστές κορεσμού οργανικής ύλης και χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις για να αναστείλουν διεργασίες που απαιτούν την ύπαρξη οργανικού φορτίου για την πραγματοποίησή τους. Συγκεκριμένα, αφορούν στις διεργασίες αναγωγής νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου, μετατροπής μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου και μετατροπής υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο, αντίστοιχα. Η τιμή που λαμβάνουν στο σύστημα είναι 20 $\frac{\text{g οργανικό φορτίο}}{\mathrm{m}^3}$.

k_{I3NO}, k_{I4NO}, k_{I5NO} : Οι συντελεστές κορεσμού οξειδίου του αζώτου χρησιμοποιούνται ως ρυθμιστικές παράμετροι για τις διεργασίες απονιτροποίησης. Συγκεκριμένα, ο k_{I3NO} χρησιμοποιείται για την αναγωγή νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου, ο k_{I4NO} για τη μετατροπή μονοξειδίου του αζώτου σε υποξείδιο του αζώτου και ο k_{I5NO} για τη μετατροπή υποξειδίου του αζώτου σε αέριο άζωτο. Η τιμή του κάθε συντελεστή είναι 0.5 $\frac{\text{g N}}{\mathrm{m}^3}$ 0.3 $\frac{\text{g N}}{\mathrm{m}^3}$ και 0.075 $\frac{\text{g N}}{\mathrm{m}^3}$ αντίστοιχα. Στην 1^{η} και στην 3^{η} διεργασία ο συντελεστής "δεν επιτρέπει" την πραγματοποίηση των διεργασίων εαν υπάρχει μονοξείδιο του αζώτου, ενώ στη 2^{η} διεργασία "επιτρέπει" την πραγματοποίηση μόνο παρουσία μονοξειδίου του αζώτου.

b_H : Είναι η μέγιστη ταχύτητα αποσύνθεσης της ετεροτροφικής βιομάζας. Όπως η μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης, έτσι και αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία σύμφωνα με τον τύπο $b_H = b_H^{20} * 1.116^{(T-20)}$. Για θερμοκρασία 20^{o}C το b_H λαμβάνει την τιμή 0.62d^{-1}.

q_{AOBAMO}: Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται στη νιτροποίηση κατά τη διεργασία της οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη με τη βοήθεια του ενζύμου της αμμωνίας μονοοξυγενάση (AMO). Είναι συντελεστής μέγιστης ταχύτητας που λαμβάνει την τιμή 5.2008 $\frac{\text{mg N}}{(\text{mg οργανικό φορτίο} * \mathrm{d})}$.

k_{OHAOB1}, k_{NHAOB} : Οι συντελεστές κορεσμού οξυγόνου και αμμωνιακού αζώτου χρησιμοποιούνται στη διεργασία οξείδωσης της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη με τη βοήθεια του ενζύμου της αμμωνίας μονοοξυγενάση (AMO) και λειτουργούν ως "διακόπτες" ώστε να σταματάει η διεργασία στο μοντέλο, αν δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου και αμμωνιακού αζώτου. Η τιμή που λαμβάνει ο κάθε συντελεστής στο μοντέλο είναι 1 $\frac{\mathrm{g\ O2}}{\mathrm{m^3}}$ και 0.2 $\frac{\mathrm{g\ NH4}}{\mathrm{m^3}}$, αντίστοιχα.

μ_{AOBHAO} : Η παράμετρος αυτή εκφράζει τη μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης των αμμωνιακών οξειδωτικών βακτηρίων, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Για $T=20^oC$ λαμβάνει την τιμή $0.78d^{-1}$.

k_{OHAOB2} : Είναι συντελεστής κορεσμού που αφορά σε όλα τα στάδια οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε νιτρώδη. Δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση των διεργασιών που απαιτούν διαλυμένο οξυγόνο, όταν αυτό είναι σε χαμηλές ή μηδενικές συγκεντρώσεις. Η τιμή του είναι 0.6 $\frac{\mathrm{g\ O2}}{\mathrm{m^3}}$.

$k_{NH2OHAOB}$, $k_{NOAOBHAO}$: Είναι συντελεστές κορεσμού εκ των οποίων ο 1^ος^ χρησιμοποιείται κατά τη διεργασία οξείδωσης της υδροξυλαμίνης σε NOH και ο 2^ος^ κατά τη διεργασία οξείδωσης του μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη. Είναι και οι δύο περιοριστικοί συντελεστές για τις διεργασίες στις οποίες συμμετέχουν, ελέγχοντας αν η συγκέντρωση των απαιτούμενων συστατικών είναι επαρκής ώστε να γίνουν οι διεργασίες. Οι τιμές τους είναι 0.9 $\frac{\mathrm{g\ NH2OH}}{\mathrm{m^3}}$ και 0.0003 $\frac{\mathrm{g\ NO}}{\mathrm{m^3}}$ αντιστοίχως.

q_{AOBHAO} : Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται στη διεργασία οξείδωσης μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη. Αναφέρεται στο μέγιστο ρυθμό πραγματοποίησης της διεργασίας και λαμβάνει την τιμή 5.2008 $\frac{\mathrm{mg\ N}}{(\mathrm{mg\ οργανικό\ φορτίο} * \mathrm{d})}$.

$q_{AOBN2ONN}$: Κατά τη διεργασία παραγωγής υποξειδίου του αζώτου από μονοξείδιο το αζώτου, στα πλαίσια της νιτροποίησης, χρησιμοποιείται ο συντελεστής αυτός που εκφράζει τη μέγιστη ταχύτητα πραγματοποίησης της διεργασίας και είναι ίσος με 0.0078 $\frac{\mathrm{mg\ N}}{(\mathrm{mg\ οργανικό\ φορτίο} * \mathrm{d})}$.

$k_{NOAOBNN}$: Ο συντελεστής κορεσμού μονοξειδίου του αζώτου, ως “διακόπτης” της διεργασίας παραγωγής υποξειδίου από μονοξείδιο το αζώτου, ελέγχει πότε υπάρχει επαρκές NO για να γίνει η διεργασία. Η τιμή του είναι 0.008 $\frac{\mathrm{g\ NO}}{\mathrm{m^3}}$.

$q_{AOBN2OND}$: Κατά την απονιτροποίηση πραγματοποιείται η διεργασία της αναγωγής νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου και μονοξειδίου σε υποξείδιο του αζώτου. Η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η εν λόγω διεργασία εκφράζεται μέσω του συντελεστή αυτού και είναι ίση με 13.008 $\frac{\text{mg N}}{(\text{mg οργανικό φορτίο}*\text{d})}$.

$k_{HNO2AOB}$: Ο συντελεστής κορεσμού νιτρωδών περιορίζει τη μετατροπή νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου αν τα πρώτα είναι σε χαμηλή συγκέντρωση στα λύματα. Η τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής είναι 0.004 $\frac{\text{g NO2}}{\text{m}^3}$.

$k_{OHAOBND}$, k_{IOHAOB} : Οι δύο αυτοί συντελεστές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του f_{SO} που είναι παράγοντας της απονιτροποίησης. Ο πρώτος ($k_{OHAOBND}$) εκφράζει κατά πόσο η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου επηρεάζει την απονιτροποίηση των νιτροποιητών, ενώ ο δεύτερος (k_{IOHAOB}) λειτουργεί ως διακόπτης για να ρυθμίζει τα επίπεδα απονιτροποίησης με παρουσία οξυγόνου.

μ_{NOB} μ_{AOB} : Οι παράμετροι αυτές εκφράζουν τη μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης των νιτρικών και των αμμωνιακών οξειδωτικών βακτηρίων αντίστοιχα, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Για T=20^{o}C λαμβάνουν και οι δύο την τιμή 0.78d^{-1}.

k_{OHNOB}, k_{NO2NOB}, k_{ALKNOB} : Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται στην εξίσωση της αερόβιας ανάπτυξης των νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων. Πρόκειται για συντελεστές κορεσμού οξυγόνου, νιτρωδών και αλκαλικότητας και έχουν τιμές 1.2 $\frac{\text{g O2}}{\text{m}^3}$, 0.5 $\frac{\text{g NO2}}{\text{m}^3}$ και 0.082 $\frac{\text{g CaCO3}}{\text{m}^3}$.

b_{NOB}, b_{AOB} : Οι παράμετροι αυτές εκφράζουν τη μέγιστη ταχύτητα φθοράς των νιτρικών και των αμμωνιακών οξειδωτικών βακτηρίων, αντίστοιχα. Για θερμοκρασία ίση με 20^{o}C λαμβάνουν και οι δύο την τιμή 0.096d^{-1}.

Στοιχειομετρικές παράμετροι :

fs_I : η ποσότητα μη βιοδιασπάσιμης, διαλυτής, οργανικής ύλης που παράγεται κατά την υδρόλυση. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η ποσότητα αυτή είναι μηδενική.

Y_H : Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τη μάζα ετεροτροφικών μικροοργανισμών που αναπτύσσεται ανά μονάδα εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης που καταναλώνεται . Στο μοντέλο η παράμετρος αυτή έχει την τιμή 0.6 $\frac{\text{gr αναπτυσσόμενης βιομάζας (COD)}}{\text{gr καταναλισκόμενης οργανικής ύλης (COD)}}$.

n_g : διορθωτικός συντελεστής για την ανοξική ανάπτυξη των ετεροτροφικών μικροοργανισμών, ο οποίος στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι n_g =1.

Y_{AOB} : Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τη μάζα αμμωνιακών οξειδωτικών βακτηρίων που αναπτύσσεται ανά μονάδα εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης που καταναλώνεται . Η τιμή του είναι 0.18 $\frac{\text{gr αναπτυσσόμενης βιομάζας (COD)}}{\text{gr καταναλισκόμενης οργανικής ύλης (COD)}}$.

Y_{NOB} : Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τη μάζα νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων που αναπτύσσεται ανά μονάδα εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης που καταναλώνεται . Η τιμή του είναι 0.08 $\frac{\text{gr αναπτυσσόμενης βιομάζας (COD)}}{\text{gr καταναλισκόμενης οργανικής ύλη (COD)}}$.

Όπως παρατηρείται, η τιμή του Y_H είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των Y_{AOB} και Y_{NOB}.

i_{NXS} : Η παράμετρος αυτή εκφράζει τη μάζα αζώτου που υπάρχει ανά μονάδα αργά βιοδιασπάσιμης σωματιδιακής οργανικής ύλης και είναι ίση με 0.04 $\frac{\text{gr αζώτου (N)}}{\text{gr αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλη(COD)}}$.

i_{NSF} : Η παράμετρος αυτή εκφράζει τη μάζα αζώτου που υπάρχει ανά μονάδα εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης και είναι ίση με 0.03 $\frac{\text{gr αζώτου (N)}}{\text{gr εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης(COD)}}$.

i_{XB}: Εκφράζει τη μάζα αζώτου που υπάρχει ανά μονάδα οργανικής ύλης (όπου σαν μονάδα οργανικής ύλης ορίζεται το κύτταρο) και είναι ίσο με 0.086 $\frac{\text{gr αζώτου (N)}}{\text{gr βιομάζας(COD)}}$.

i_{XP} : Εκφράζει τη μάζα αζώτου που υπάρχει ανά μονάδα αδρανούς οργανικής ύλης και είναι ίσο με 0.01 $\frac{\text{gr αζώτου (N)}}{\text{gr αδρανούς οργανικής ύλης(COD)}}$. Όπως είναι φανερό, αν εξεταστεί ξεχωριστά το ποσοστό αζώτου στα αδρανή στερεά είναι μικρότερο από το ποσοστό αζώτου στα συνολικά στερεά.

f_p: Η παράμετρος αυτή εκφράζει το ποσοστό των προϊόντων φθοράς των μικροοργανισμών (b·X) που μετατρέπεται σε σωματιδιακά, μη βιοδιασπάσιμα, αδρανή προϊόντα (X_p) κατά τη διαδικασία της αποσύνθεσης. Η τιμή της είναι: $f_p = \frac{Xp}{b*X}$ =0.08.

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 3.3.4.1 και Πίνακας 3.3.4.2) παρουσιάζεται συνοπτικά η σχέση που συνδέει κάθε διεργασία του μοντέλου με κάθε συστατικό του.

Πίνακας 3.3.4.1 Στοιχειομετρία του μαθηματικού μοντέλου ενεργού ιλύος (μη αζωτούχα συστατικά)

	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ \ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	SI	XI	XS	SS	XBH	XAOB	XNOB	XNV	SO	SALK
ρ1	αερόβια υδρόλυση	0		-1	1.0-fSI						
ρ2	ανοξική υδρόλυση (NO_3)	0		-1	1.0-fSI						
ρ3	ανοξική υδρόλυση (NO_2)	0		-1	1.0-fSI						
ρ4	αναερόβια υδρόλυση	0		-1	1.0-fSI						
ρ5	αερόβια ανάπτυξη X_{BH}				-1/Yh	1				-(1.0-Yh)/Yh	-ixb/14.0
ρ6	απονιτροποίηση X_{BH}				-1/(Yh*nG)	1					(1.0-Yh)/(14.0*2.86*Yh) - (ixb/14.0)
ρ7	ανοξική ανάπτυξη X_{BH} (1ο στάδιο)				-1/(Yh*nG)	1					(1.0-Yh)/(14.0*2.86*Yh) - (ixb/14.0)
ρ8	ανοξική ανάπτυξη X_{BH} (2ο στάδιο)				-1/(Yh*nG)	1					(1.0-Yh)/(14.0*2.86*Yh) - (ixb/14.0)
ρ9	ανοξική ανάπτυξη X_{BH} (3ο στάδιο)				-1/(Yh*nG)	1					(1.0-Yh)/(14.0*2.86*Yh) - (ixb/14.0)
ρ10	αποσύνθεση X_{BH}		fp	1.0-fp		-1					
ρ11	οξείδωση NH_4 σε NH_2OH									-(8.0/7.0)	-ixb/14.0
ρ12	οξείδωση NH_2OH σε NO						1			-(12.0/7.0-Yaob)/Yaob	-ixb/14.0
ρ13	οξείδωση NO σε NO_2									-4.0/7.0	-ixb/14.0
ρ14	αναγωγή NO σε N_2O										-ixb/14.0
ρ15	αναγωγή NO_2 σε NO και σε N_2O										-ixb/14.0
ρ16	αερόβια ανάπτυξη X_{NOB}							1		-(8.0/7.0-Ynob)/Ynob	-ixb/14.0
ρ17	αποσύνθεση X_{AOB}		fp	1.0-fp			-1				
ρ18	αποσύνθεση X_{NOB}		fp	1.0-fp				-1			

Πίνακας 3.3.4.2 Στοιχειομετρία του μαθηματικού μοντέλου ενεργού ιλύος (αζωτούχα συστατικά)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ \ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	SN2O	SNH	SNO	SNO2	SNO3	SNH2OH	SN2
αερόβια υδρόλυση		(iNXS-(1-fSI)*iNSF)					
ανοξική υδρόλυση (NO_3)		(iNXS-(1-fSI)*iNSF)					
ανοξική υδρόλυση (NO_2)		(iNXS-(1-fSI)*iNSF)					
αναερόβια υδρόλυση		(iNXS-(1-fSI)*iNSF)					
αερόβια ανάπτυξη X_{BH}		-ixb					
απονιτροποίηση X_{BH}		-ixb		(1.0-Yh*ng)/(Yh*ng*8.0/7.0)	-(1.0-Yh*ng)/(Yh*ng*8.0/7.0)		
ανοξική ανάπτυξη X_{BH} (1ο στάδιο)		-ixb	(1.0-Yh*nG)/(Yh*nG*4.0/7.0)	-(1.0-Yh*ng)/(Yh*ng*4.0/7.0)			
ανοξική ανάπτυξη X_{BH} (2ο στάδιο)	(1.0-Yh*nG)/(Yh*nG*4.0/7.0)	-ixb	-(1.0-Yh*nG)/(Yh*nG*4.0/7.0)				
ανοξική ανάπτυξη X_{BH} (3ο στάδιο)	-(1.0-Yh*nG)/(Yh*nG*4.0/7.0)	-ixb					(1.0-Yh)/((12.0/7.0)*Yh)
αποσύνθεση X_{BH}		ixb-ixp*fp					
οξείδωση NH_4 σε NH_2OH		-1				1	
οξείδωση NH_2OH σε NO		-ixb	1.0/Yaob			-1.0/Yaob	
οξείδωση NO σε NO_2			-1	1			
αναγωγή NO σε N_2O	4		-4	1		-1	
αναγωγή NO_2 σε NO και σε N_2O	2			1		-1	
αερόβια ανάπτυξη X_{NOB}		-ixb		-1.0/Ynob	1.0/Ynob		
αποσύνθεση X_{AOB}		ixb-ixp*fp					
αποσύνθεση X_{NOB}		ixb-ixp*fp					

3.3.5 ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ (SRT)

Ως χρόνος παραμονής στερεών ορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο η ιλύς παραμένει στο σύστημα. Ο χρόνος παραμονής στερεών (SRT) συνδέεται με την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και με την απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου μέσω της νιτροποίησης. Συγκεκριμένα, για την απομάκρυνση οργανικού φορτίου απαιτούνται 3-5 d ενώ για τη νιτροποίηση απαιτούνται 6-10 d. Άρα για απομάκρυνση αζώτου ο SRT είναι αυξημένος και συνεπώς όταν λαμβάνονται υπόψη και οι δύο απαιτήσεις, με συνυπολογισμό και του συντελεστή ασφαλείας, ο SRT πρέπει να είναι περίπου 10d. Για να αποφευχθούν οι μεγάλοι όγκοι δεξαμενών στην περίπτωση αυτή, γίνεται επανακυκλοφορία στερεών στο σύστημα. Στην περίπτωση επανακυκλοφορίας ο χρόνος παραμονής στερεών διαφέρει από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (χρονικό διάστημα για το οποίο τα λύματα παραμένουν στο σύστημα). Ο SRT επηρεάζει την απόδοση των διεργασιών, και συνεπώς και τη ζήτηση οξυγόνου στο σύστημα. (Σημειώσεις Π. Μελίδη, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Διαχείρισης και Τεχνολογίας Υγρών Αποβλήτων)

3.3.6 ΖΗΤΗΣΗ ΟΞΥΓΟΝΟΥ

Το σύστημα καταναλώνει ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου για διάφορες διεργασίες. Διαλυμένο οξυγόνο καταναλώνεται μέσω της διεργασίας της αερόβιας υδρόλυσης (ρ_1), για την αερόβια ανάπτυξη ετεροτροφικών μικροοργανισμών (ρ_5) αλλά και αμμωνιακών και νιτρικών οξειδωτικών βακτηρίων (ρ_{16}). Επιπροσθέτως το οξυγόνο καταναλώνεται σε όλες τις διεργασίες της νιτροποίησης, και πιο συγκεκριμένα κατά την οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη (ρ_{11}), της υδροξυλαμίνης σε μονοξείδιο του αζώτου (ρ_{12}), του μονοξειδίου του αζώτου σε νιτρώδη (ρ_{13}) και των νιτρωδών σε νιτρικά.

Η μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου περιγράφεται από το DSO το οποίο έχει διατυπωθεί στην περιγραφή των εξισώσεων μεταβολής συγκέντρωσης.

Στο μοντέλο των Koumaki et al. (2017) που έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός της απαίτησης για οξυγόνο υπολογίζεται στα ακόλουθα στάδια:

- Αρχικά υπολογίζεται ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου (OTR). Είναι ανάλογος της μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (DSO) που μας δείχνει πόσο οξυγόνο καταναλώθηκε στο σύστημα, άρα πόσο πρέπει να αναπληρωθεί.

Υπολογίζεται από τον τύπο: OTR = $\frac{|\mathrm{DSO}|}{\mathrm{dt}}$ *Vk (kgO_2/χρονικό βήμα), όπου Vk είναι ο όγκος κάθε αερόβιου διαμερίσματος του βιολογικού αντιδραστήρα.

- Στη συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου KLA που εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο αναπληρώνεται το οξυγόνο στο σύστημα και ορίζεται ως KLA = $\frac{\mathrm{OTR}}{(\mathrm{Cs20}-\mathrm{CO}) * \mathrm{Vk}}$ (1/χρονικό βήμα), όπου Cs20 είναι η συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου για θερμοκρασία 20^{o}C, η οποία έχει τιμή 9.02 mgO_2/L (Σαραντόπουλος, 2015) και CO είναι η συγκέντρωση ελέγχου (set-point) του διαλυμένου οξυγόνου, δηλαδή μια τιμή γύρω από την οποία πρέπει να διατηρούνται τα επίπεδα οξυγόνου στο κάθε διαμέρισμα. Μία συνηθισμένη τιμή για τη συγκέντρωση ελέγχου του DO είναι τα 2mg/L.
- Τέλος, υπολογίζεται το SOTR, που εκφράζει το ρυθμό μεταφοράς οξυγόνου σε πρότυπες συνθήκες. Είναι ανάλογο του OTR αλλά εξαρτάται και από άλλους παράγοντες (T, aF, Cs20, CO). O τύπος που εκφράζει το SOTR είναι: SOTR= $\frac{\mathrm{OTR}*\mathrm{Cs20}}{\mathrm{aF}*1.024^{\mathrm{T}-20}*(0.95*\mathrm{Cs20}-\mathrm{CO})}$ (kgO_2/χρονικό βήμα). Ως aF ορίζεται ο συντελεστής επίδρασης λυμάτων και γήρανσης διαχυτήρων, που προσαυξάνει την καθαρή ζήτηση σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα. Ο συντελεστής aF λαμβάνει την τιμή 0.55, 0.60, 0.65 και 0.70 για καθένα από τα 4 αεριζόμενα διαμερίσματα, αντίστοιχα.

Τα KLA, OTR, και SOTR υπολογίζονται σε ωριαία και ημερήσια βάση. Επομένως, αφού το DSO υπολογίζεται ανά χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών στον κώδικα (1 sec), τα KLA, OTR, SOTR αθροίζονται για κάθε ώρα ή κάθε ημέρα, για να προκύψουν οι επιθυμητές μονάδες μέτρησης.

Η συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου (CO), όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα σε επιθυμητά επίπεδα. Στην πραγματικότητα το διαλυμένο οξυγόνο ποτέ δε θα έχει ακριβώς την τιμή της συγκέντρωσης ελέγχου, αλλά ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού, μπορεί να την προσεγγίσει περισσότερο ή λιγότερο. Στην εκδοχή του μοντέλου, όπως ήταν πριν γίνουν οι τροποποιήσεις που θα περιγραφούν στη συνέχεια, το διαλυμένο οξυγόνο για κάθε χρονική στιγμή ορίζεται ίσο με τη συγκέντρωση ελέγχου του για απλουστευτικούς λόγους.

3.3.7 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Στο αρχικό μοντέλο των Koumaki et al. (2017), πριν τις τροποποιήσεις για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η ενέργεια που καταναλώνεται για τον αερισμό ανά χρονικό βήμα εξαρτάται από το SOTR και από το μέγιστο συντελεστή αποδοτικότητας αερισμού efmax του συστήματος. Ορίζεται από τον τύπο AERATION_step = $\frac{\mathrm{SOTR\_step}}{\mathrm{efmax}}$ (kWh/χρονικό βήμα). Ο υπολογισμός της γίνεται σε ωριαία και ημερήσια βάση.

3.3.8 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΚΡΟΗΣ (EQI)

Η ποιότητα εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και για το λόγο αυτό καθίσταται αναγκαίο να υπάρχει μια τιμή που να εκφράζει το μέγεθος αυτο λαμβάνοντας υπόψη τους πιο καθοριστικούς από τους παράγοντες. Το μέγεθος αυτό είναι ο δείκτης ποιότητας εκροής EQI ο οποίος εκφράζεται από τον τύπο:

EQI= $[2\cdot TSS + COD + 30\cdot TKN + 10\cdot(SNH2OH+SNO+SNO_2+SNO_3)+2\cdot BOD]\cdot Q$ (kg pollution/χρονικό βήμα). Στην παρούσα εργασία ο δείκτης EQI υπολογίζεται σε ωριαία βάση και η συνολική ποσότητα υπολογίζεται αθροίζοντας όλες τις ωριαίες τιμές για το διάστημα της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται από την εξίσωση υπολογισμού, ο EQI εξαρτάται από το COD, το BOD, τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), τα TKN (TKN=SNH+SNH2OH) και το άθροισμα υδροξυλαμίνης, μονοξειδίου του αζώτου, νιτρωδών και νιτρικών ($SNH2OH+SNO+SNO_2+SNO_3$). Καθένα από αυτά τα στοιχεία πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή που εκφράζει το βαθμό στον οποίο κάθε όρος της εξίσωσης επηρεάζει την ποιότητα εκροής.

3.3.9 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΥΠΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (N_2O)

Το υποξείδιο του αζώτου εντάσσεται στα αέρια του θερμοκηπίου. Παράγεται στις δεξαμενές αερισμού και μια ογκομετρική μάζα του μεταδίδεται από το νερό στον αέρα. Υπολογίζεται από τον τύπο: $N_2O = 0.91\cdot KLA\cdot SN_2O\cdot V_k\cdot N2OSE$ (kgN_2O/χρονικό βήμα). Οι εκπομπές N_2O υπολογίζονται σε κάθε διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα σε ημερήσια βάση. Η μείωση των εκπομπών N_2O είναι ένας από τους στόχους στα πλαίσια βελτιστοποίησης της λειτουργίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

3.4 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ

3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύστημα αερισμού μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού ενεργειακού κόστους της εγκατάστασης. Κατά συνέπεια κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση της βελτιστοποίησης του συστήματος ελέγχου του αερισμού για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Σε κάθε προσπάθεια βελτιστοποίησης, αναγκαία προϋπόθεση είναι η διατήρηση των ορίων εξόδου κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια. Στα πλαίσια της διερεύνησης μεθόδων ελέγχου του συστήματος αερισμού για το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Koumaki et al. (2017), τροποποιήθηκαν οι υπολογισμοί που σχετίζονται με την παροχέτευση οξυγόνου αλλά και ο υπολογισμός της ενέργειας που καταναλώνεται για αερισμό. Βασική αρχή των αλλαγών ήταν να προσομοιωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συνθήκες που δημιουργεί η μεταβολή της ζήτησης οξυγόνου στο σύστημα.

3.4.2 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΙΣΜΟ

Για τον υπολογισμό των βασικών παραμέτρων που συνιστούν το σύστημα αερισμού ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία διαμόρφωσης του μοντέλου:

- Αρχικά υπολογίζεται η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, για κάθε χρονικό βήμα με βάση την ακόλουθη εξίσωση: $SO_{i+1} = SO_i + OTR_i * \frac{\text{χρονικό βήμα}}{Vk}$, όπου $SO_i = SO_i + DSO_{i+1}$ σύμφωνα με την εξίσωση μεταβολής συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου όπως διατυπώνεται στο υποκεφάλαιο 3.3.3. Το DSO είναι αρνητική ποσότητα αφού εκφράζει το διαλυμένο οξυγόνο που καταναλώνεται από το σύστημα, ενώ το OTR είναι θετική ποσότητα αφού εκφράζει το ρυθμό αναπλήρωσης διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα για να διατηρούνται τα επιθυμητά επίπεδα DO.
- Στη συνέχεια, ο υπολογισμός του KLA (ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου) γίνεται βάσει του ελέγχου της διαφοράς του διαλυμένου οξυγόνου από τη συγκέντρωση ελέγχου του (SO - SO set-point). Η τιμή SO set-point εκφράζει τη συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα. Χρησιμοποιείται για να διατηρείται το διαλυμένο οξυγόνο στα επιθυμητά επίπεδα ώστε να γίνονται σωστά οι

διάφορες βιοχημικές διεργασίες. Αν (SO>SO set-point), τότε το KLA μειώνεται ενώ αν (SO<SO set-point), τότε το KLA αυξάνεται. Οι βασικοί τρόποι με τους οποίους μεταβάλλεται το τρέχον KLA είναι: με χρήση διακοπτόμενης λειτουργίας (on/off) , με βηματική ρύθμιση και με αναλογική ρύθμιση. Οι μέθοδοι αυτές εξηγούνται πιο αναλυτικά στη συνέχεια:

I. **Διακοπτόμενη λειτουργία (On-Off controller):** Το KLA παίρνει τιμές 0 και KLAmax ανάλογα με την συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου που υπάρχει στο σύστημα. Αν (SO > SO set-point) τότε το KLA ορίζεται 0, ενώ αν (SO < SO set-point) τότε το KLA γίνεται KLAmax. Η τιμή του KLAmax προκαθορίζεται για το σύστημα και εκφράζει τη μέγιστη δυναμικότητα που αντιστοιχεί στην λειτουργία και των 4 αεριστήρων του συστήματος. Άρα η τιμή που έχει το KLA κάθε χρονική στιγμή είναι: KLA_{j+1}=KLAmax ή KLA_{j+1}=0.

II. **Βηματική ρύθμιση (Step controller):** Το KLA σε κάθε χρονικό βήμα, ανάλογα με την έλλειψη ή την περίσσεια διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, αυξάνεται ή μειώνεται, αντίστοιχα, κατά μία σταθερή ποσότητα KLAmin. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στην ελάχιστη δυναμικότητα με την οποία μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα και ορίζεται ως KLAmin=KLAmax/4, εφόσον καθένας από τους 4 αεριστήρες λειτουργεί σε μία μόνο ταχύτητα. Επομένως, σε κάθε χρονικό βήμα, αν (SO > SO set-point) τότε σταματάει η λειτουργία του 1 εκ των 4 αεριστήρων, ενώ αν (SO < SO set-point) τίθεται σε λειτουργία επιπλέον 1 από τους 4 αεριστήρες. Η νέα τιμή του συντελεστή προκύπτει από την εξίσωση: $KLA_{j+1} = KLA_j \pm KLAmin$.

III. **Αναλογική ρύθμιση (Proportional controller):** Το KLA μεταβάλλεται σε κάθε χρονικό βήμα σύμφωνα με την εξίσωση $KLA_{j+1} = KLA_j + KLAset * \frac{\text{SOset point} - \text{SO}}{\text{SOset point}}$, δηλαδή μεταβάλλεται κατά μία ποσότητα ανάλογη της ποσοστιαίας έλλειψης ή περίσσειας διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα. Αν (SO > SO set-point) , τότε η διαφορά της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (SO) από τη συγκέντρωση ελέγχου (SO set-point) είναι αρνητική και το KLA τη νέα χρονική στιγμή θα μειωθεί, ενώ αν (SO < SO set-point), τότε η ίδια διαφορά είναι θετική και το KLA τη νέα χρονική στιγμή θα αυξηθεί. Το KLAset ορίζεται ίσο με KLAmax.

Το βήμα εκτέλεσης υπολογισμών στο ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης είναι το 1 sec. Ωστόσο, το KLA δεν είναι αναγκαίο να αλλάζει σε κάθε χρονικό βήμα εκτέλεσης υπολογισμών, αλλά η αλλαγή του μπορεί να προκαθοριστεί να γίνεται ανά ένα μεγαλύτερο χρονικό βήμα όπως για παράδειγμα ανά 1, 2 ή 5 min. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγιναν δοκιμές για να επιλεχθεί ένα χρονικό βήμα αλλαγής του KLA, το οποίο να μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες, και ταυτόχρονα να μην αφήνει περιθώριο για μεγάλες μεταβολές της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, κάτι το οποίο θα δυσχέραινε τη λειτουργία το συστήματος. Με το ίδιο σκεπτικό διερευνήθηκαν και άλλες βελτιστοποιητικές ρυθμίσεις στο σύστημα ελέγχου του αερισμού οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

- Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του ρυθμού μεταφοράς οξυγόνου (OTR). Ο υπολογισμός αυτός γίνεται σύμφωνα με τον τύπο $OTR_{j+1}=KLA_{j+1}*(Cs20-SO_{j+1})*Vk$ (kgO_2/μονάδα χρόνου). Τέλος, υπολογίζεται ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου σε πρότυπες συνθήκες (SOTR). Ο τύπος που χρησιμοποιείται για το SOTR είναι αυτός του αρχικού μοντέλου χωρίς κάποια τροποποίηση.

3.4.3 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Στο τροποποιημένο μοντέλο της εγκατάστασης η ενέργεια που καταναλώνεται για αερισμό υπολογίζεται από τον τύπο $En = \frac{KLA*Cs20*Vk}{efmax}$ σε kWh ανά ημέρα και ανά ώρα. Από το άθροισμα των ωρών ή ημερών λειτουργίας της εγκατάστασης προκύπτει η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια για αερισμό. Ο συντελεστής ef_{max} εκφράζει τη μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος και έχει συγκεκριμένη τιμή για κάθε σύστημα αερισμού. Στο συγκεκριμένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία αυτή, η τιμή του ef_{max} είναι 3.5 kgO_2/kWh για διάχυτο αερισμό και 2.5 kgO_2/kWh για επιφανειακό αερισμό.

Εκτός από την κατανάλωση ενέργειας,υπολογίζεται και ο συντελεστής αποτελεσματικότητας του αερισμού για κάθε χρονική στιγμή από τον τύπο $ef = \frac{OTR}{En}$ σε kgO_2/kWh. Ο συντελεστής ef είναι δείκτης της αξιοποίησης του διαλυμένου οξυγόνου που διοχετεύεται στο σύστημα και είναι πάντα μικρότερος από το efmax που είναι προκαθορισμένο και ίσο με 3.5 kgO_2/kWh για το συγκεκριμένο μοντέλο.

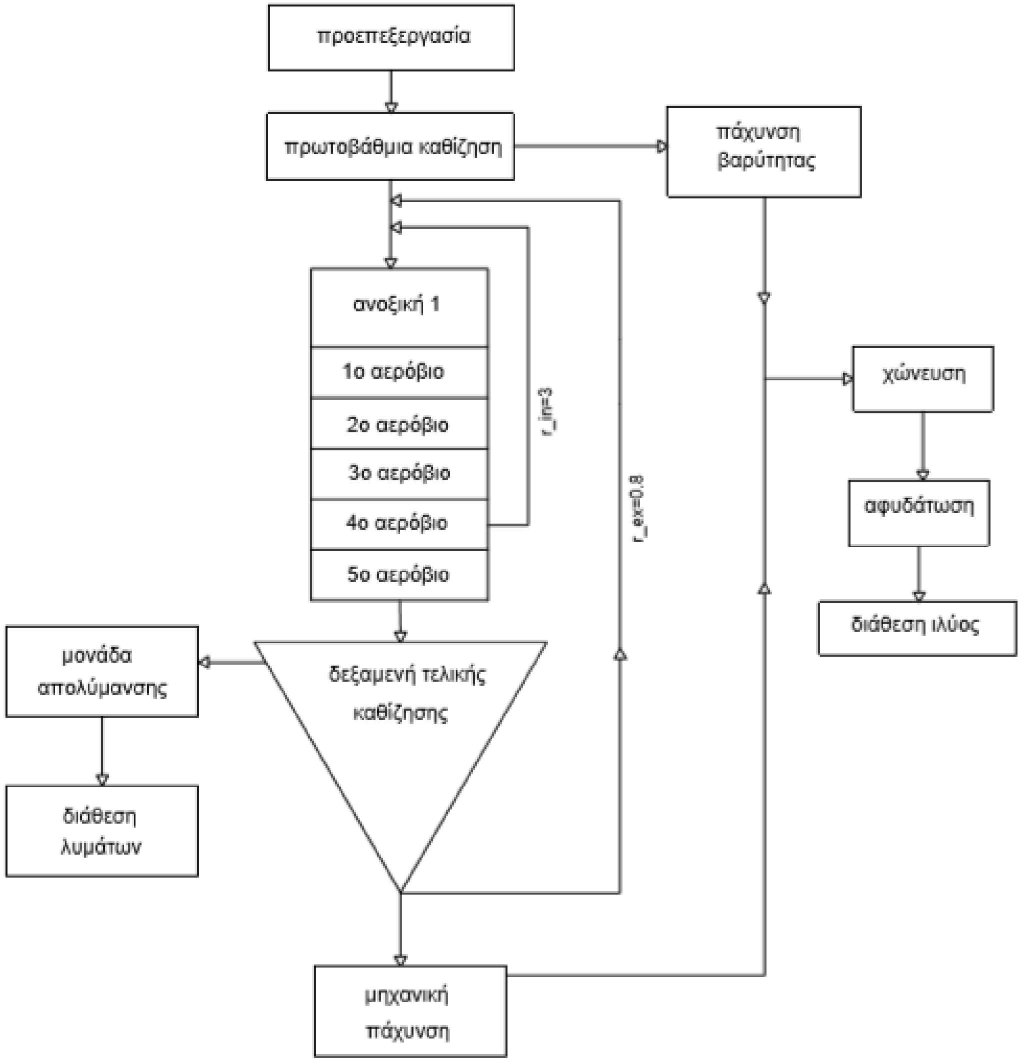
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, προσομοιώθηκε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων βασισμένη στην εγκατάσταση του μοντέλου των Koumaki et al. (2017). Η προσομοιωμένη εγκατάσταση λειτουργεί με στόχο την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αζώτου από τα ανεπεξέργαστα λύματα και την τελική διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων στον υδάτινο αποδέκτη με ικανοποιητική ποιότητα εκροής.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις βασικές μονάδες της εγκατάστασης, ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή αυτών, ενώ παρατίθεται και μία σχηματική απεικόνιση (Σχήμα 4.1.1) που εξηγεί ποιοτικά την προσομοιωμένη εγκατάσταση.

- Προεπεξεργασία
- Πρωτοβάθμια καθίζηση
- Βιολογικός αντιδραστήρας (ανοξική και αερόβιες δεξαμενές)
- Δευτεροβάθμια καθίζηση
- Πάχυνση βαρύτητας
- Μηχανική πάχυνση
- Χώνευση
- Αφυδάτωση
- Απολύμανση



Σχήμα 4.1.1 Μονάδες προσομοιωμένης Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων

Κατά την είσοδο των ανεπεξέργαστων λυμάτων στην εγκατάσταση γίνεται η προεπεξεργασία στην οποία απομακρύνονται από τα λύματα τα στερεά διαμέτρου μεγαλύτερης των 6mm. Στη συνέχεια, τα λύματα οδηγούνται στην πρωτοβάθμια επεξεργασία στην οποία πραγματοποιείται απομάκρυνση στερεών κατά 50%. Η δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης έχει επιφάνεια 1500m^2. Μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία ακολουθεί ο βιολογικός αντιδραστήρας στον οποίο πραγματοποιούνται όλες οι αερόβιες και ανοξικές διεργασίες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το πρώτο διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα λειτουργεί υπό ανοξικές συνθήκες. Ο όγκος της ανοξικής δεξαμενής είναι Vanox=8200m^3. Στη συνέχεια ακολουθούν 5 αερόβια διαμερίσματα εκ των οποίων τα 4 είναι αεριζόμενα, δηλαδή γίνεται σε αυτά παροχέτευση οξυγόνου. Ο όγκος καθενός εκ των 4 αεριζόμενων διαμερισμάτων είναι $3716m^3$ ενώ ο όγκος του $5^{ου}$ και τελευταίου αερόβιου διαμερίσματος είναι $695m^3$. Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται επανακυκλοφορία των λυμάτων από την τελευταία αερόβια δεξαμενή πίσω στην ανοξική με συντελεστή επανακυκλοφορίας ίσο με $r_{εσωτερική}$=3. Το $5^{ο}$ αερόβιο διαμέρισμα χρησιμοποιείται ως δεξαμενή απαερίωσης, προκειμένου να μειώνεται η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου των λυμάτων μέσα σε αυτό και να μην επανακυκλοφορεί μεγάλη ποσότητα στην ανοξική δεξαμενή. Μετά τη βιολογική επεξεργασία ακολουθεί η τελική καθίζηση. Η επιφάνεια της δεξαμενής τελικής καθίζησης έχει εμβαδόν $6000m^2$ και το ύψος της είναι 4.5m. Από τη δεξαμενή τελικής καθίζησης τα επεξεργασμένα πλέον λύματα οδηγούνται για απολύμανση και διάθεση στον υδάτινο αποδέκτη, ενώ μέρος της ποσότητας που βρίσκεται στη δεξαμενή επανακυκλοφορεί στο σύστημα με συντελεστή επανακυκλοφορίας $r_{εξωτερική}$=0.8.

Τόσο από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας όσο και από τη δεξαμενή τελικής καθίζησης συλλέγεται η ιλύς η οποία στη συνέχεια υφίσταται επεξεργασία. Από την πρωτοβάθμια καθίζηση, μετά την απομάκρυνση των στερεών, αυτά οδηγούνται για πάχυνση σε παχυντή βαρύτητας, επιφάνειας $100m^2$. Από τη δεξαμενή τελικής καθίζησης η ιλύς που συλλέγεται οδηγείται για μηχανική πάχυνση. Κατά τη διαδικασία της πάχυνσης υπάρχει ένα ποσοστό ιλύος που επιστρέφει στο σύστημα μέσω των στραγγιδίων. Η υπόλοιπη ιλύς συγκρατείται σε ποσοστό 95% (ποσοστό συγκράτησης CR) και οδηγείται για περαιτέρω επεξεργασία στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης. Ο όγκος του χωνευτή είναι $6000m^3$. Κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης απομακρύνονται στερεά και παθογόνοι μικροοργανισμοί. Στη μονάδα αφυδάτωσης, που έπεται της μονάδας χώνευσης, συγκρατείται ποσοστό στερεών όσο και στη μονάδα πάχυνσης (CR=95%).

Οι χρόνοι παραμονής στερεών για τους οποίους προσομοιώνεται η λειτουργία της εγκατάστασης είναι 10d ή 5d, ανάλογα με τις συνθήκες για τις οποίες κρίνεται αναγκαίο να μελετηθεί κάθε σενάριο που προσομοιώνεται. Ορισμένα από τα σενάρια που θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου μελετώνται σε συνθήκες υψηλών χρόνων παραμονής στερεών, άλλα σε συνθήκες χαμηλών χρόνων παραμονής στερεών και άλλα και για τις δύο περιπτώσεις.

Η προσομοίωση του μοντέλου πραγματοποιείται με τη χρήση της FORTRAN. Για να γίνει αρχικοποίηση της προσομοίωσης, το πρόγραμμα στο οποίο γίνεται η προσομοίωση εκτελείται πρώτα για σταθερές συνθήκες εισόδου, δηλαδή με σταθερή παροχή εισόδου ίση με $62000m^3/d$ ($=2583m^3/h$). Ο χρόνος για να ισορροπήσει το μοντέλο σε σταθερές συνθήκες εκτιμάται να είναι περίπου 60 ημέρες. Αφού γίνει αρχικοποίηση, το πρόγραμμα εκτελείται για δυναμικές συνθήκες φόρτισης, σε διάστημα 7 ημερών με την παροχή εισόδου που φαίνεται στη συνέχεια στο Σχήμα 4.1.2.

Σχήμα 4.1.2 Υδρογράφημα εισόδου για την προσομοίωση σε δυναμικές συνθήκες φόρτισης

4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ KLA

4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι να αναλυθούν διάφορες μέθοδοι ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα αερισμού της εγκατάστασης, και να εξεταστούν τα περιθώρια βελτίωσης του συστήματος με χρήση αυτών των μεθόδων. Οι βασικές μέθοδοι με τις οποίες ελέγχονται τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου στα αεριζόμενα διαμερίσματα του βιολογικού αντιδραστήρα της εγκατάστασης είναι:

- Διακοπτόμενης λειτουργίας (On/off controller)
- Βηματικού ελέγχου (Step controller)
- Αναλογικού ελέγχου (Proportional controller)

Το πιο βασικό κριτήριο για την επιλογή της μεθόδου είναι η διατήρηση της ποιότητας εκροής της εγκατάστασης. Εφόσον οι συγκεντρώσεις εκροής διατηρούνται κάτω από τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές, τότε τα κριτήρια για την καταλληλότητα μιας μεθόδου είναι η δυνατότητα μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ο έλεγχος των επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα πραγματοποιείται μέσω της συγκέντρωσης ελέγχου (set-point) είτε του διαλυμένου οξυγόνου, είτε του αμμωνιακού αζώτου. Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως συγκέντρωση ελέγχου η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (SO set-point) η οποία ορίζεται 2mg/L για κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα. Η διαφορά της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου από τη συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου, κάθε χρονική στιγμή, εκφράζει την έλλειψη ή την περίσσεια διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση των επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου. Είναι χρήσιμο να διευκρινιστεί εκ των προτέρων οτι η συνολική δυναμικότητα του συστήματος αερισμού είναι ίδια για κάθε μέθοδο που εφαρμόζεται:

Η μέθοδος ελέγχου με διακοπτόμενη λειτουργία (on/off control) προϋποθέτει τη λειτουργία 1 αεριστήρα, η δυναμικότητα του οποίου είναι ίση με 15.12 h^{-1} (0.0042 s^{-1}). Αν το διαλυμένο οξυγόνο στα αεριζόμενα διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα (SO) είναι μεγαλύτερο από τη συγκέντρωση ελέγχου (SO set-point), τότε διακόπτεται η λειτουργία του αεριστήρα (KLA=0), ενώ αν είναι μικρότερο, τότε ο αεριστήρας τίθεται πάλι σε λειτουργία (KLA=KLAmax)

Η μέθοδος βηματικού ελέγχου (step control) βασίζεται στη λειτουργία 4 αεριστήρων με συνολική δυναμικότητα 15.12 h^{-1}, άρα με δυναμικότητα 3.78 h^{-1} έκαστος. Αν, μια δεδομένη χρονική στιγμή που λειτουργούν k εκ των 4 αεριστήρων, η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο βιοαντιδραστήρα είναι χαμηλότερη της συγκέντρωσης ελέγχου, τότε ξεκινάει η λειτουργία ενός επιπλέον αεριστήρα και είναι σε λειτουργία συνολικά (k+1) αεριστήρες. Αν, αντίθετα, η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου του συστήματος είναι υψηλότερη της συγκέντρωσης ελέγχου, τότε σταματάει η λειτουργία 1 αεριστήρα, και λειτουργούν συνολικά (k-1) αεριστήρες. Εναλλακτικά, η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να βασίζεται στη λειτουργία 2 αεριστήρων καθένας από τους οποίους θα είναι 2 ταχυτήτων. Σε κάθε περίπτωση, πρόκειται για βηματική μεταβολή της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου (KLA) του συστήματος αερισμού από την τιμή 0 μέχρι την τιμή KLAmax.

Η μέθοδος ελέγχου με αναλογική μετάβαση (proportional control) βασίζεται στη χρήση ρυθμιστών στροφής ή συχνότητας (inverter). Μπορεί το σύστημα να αποτελείται από 1 μόνο αεριστήρα αλλά η δυναμικότητά του ρυθμίζεται ανάλογα με την ποσοστιαία διαφορά της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (SO) από τη συγκέντρωση ελέγχου (SO set-point). Αυτό σημαίνει οτι δεν υπάρχει πεπερασμένος αριθμός ενδιάμεσων τιμών μεταξύ 0 και KLAmax για το συντελεστή μεταφοράς οξυγόνου KLA, όπως υπάρχει στις προαναφερθείσες μεθόδους και για το λόγο αυτό η τιμή του KLA προσαρμόζεται στις ανάγκες του συστήματος για διαλυμένο οξυγόνο με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι προσομοιώσεις που αναλύονται στο κεφάλαιο 4.2. πραγματοποιούνται για SRT=10d, δηλαδή για επαρκή χρόνο παραμονής στερεών, και δεν εξετάζονται δυσμενέστερες περιπτώσεις στις οποίες ο χρόνος παραμονής στερεών είναι μικρότερος.

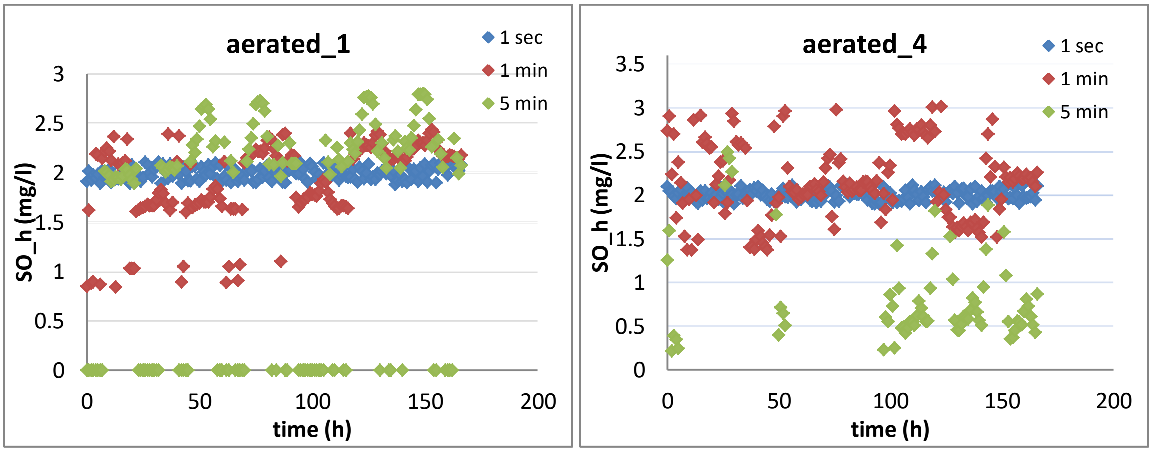
4.2.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ KLA ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Για οποιαδήποτε από τις παραπάνω μεθόδους, ο έλεγχος βάσει του οποίου ρυθμίζονται τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου στα αεριζόμενα διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα, πραγματοποιείται ανά κάποιο χρονικό βήμα. Το χρονικό βήμα ανά το οποίο γίνεται ο έλεγχος του διαλυμένου οξυγόνου ταυτίζεται με το βήμα ανά το οποίο καθορίζεται η μεταβολή της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου στο σύστημα. Σκοπός του υποκεφαλαίου αυτού είναι να προσδιοριστεί το καταλληλότερο μέγεθος για αυτό το χρονικό βήμα. Η μεταβολή του KLA ανά πολύ μικρό χρονικό διάστημα είναι πρακτικά αδύνατη, αν ληφθούν υπόψη οι χρόνοι απόκρισης του συστήματος. Από την άλλη, το μεγάλο χρονικό βήμα δεν επιτρέπει τη διαρκή παρακολούθηση των αναγκών του συστήματος και συνεπώς είναι αναμενόμενο να δημιουργούνται πολλά χρονικά κενά στα οποία το σύστημα δεν καλύπτει τις ανάγκες του και οι αποκλίσεις της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου από τη συγκέντρωση ελέγχου είναι μεγάλες. Για την εξέταση των παραπάνω υποθέσεων εφαρμόστηκαν, με χρήση και των 3 μεθόδων (on/off, step, proportional), 3 σενάρια με διαφορετικά χρονικά βήματα:

- 1 sec
- 1min
- 5min

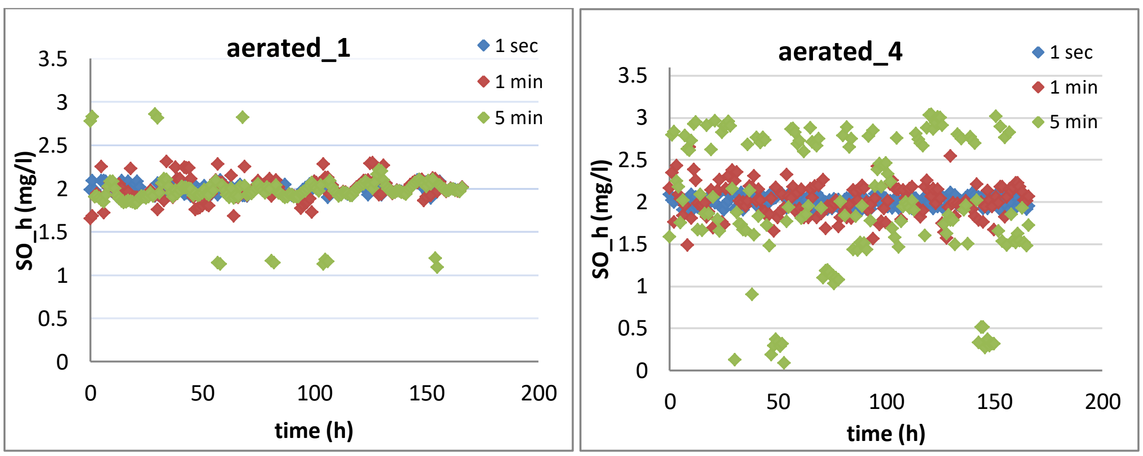
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, για καθένα από τα παραπάνω σενάρια, φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα. Αρχικά παρουσιάζεται η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο $1^{ο}$ και στο $4^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα, για εφαρμογή των 3 διαφορετικών χρονικών βημάτων με τη μέθοδο on/off control, στη συνέχεια με τη μέθοδο step control και τέλος, με τη μέθοδο proportional control. Οι τιμές των συγκεντρώσεων λαμβάνονται ανά ώρα.

ON/OFF CONTROLLER



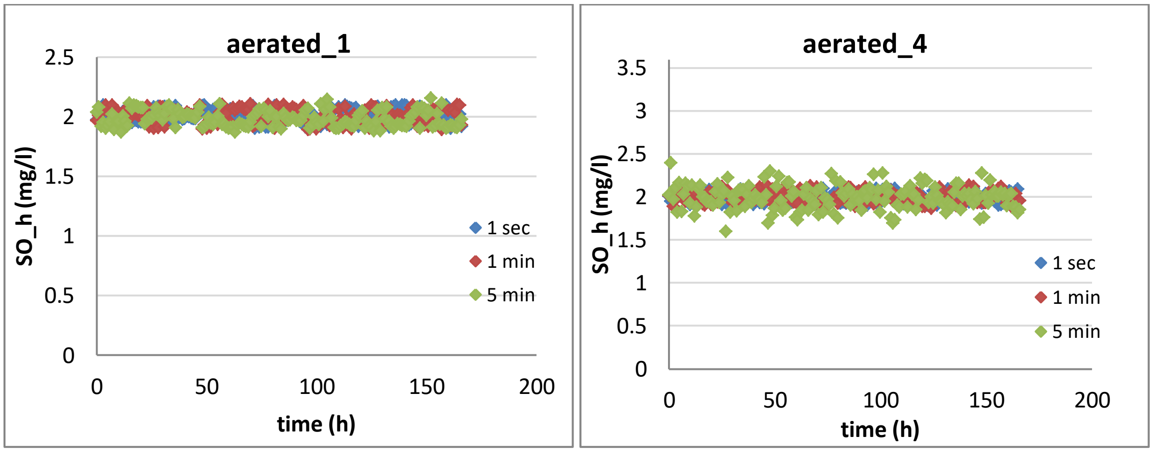
Σχήμα 4.2.2.1 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο 1° και στο 4° αεριζόμενο διαμέρισμα με χρήση της μεθόδου on/off control

STEP CONTROLLER



Σχήμα 4.2.2.2 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο 1° και στο 4° αεριζόμενο διαμέρισμα με χρήση της μεθόδου step control

PROPORTIONAL CONTROLLER



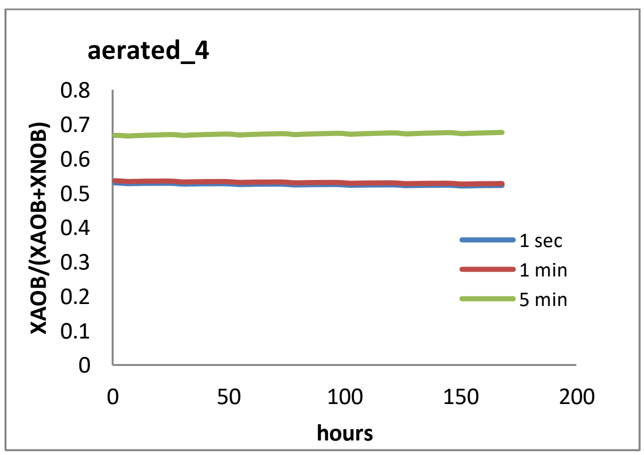
Σχήμα 4.2.2.3 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο 1^{ο} και στο 4^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα με χρήση της μεθόδου proportional control

Όπως παρατηρείται από το σχήμα 4.2.2.1, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο on/off controller, για ρύθμιση του KLA κάθε 1sec, η προσέγγιση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (SO) στη συγκέντρωση ελέγχου (SO-set point), δηλαδή στα 2±0.1 mg/L διαλυμένου οξυγόνου, είναι πολύ καλή. Για ρύθμιση του KLA κάθε 1min υπάρχει μεγάλη απόκλιση. Το διαλυμένο οξυγόνο στο 1^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα κυμαίνεται γενικά μεταξύ 1.5 και 2.5 mg/L αλλά ορισμένες χρονικές στιγμές πέφτει κάτω από 1 mg/L, ενώ αντίστοιχα στο 4^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα πλησιάζει συχνά τα 3 mg/L. Τέλος, για ρύθμιση του KLA ανά 5min, οι αποκλίσεις είναι πολύ μεγάλες και σε πολλά χρονικά διαστήματα το διαλυμένο οξυγόνο στο βιοαντιδραστήρα έχει ακόμα και μηδενική τιμή, με αποτέλεσμα την αναστολή των βιοχημικών διεργασιών που απαιτούν οξυγόνο.

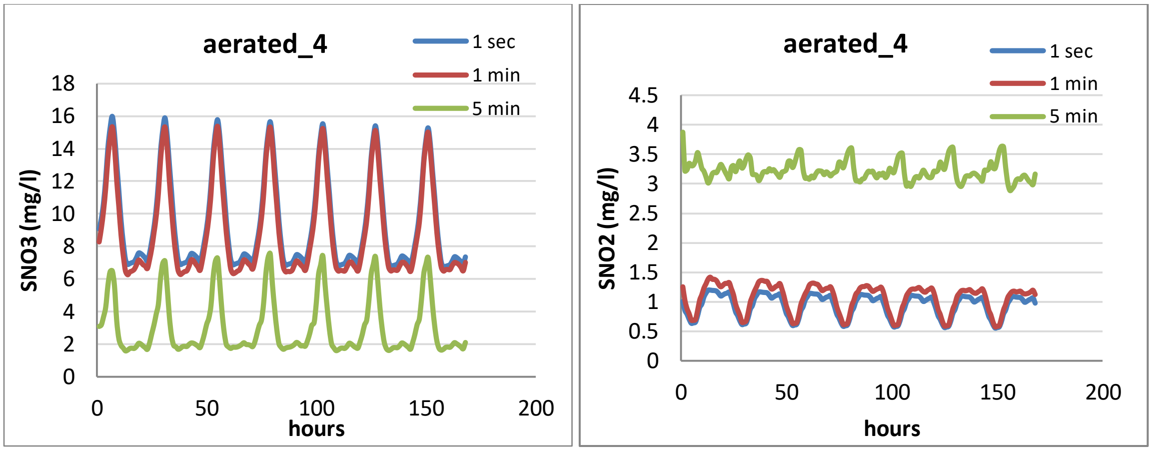
Στην περίπτωση του step controller, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.2.2, οι αποκλίσεις του SO από το SO set-point στο 1^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα είναι λιγότερες σε σχέση με τις αποκλίσεις στο 4^{ο} διαμέρισμα, και αυτό ισχύει για κάθε χρονικό βήμα ρύθμισης του KLA. Για χρονικό βήμα 1min οι τιμές του SO περιορίζονται μεταξύ 1.5 και 2.5 mg/L. Στο 1^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα, που είναι και το πιο κρίσιμο, μόνο το 30% των τιμών είναι εκτός των προκαθορισμένων ορίων, εν προκειμένω της τιμής 2±0.1 mg/L, ενώ για το 4^{ο} διαμέρισμα τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται, καθώς το 60% των τιμών του SO βρίσκονται εκτός των προκαθορισμένων ορίων . Για χρονικό βήμα 5min υπάρχουν αρκετές τιμές που αποκλίνουν αρκετά από τη συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου.

Τέλος, στην περίπτωση του proportional controller για ρύθμιση του KLA ανά 1sec και 1min, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου βρίσκεται εντός των ορίων της συγκέντρωσης ελέγχου. Ακόμα και για χρονικό βήμα 5min, το διαλυμένο οξυγόνο προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά τη συγκέντρωση ελέγχου, καθώς μόνο το 28% των τιμών της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου όλων των αεριζόμενων διαμερισμάτων ξεπερνά τα όρια της συγκέντρωσης ελέγχου.

Είναι σκόπιμο να παρατηρηθεί ο λόγος των αμμωνιακών βακτηρίων X_{AOB} προς τα αυτοτροφικά βακτήρια (X_{AOB}+X_{NOB}) αλλά και η συγκέντρωση των νιτρικών και των νιτρωδών στο βιοαντιδραστήρα, για να εξεταστεί η επίδραση των μεγάλων διακυμάνσεων της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στην ποιότητα εκροής. Ακολούθως παρουσιάζεται ο λόγος $\frac{XAOB}{XAOB+XNOB}$ και η συγκέντρωση των NO_2 και NO_3 για τα διαφορετικά χρονικά βήματα, στο 4^{o} αεριζόμενο διαμέρισμα, όπως προκύπτει από εφαρμογή της μεθόδου on/off control. Επιλέχθηκε ενδεικτικά αυτή η μέθοδος, στην οποία λόγω της έντονης επίδρασης ενός μεγάλου χρονικού βήματος, θα γίνουν πιο σαφείς οι παρατηρήσεις.



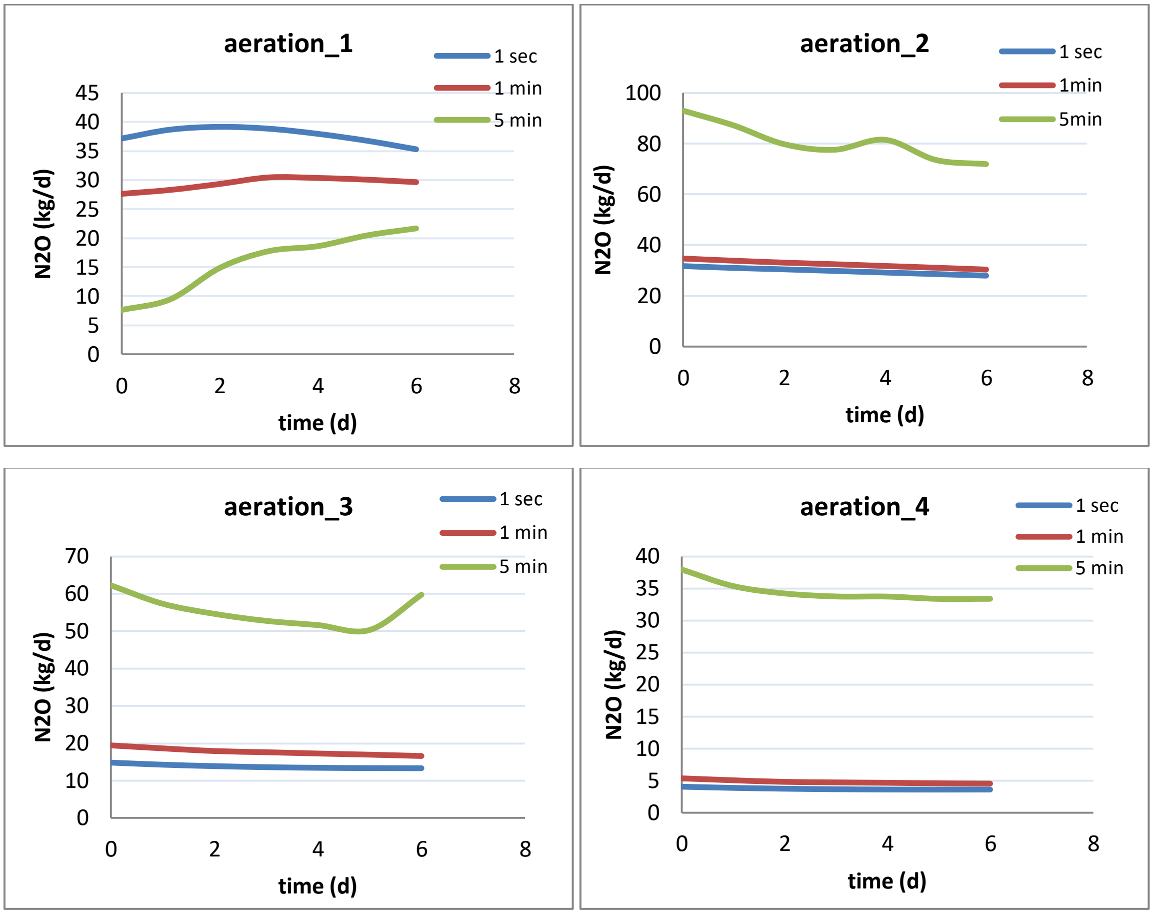
Σχήμα 4.2.2.4 Λόγος των XAOB προς τα αυτοτροφικά βακτήρια (XAOB+XNOB) στο 4ο αεριζόμενο διαμέρισμα με χρήση της μεθόδου on/off control.



Σχήμα 4.2.2.5 Συγκέντρωση νιτρικών και νιτρωδών στο 4^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα με χρήση της μεθόδου on/off control.

Από το σχήμα 4.2.2.4 φαινεται πως ο λόγος των X_{AOB} προς το σύνολο των αυτοτροφικών βακτηρίων είναι μεγαλύτερος όταν γίνεται ρύθμιση του KLA ανά 5min, σε σύγκριση με τις περιπώσεις που γίνεται ρύθμιση ανά μικρότερο χρονικό βήμα. Αυτό σημαίνει διατάραξη της δυναμικής των πληθυσμών των επιμέρους ομάδων των νιτροποιητών για το χρονικό βήμα των 5min. Καθώς οι X_{AOB} είναι υπεύθυνοι για το πρώτο στάδιο της νιτροποίησης (μετατροπή αμμωνιακού αζώτου σε νιτρώδη), ενώ οι X_{NOB} για το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης (οξείδωση των νιτρωδών σε νιτρικά), ερμηνεύονται οι τιμές των NO_2 και των NO_3 που φαίνονται στο σχήμα 4.2.2.5. Για ρύθμιση του KLA κάθε 5min, στο 4^{ο} διαμέρισμα παρατηρούνται χαμηλές τιμές στη συγκέντρωση των νιτρικών (NO_3) και υψηλές τιμές στη συγκέντρωση των νιτρωδών (NO_2), σε σχέση με τις περιπτώσεις μικρότερων χρονικών βημάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου που παρατηρούνται για χρονικό βήμα 5min (σχήμα 4.2.2.1), οδηγούν σε αδυναμία πλήρους νιτροποίησης. Ωστόσο το αμμωνιακό άζωτο εξόδου διατηρείται πάντα σε τιμές πολύ πιο χαμηλές από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο. Συγκεκριμένα, όλες οι τιμές εξόδου για το NH είναι κάτω από 0.1 mg/L. Αρα όπως διαπιστώνεται, το πρώτο στάδιο της νιτροποίησης πραγματοποιείται, αλλά η διαδικασία αναχαιτίζεται στο επόμενο στάδιο και ειδικότερα κατά την οξείδωση των νιτρωδών σε νιτρικά, το οποίο οδηγεί σε αυξημένη συγκέντρωση NO_2 και χαμηλή συγκέντρωση NO_3. Αν εστιάσει κανείς μόνο στις συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου και νιτρικών στην έξοδο, δεν φαίνεται οτι το σενάριο αυτό είναι ακατάλληλο. Είναι απαραίτητο να δοθεί έμφαση και στην αύξηση των νιτρωδών τα οποία είναι επικίνδυνα λόγω τοξικότητας.

Σε συνέχεια της παραπάνω προσομοίωσης, παρουσιάζονται και οι επομπές N_2O στα 4 αεριζόμενα διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα.



Σχήμα 4.2.2.6 Εκπομπές N_2O στα 4 αεριζόμενα διαμερίσματα με χρήση της μεθόδου on/off control.

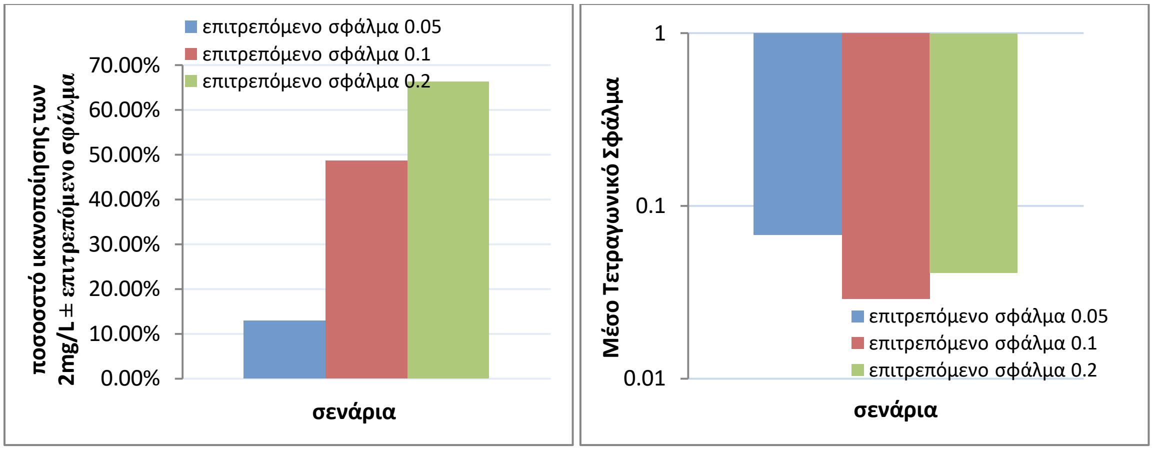
Όπως παρατηρείται από το σχήμα 4.2.2.6 οι εκπομπές N_2O για ρύθμιση του KLA ανά 5min είναι χαμηλές μόνο στο 1^o αεριζόμενο διαμέρισμα, ενώ στα υπόλοιπα 3 διαμερίσματα είναι υψηλές και μάλιστα πολύ υψηλότερες σε σχέση με περιπτώσεις μικρότερων χρονικών βημάτων. Αυτό συμβαίνει καθώς, λόγω των χαμηλών τιμών διαλυμένου οξυγόνου και της ελλιπούς νιτροποίησης, παραμένουν νιτρώδη στο σύστημα και μέσω αυτών, παρουσία X_{AOB}, παράγεται υποξείδιο του αζώτου.

Συμπερασματικά, η καταλληλότερη από τις επιλογές χρονικού βήματος που εξετάστηκαν ήταν το 1min. Η επιλογη του 1sec, έχει τα καλύτερα αποτελέσματα, αλλά δεν ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικές συνθήκες, ενώ η επιλογή των 5min, οδηγεί σε αναχαίτιση της νιτροποίησης με ανεπιθύμητα αποτελέσματα για την ποιότητα εκροής.

4.2.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΟΥ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Στο υποκεφάλαιο αυτό διερευνάται πώς μπορεί το επιτρεπόμενο σφάλμα στον έλεγχο επάρκειας διαλυμένου οξυγόνου, να επηρεάσει την προσέγγιση του διαλυμένου οξυγόνου στη συγκέντρωση ελέγχου του. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου δεν μπορεί ποτέ να είναι ακριβώς όση η συγκέντρωση ελέγχου και σκοπός είναι να την προσεγγίσει όσο καλύτερα γίνεται. Κατά τον έλεγχο του διαλυμένου οξυγόνου, βάσει του οποίου ρυθμίζεται το KLA στο σύστημα, μελετάται ο καθορισμός ενός επιτρεπόμενου σφάλματος, ώστε να μην παρουσιάζονται απότομες μεταβολές κατά τη ρύθμιση του KLA. Συγκεκριμένα, με τη μέθοδο του βηματικού ελέγχου (step control), που η μεταβολή του KLA γίνεται κατά μία πεπερασμένη τιμή (KLAmin), αν δεν οριστεί επιτρεπόμενο σφάλμα, τότε ακόμα και για μια απειροστή διαφορά του διαλυμένου οξυγόνου από την καθορισμένη συγκέντρωση ελέγχου |SO - SO set-point|, το KLA θα αυξηθεί ή θα μειωθεί κατά μια συγκεκριμένη τιμή που θα προκαλέσει την αντίστροφη αλλά και μεγαλύτερη διαφορά |SO - SO set-point|. Αυτό εκτιμάται οτι θα έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις του διαλυμένου οξυγόνου από τη συγκέντρωση ελέγχου. Το καθορισμένο επιτρεπόμενο σφάλμα δεν επιτρέπει τη μεταβολή του KLA, αν η διαφορά |SO - SO set-point| είναι μικρότερη από μία προκαθορισμένη τιμή. Στην περίπτωση της αναλογικής ρύθμισης (proportional control), εφόσον το KLA δεν μεταβάλλεται κατά μία συγκεκριμένη πεπερασμένη τιμή, δεν είναι το ίδιο αναγκαίος ο καθορισμός επιτρεπόμενου σφάλματος. Ωστόσο, θα μπορούσε να εφαρμοστεί, για να μην υποβάλλεται το σύστημα σε διαρκείς μεταβολές του KLA, όταν η διαφορά |SO - SO set-point| είναι μικρή.

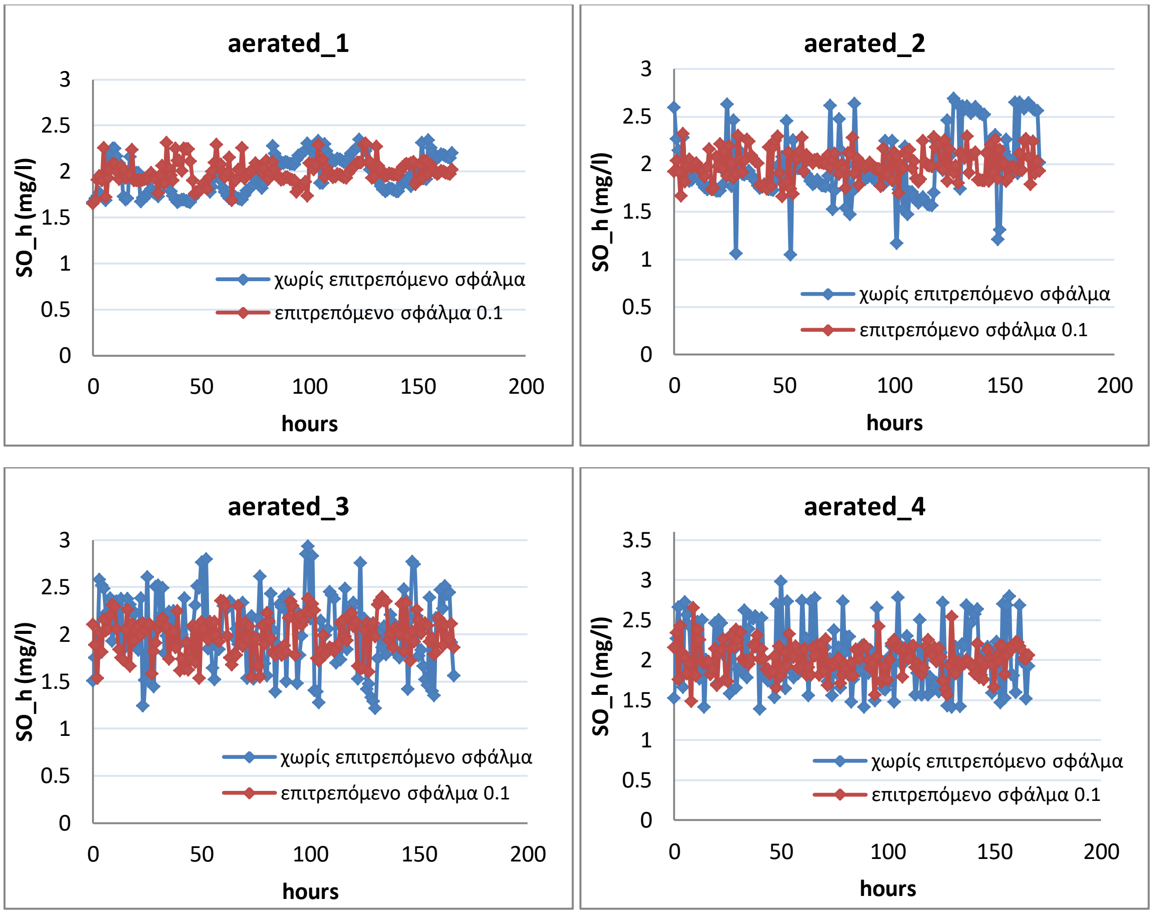
Αρχικά εφαρμόζονται 3 διαφορετικά σενάρια για τη μέθοδο βηματικού ελέγχου (step control). Τα επιτρεπόμενα σφάλματα που δοκιμάζονται σε καθένα από τα σενάρια αυτά είναι 0.05 mg/L, 0.1 mg/L και 0.2mg/L αντίστοιχα. Το χρονικό βήμα ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου κατά συνέπεια και της ρύθμισης του KLA είναι 1min. Στα ακόλουθα σχήματα φαίνονται τα ποσοστά για τα οποία ικανοποιείται η συγκέντρωση ελέγχου με το αντίστοιχο περιθώριο σφάλματος που εφαρμόζεται σε κάθε σενάριο, καθώς επίσης και το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα επίτευξης της τιμής ελέγχου (SO set-point) η οποία ορίζεται στα 2 mg/L.



Σχήμα 4.2.3.1 Ποσοστά ικανοποίησης συγκέντρωσης ελέγχου 2mg/L ± περιθώριο σφάλματος (αριστερά) και μέσο τετραγωνικό σφάλμα επίτευξης της συγκέντρωσης ελέγχου 2mg/L (δεξιά), με τη μέθοδο step control και ρύθμιση του KLA ανά 1 min.

Είναι προφανές ότι όσο μεγαλώνει το περιθώριο σφάλματος τόσο περισσότερες τιμές είναι εντός των καθορισμένων ορίων, αφού τα όρια είναι διευρυμένα. Ωστόσο, είναι χρήσιμο να ελεγχθεί σε τι ποσοστό βελτιώνεται η επίτευξη των ορίων, όσο αυξάνεται το επιτρεπόμενο σφάλμα. Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 4.2.3.1, όταν για τον έλεγχο του διαλυμένου οξυγόνου ορίζεται επιτρεπόμενο σφάλμα 0.05 mg/L, δηλαδή οταν το KLA μειώνεται κατά KLAmin για (SO>2+0.05) και αυξάνεται κατά KLAmin για (SO<2-0.05), τότε μόνο το 13% από τις μετρήσεις της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, οι οποίες λαμβάνονται κάθε 1 ώρα, είναι μέσα στα όρια 2±0.05 mg/L. Όταν ορίζεται επιτρεπόμενο σφάλμα 0.1, το 49% των μετρήσεων είναι μέσα στα όρια 2±0.1 mg/L, ενώ όταν ορίζεται επιτρεπόμενο σφάλμα 0.2, το 66% των μετρήσεων είναι μέσα στα όρια 2±0.2 mg/L. Παράλληλα, για να μελετηθούν οι περιπτώσεις με κοινούς όρους, με εφαρμογή πάλι της μεθόδου step control, υπολογίζεται το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα για κάθε σενάριο. Ως Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (ΜΤΣ) ορίζεται η μέση τιμή των τετραγώνων των αποκλίσεων της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (SO) από τη συγκέντρωση ελέγχου (SO set-point) που είναι ίση με 2 mg/L. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.2.3.1, το μεγαλύτερο ΜΤΣ παρουσιάζεται για εφαρμογή του μικρότερου επιτρεπόμενου σφάλματος (0.05 mg/L), το επόμενο μεγαλύτερο ΜΤΣ αντιστοιχεί στην περίπτωση του μεγαλύτερου επιτρεπόμενου σφάλματος (0.2 mg/L), ενώ το μικρότερο ΜΤΣ προκύπτει για την περίπτωση που το περιθώριο σφάλματος είναι ίσο με 0.1 mg/L. Επομένως, η καλύτερη επιλογή επιτρεπόμενου σφάλματος από τις παραπάνω είναι το 0.1 mg/L.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται το βέλτιστο από τα παραπάνω σενάρια καθώς επίσης και το σενάριο μηδενικού επιτρεπόμενου σφάλματος για την περίπτωση step control και για ρύθμιση του KLA ανά 1min, προκειμένου να παρατηρηθεί σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα η διαφορά των δύο σεναρίων ως προς την προσέγγιση της συγκέντρωσης ελέγχου.



Σχήμα 4.2.3. 2 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου για τα σενάρια με επιτρεπόμενο σφάλμα 0 και 0.1mg/L στον έλεγχο διαλυμένου οξυγόνου με τη μέθοδο step control και ρύθμιση του KLA ανά 1 min

Πίνακας 4.2.3.1: Συντελεστής μεταβλητότητας της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου για κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα με τη μέθοδο step control και ρύθμιση του KLA ανά 1 min.

CV (συντελεστής μεταβλητότητας)	$1^{η}$ αεριζόμενη	$2^{η}$ αεριζόμενη	$3^{η}$ αεριζόμενη	$4^{η}$ αεριζόμενη
Χωρίς επιτρεπόμενο σφάλμα	0.09	0.16	0.21	0.20
Με επιτρεπόμενο σφάλμα 0.1mg/L	0.04	0.08	0.10	0.09

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 4.2.3.2, η ύπαρξη καθορισμένου επιτρεπόμενου σφάλματος οδηγεί σε καλύτερη προσέγγιση του διαλυμένου οξυγόνου στη συγκέντρωση ελέγχου (set-point) , δηλαδή σε μικρότερες τιμές |SO – SO set-point|. Ένας ακόμη δείκτης του βαθμού απόκλισης είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας ο οποίος παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2.3.1. Ο συντελεστής μεταβλητότητας CV ορίζεται ως $\frac{\text{τυπική απόκλιση}}{\text{μέση τιμή}}$, με δείγμα τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου που μετρώνται κάθε ώρα για 7 ημέρες στο βιολογικό αντιδραστήρα. Σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα ο CV είναι υψηλότερος στην περίπτωση που δεν υπάρχει επιτρεπόμενο σφάλμα στον έλεγχο, το οποίο σημαίνει πιο έντονες αποκλίσεις των τιμών από τη μέση τιμή.

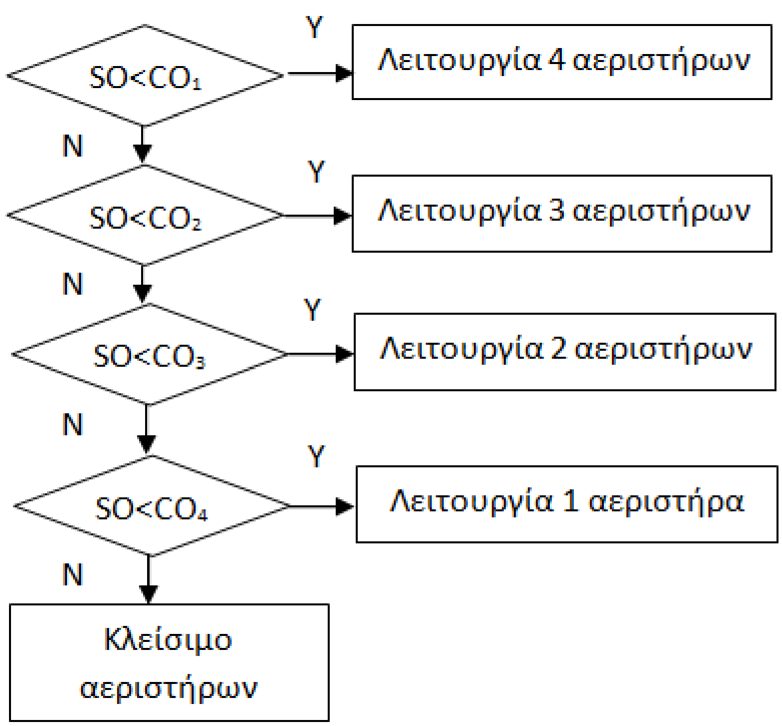
Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα οτι αφενός είναι αναγκαία η ύπαρξη του επιτρεπόμενου σφάλματος προκειμένου να ικανοποιείται καλύτερα η συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου, και αφετέρου έχει ιδιαίτερη σημασία το μέγεθος που θα επιλεχθεί για το περιθώριο σφάλματος.

4.2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ON/OFF CONTROL)

Η μέθοδος διακοπτόμενης λειτουργίας (on/off), όπως αναλύθηκε εκτενέστερα στο υποκεφάλαιο 4.2.2, παρουσιάζει αδυναμία στην προσέγγιση της συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου που επιβάλλεται στο σύστημα (SO set-point=2 mg/L) για ρύθμιση του KLA ανά χρονικό βήμα 1min. Για το λόγο αυτό στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή μιας εναλλακτικής μεθόδου on/off control, που βασίζεται στη διακοπτόμενη λειτουργία αλλά χρησιμοποιεί πολλαπλές τιμές ελέγχου για το διαλυμένο οξυγόνο. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται multi set-point on/off control (F.J. Fernández et al., 2011).

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει τη χρήση 2 αεριστήρων, καθένας από τους οποίους μπορεί να λειτουργεί με δύο ταχύτητες: χαμηλή ταχύτητα ίση με 3.78 h^{-1} και υψηλή ταχύτητα ίση με 7.56 h^{-1}. Εναλλακτικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν 4 αεριστήρες που να λειτουργούν σε 1 μόνο ταχύτητα ίση με KLAmin=3.78 h^{-1} ($=1.05\cdot10^{-3}sec^{-1}$) έκαστος. Η διαφοροποίηση της μεθόδου αυτής από την απλή μέθοδο διακοπτόμενης λειτουργίας έγκειται στο οτι δεν υπάρχει μόνο μία ταχύτητα λειτουργίας για τον αεριστήρα, και συνεπώς η παροχέτευση αέρα στο σύστημα μπορεί να πραγματοποιείται σε διαφορετικά επίπεδα, ανάλογα με τη διαφορά της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου από τη συγκέντρωση ελέγχου. Ο έλεγχος στη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση 4 διαφορετικών συγκεντρώσεων ελέγχου: CO_1, CO_2, CO_3, CO_4 για τις οποίες ισχύει $CO_1 < CO_2 < CO_3 < CO_4$.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του σεναρίου στο οποίο το σύστημα λειτουργεί με 4 αεριστήρες 1 ταχύτητας. Η ρύθμιση του KLA στο σύστημα γίνεται κάθε 1min. Σε κάθε βήμα ελέγχεται σε ποιο διάστημα τιμών ανήκει η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (SO). Αν ($SO<CO_1$), τότε τίθενται σε λειτουργία και οι 4 αεριστήρες, αν το SO ανήκει στο διάστημα $CO_1<SO<CO_2$, τίθενται σε λειτουργία οι 3 αεριστήρες, αν $CO_2<SO<CO_3$, λειτουργούν οι 2 αεριστήρες, ενώ αν $CO_3<SO<CO_4$ λειτουργεί μόνο 1 αεριστήρας. Όταν η συγκέντρωση του SO είναι πάνω από τη μέγιστη συγκέντρωση ελέγχου CO_4, τότε διακόπτεται η λειτουργία όλων των αεριστήρων. Μια απεικόνιση των παραπάνω γίνεται στο Σχήμα 4.2.4.1 στο οποίο φαίνεται μέσω ενός ροϊκού διαγράμματος η λειτουργία του συστήματος:



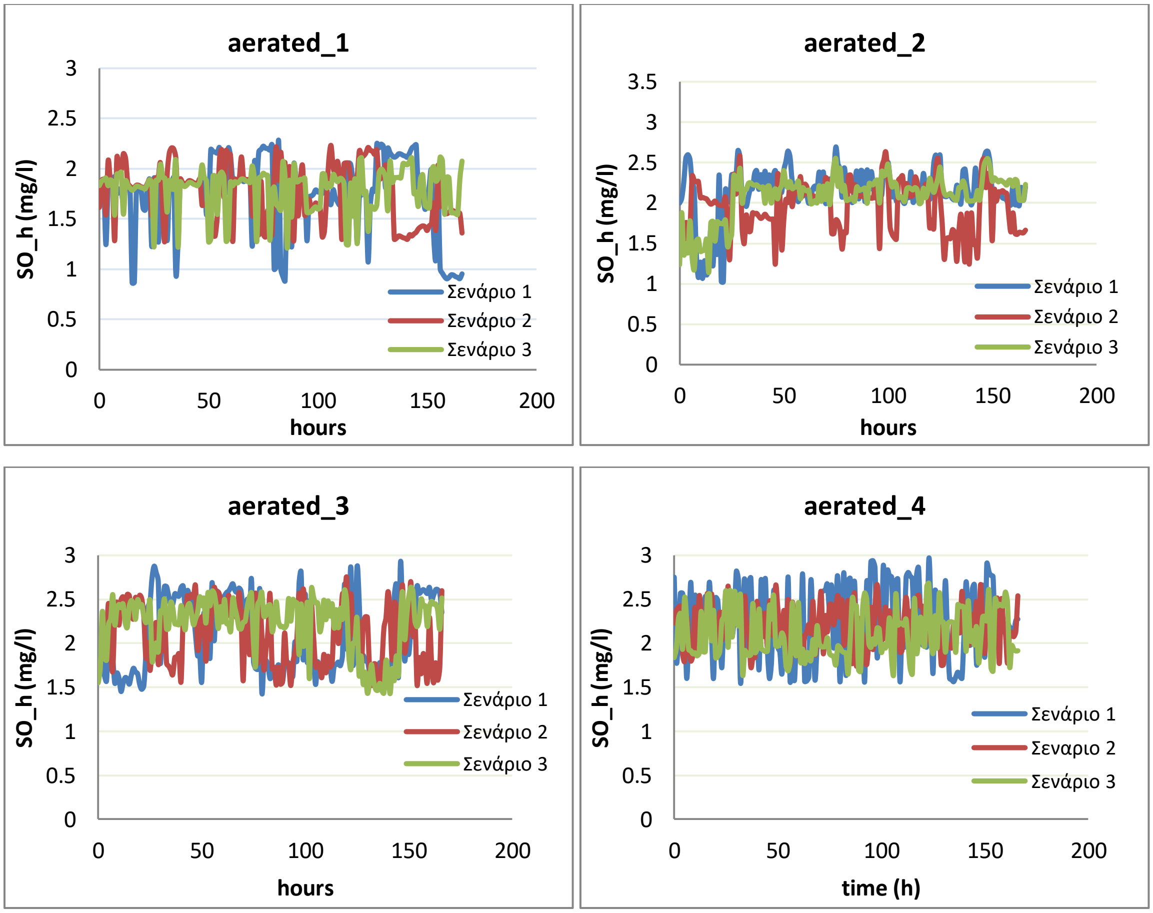
Σχήμα 4.2.4.1 Ροϊκό διάγραμμα λειτουργίας συστήματος αερισμού με τη μέθοδο πολλαπλών συγκεντρώσεων ελέγχου (multi set-point on/off control) για ρύθμιση του KLA ανά 1min.

Η διαφορά της μεθόδου πολλαπλών συγκεντρώσεων ελέγχου (multi set-point on/off control) από τη μέθοδο του βηματικού ελέγχου (step control) είναι οτι στην πρώτη ο έλεγχος εφαρμόζεται σε ανοιχτό βρόχο, ενώ στη δεύτερη σε κλειστό. Αυτό σημαίνει οτι στη μέθοδο multi set-point on/off control η τιμή που λαμβάνει το KLA σε κάθε χρονικό βήμα εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαφορά της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου από τη συγκέντρωση ελέγχου και είναι δυνατό από απενεργοποιημένη λειτουργία αεριστήρων στο αμέσως επόμενο χρονικό βήμα να τεθούν σε λειτουργία και οι 4 αεριστήρες, αν αυτό απαιτηθεί. Αντίθετα, στη μέθοδο step control η ρύθμιση του KLA εξαρτάται από την τιμή που είχε το KLA στο προηγούμενο χρονικό βήμα, δηλαδή κάθε φορά ανοίγει η κλείνει μόνο ένας αεριστήρας.

Η μέθοδος multi set-point on/off control εφαρμόστηκε για 3 διαφορετικά σενάρια, σε καθένα από τα οποία ορίζονται διαφορετικές τιμές για τις συγκεντρώσεις ελέγχου (set-points) του διαλυμένου οξυγόνου (CO_1, CO_2, CO_3, CO_4). Ακολουθεί ο πίνακας παρουσίασης των σεναρίων (Πίνακας 4.2.4.1.) και τα διαγράμματα συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα (Σχήμα 4.2.4.2.).

Πίνακας 4.2.4.1: Συγκεντρώσεις ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου για καθένα από τα 3 σενάρια που εφαρμόζονται με τη μέθοδο multi set-point on/off control για ρύθμιση του KLA κάθε 1 min

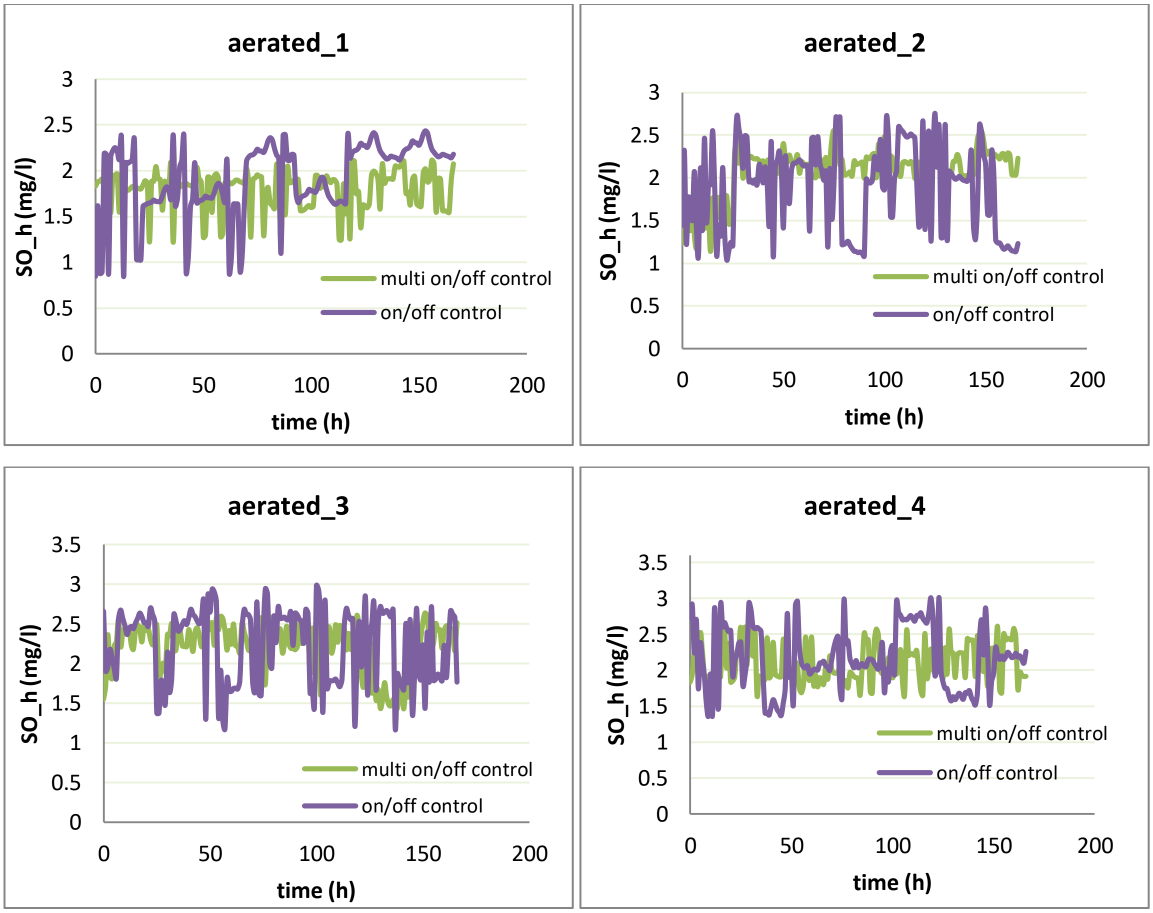
	CO_1	CO_2	CO_3	CO_4
Σενάριο 1	1.8	1.9	2.0	2.1
Σενάριο 2	1.7	1.9	2.1	2.3
Σενάριο 3	1.6	1.9	2.0	2.2



Σχήμα 4.2.4.2 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου για καθένα από τα σενάρια εφαρμογής της μεθόδου multi set-point on/off control, σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα, για ρύθμιση του KLA ανά 1min.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.2.4.2, στο 3^{o} σενάριο το διαλυμένο οξυγόνο προσεγγίζει καλύτερα την τιμή της συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου (SO=2mg/L). Συγκεκριμένα, στο 1^{o} σενάριο το 16% των τιμών είναι εντός των ορίων που έχουν τεθεί για τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα. Στο 2^{o} σενάριο το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 20%, ενώ στο 3^{o} σενάριο στο 23.5%. Επιπρόσθετα, στο 3^{o} σενάριο παρατηρείται η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, και οι χαμηλότερες εκπομπές N_2O, αν και οι διαφορές είναι αμελητέες. Επομένως επικρατέστερο σενάριο εκ των τριών είναι το 3^{o} . Σε κάθε περίπτωση τα ποσοστά είναι χαμηλά και προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση με διαφορετικά σενάρια.

Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί οτι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μέθοδο multi set-point on/off control έχουν αισθητή διαφορά από αυτά που προκύπτουν με την απλή μέθοδο on/off control. Στο Σχήμα 4.2.4.3 που ακολουθεί, συγκρίνεται η απόδοση των δύο αυτών μεθόδων. Για τη μέθοδο multi set-point on/off control εφαρμόζεται το 3^{o} σενάριο που ήταν και το βέλτιστο.



Σχήμα 4.2.4.3 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου για εφαρμογή της μεθόδου multi set-point on/off control και on/off control, σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα, για ρύθμιση του KLA ανά 1min.

Είναι εμφανές από το Σχήμα 4.2.4.3 ότι στην περίπτωση του multi set-point on/off control η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου συγκλίνει καλύτερα γύρω από την επιθυμητή συγκέντρωση ελέγχου σε σχέση με την απλή διακοπτόμενη λειτουργία on/off και παρουσιάζει λιγότερες ακραίες τιμές. Συμπερασματικά, προτείνεται η μέθοδος multi set-point on/off control σε σχέση με την on/off control και συνίσταται η περαιτέρω διερεύνηση με στόχο τη βελτιστοποίησή της.

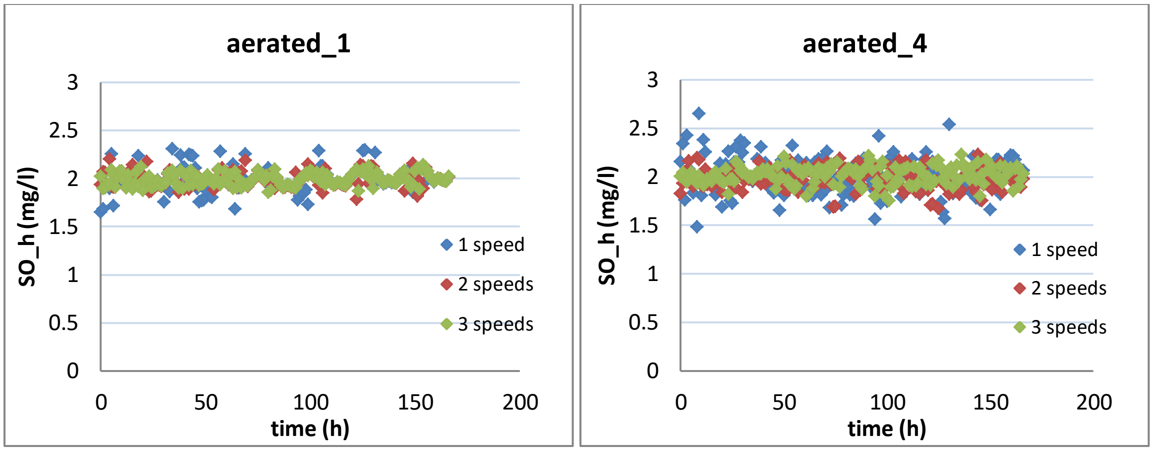
4.2.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ (STEP CONTROL)

Στο υποκεφάλαιο αυτό μελετάται η βελτιστοποίηση της μεθόδου βηματικού ελέγχου (step control), η οποία μπορεί να επιτευχθεί με ρύθμιση της ελάχιστης δυναμικότητας του συστήματος αερισμού. Στην περίπτωση του step controller η ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου KLA αυξάνεται ή μειώνεται σε κάθε χρονικό βήμα, αν υπάρχει έλλειψη ή περίσσεια οξυγόνου, αντίστοιχα, κατά μια σταθερή τιμή KLAmin που εκφράζει την ελάχιστη δυναμικότητα του συστήματος.

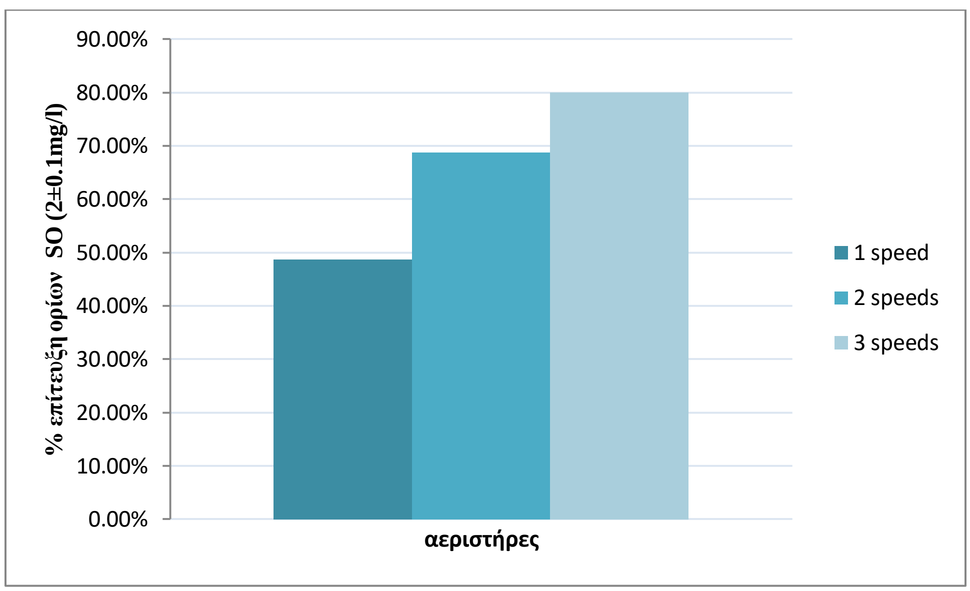
Στην παρούσα εργασία, οι προσομοιώσεις έχουν γίνει με 4 αεριστήρες. Αν θεωρηθεί οτι ο καθένας τους λειτουργεί σε 1 μόνο ταχύτητα, τότε η ελάχιστη δυναμικότητα του συστήματος θα είναι η δυναμικότητα του ενός αεριστήρα και θα είναι ίση με KLAmin = $\frac{\mathrm{KLAmax}}{4}$ =$1.05 \cdot 10^{-3}$ sec^{-1}. Ωστόσο, ένα εναλλακτικό σενάριο ως προς τη λειτουργία των αεριστήρων θα ήταν να υπάρχουν 4 αεριστήρες 2 ταχυτήτων (μικρή και μεγάλη), προκειμένου η ελάχιστη δυναμικότητα να είναι KLAmin = ($\frac{\mathrm{KLAmax}}{4}$)/2 =$5.25 \cdot 10^{-4}$ sec^{-1} , δηλαδή η δυναμικότητα που έχει ένας αεριστήρας όταν λειτουργεί σε μικρή ταχύτητα. Αντίστοιχα θα μπορούσαν να υπάρχουν και αεριστήρες 3 ταχυτήτων (μικρή, μεσσαία, μεγάλη) με KLAmin = ($\frac{\mathrm{KLAmax}}{4}$)/3 =$3.5 \cdot 10^{-4}$ sec^{-1} ,αλλά αυτό το σενάριο προς το παρόν δεν είναι εφαρμόσιμο και μπορεί να εξεταστεί μόνο σε θεωρητικό επίπεδο.

Οι εναλλακτικοί αυτοί τρόποι λειτουργίας του συστήματος αερισμού, καθορίζουν την ακρίβεια με την οποία ρυθμίζεται το KLA σε κάθε έλεγχο της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου. Εφόσον με τη μέθοδο βηματικού ελέγχου το KLA ρυθμίζεται βάσει του KLAmin, όσο μικρότερο είναι το KLAmin, τόσο ακριβέστερη αναμένεται η προσέγγιση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στη συγκέντρωση ελέγχου (SO set-point=2mg/L).

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των 3 σεναρίων που προαναφέρθηκαν: (α) αεριστήρες 1 ταχύτητας, (β) αεριστήρες 2 ταχυτήτων και (γ) αεριστήρες 3 ταχυτήτων (θεωρητικό σενάριο) για ρύθμιση του KLA κάθε 1min. Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που δείχνουν τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο 1^{o} και στο 4^{o} αεριζόμενο διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα, καθώς επίσης και τα ποσοστά επίτευξης των ορίων συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου για κάθε σενάριο από τα παραπάνω.



Σχήμα 4.2.5.1 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου με τη μεθοδο step control για αεριστήρες 1, 2 και 3 ταχυτήτων στο 1° και στο 4° διαμέρισμα, για ρύθμιση του KLA ανά 1min



Σχήμα 4.2.5.2 Ποσοστό επίτευξης ορίων συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου με τη μεθοδο step control για αεριστήρα 1, 2 και 3 ταχυτήτων για ρύθμιση του KLA ανά 1min

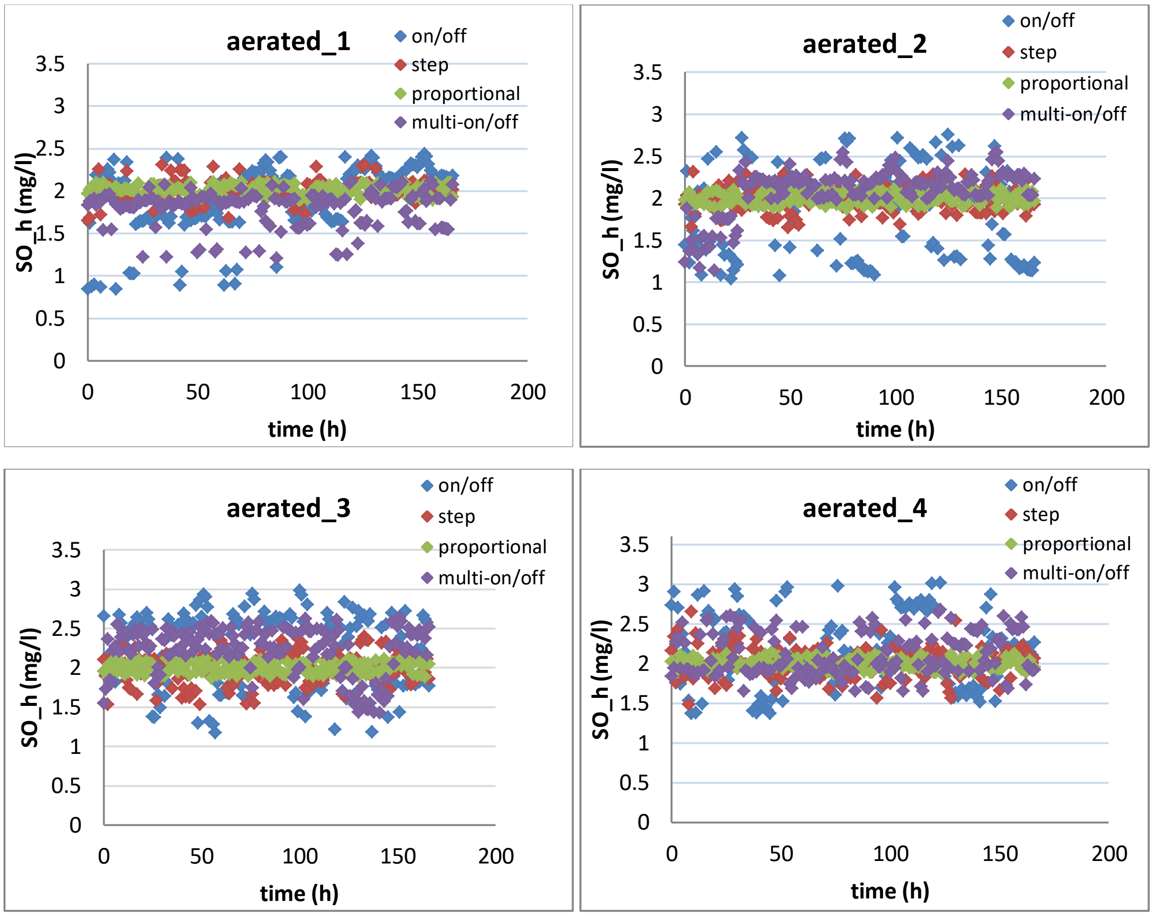
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.2.5.1, οι αεριστήρες 3 ταχυτήτων εξασφαλίζουν πολύ καλύτερη προσέγγιση στη συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου (SO set-point=2mg/L), ενώ για τους αεριστήρες 1 ταχύτητας είναι πιο έντονες οι αποκλίσεις. Τα ποσοστά επίτευξης της επιθυμητής συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (2±0.1mg/L) στο σύνολο των αεριζόμενων διαμερισμάτων είναι 49%, 69% και 80% στις περιπτώσεις που οι αεριστήρες λειτουργούν με 1, 2 και 3 ταχύτητες, αντίστοιχα. Το συνολικό KLA ($week^{-1}$) καθώς και η ενέργεια που καταναλώνεται για αερισμό στο σύστημα δεν διαφέρουν πολύ από περίπτωση σε περίπτωση.

Αν και το σενάριο με αεριστήρες 3 ταχυτήτων οδήγησε σε πολύ καλύτερη απόδοση του συστήματος αερισμού, επειδή η μελέτη έγινε σε θεωρητικό μόνο επίπεδο και δεν υπάρχει σε εφαρμογή τέτοιος τύπος αεριστήρα, σε όσες προσομοιώσεις θα ακολουθήσουν με τη μέθοδο βηματικού ελέγχου, θα θεωρηθεί η χρήση αεριστήρων 1 ταχύτητας με KLAmin=$1.05\cdot 10^{-3}$.

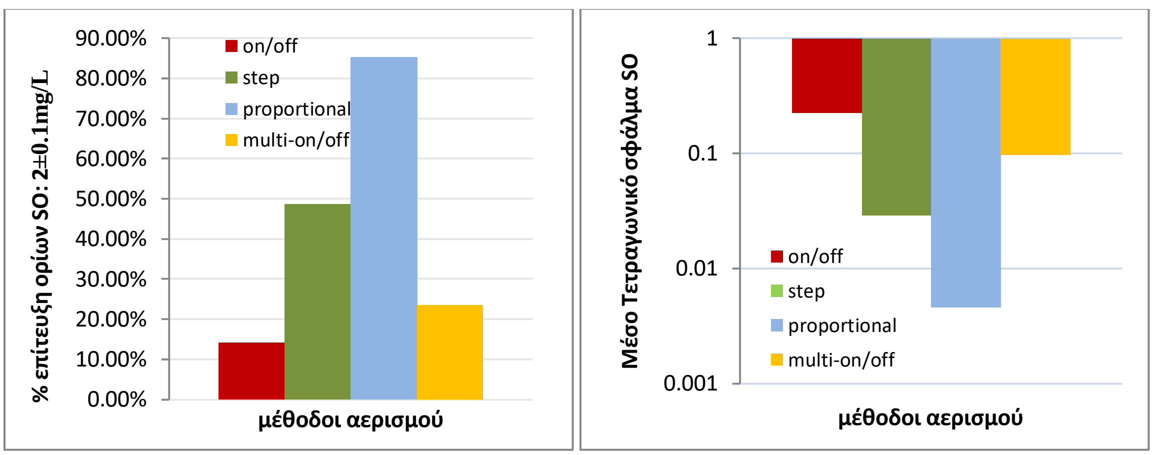
4.2.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Αφού προηγήθηκε ανάλυση για τη βελτιστοποίηση της κάθε μεθόδου ελέγχου του αερισμού ξεχωριστά, είναι σκόπιμο στο κεφάλαιο αυτό να γίνει σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων. Ειδικότερα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις στο παρόν υποκεφάλαιο είναι: η μέθοδος διακοπτόμενης λειτουργίας (on/off control), η μέθοδος διακοπτόμενης λειτουργίας με χρήση πολλαπλών συγκεντρώσεων ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου (multi set-point on/off control), η οποία βασίζεται στη λειτουργία του on/off control, η μέθοδος βηματικού ελέγχου (step control) και η μέθοδος αναλογικού ελέγχου (proportional control). Για τη μέθοδο step control, αν και το σενάριο του αεριστήρα 3 ταχυτήτων είχε καλύτερα αποτελέσματα (Σχήμα 4.2.5.2), για απλουστευτικούς λόγους μελετάται το σενάριο με αεριστήρα 1 ταχύτητας και KLAmin=0.00105 sec^{-1}. Για την περίπτωση του multi set-point on/off controller (υποκεφάλαιο 4.2.4) εξετάζεται το 3^{o} σενάριο με συγκεντρώσεις ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου: CO_1=1.6, CO_2=1.9, CO_3=2.0, CO_4=2.2. Όλες οι περιπτώσεις ελέγχονται για καθορισμένο επιτρεπόμενο σφάλμα στον έλεγχο συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου ίσο με |SO - SO set-point|=0.1 mg/L. Το χρονικό βήμα ρύθμισης του KLA είναι 1min.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται (α) η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα, με όλες τις μεθόδους ελέγχου, για ρύθμιση του KLA ανά χρονικό βήμα 1min και (β) τα ποσοστά επίτευξης των επιτρεπόμεων ορίων για τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου



Σχήμα 4.2.6.1 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα , για τις μεθόδους on/off, step, proportional και multi set-point on/off control, για ρύθμιση του KLA ανά 1min



Σχήμα 4.2.6.2 Ποσοστό επίτευξης ορίων συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (αριστερα) και Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (δεξιά) για τις μεθόδους on/off, step, proportional και multi-on/off control, για ρύθμιση του KLA ανά 1min

Στο Σχήμα 4.2.6.1, όπου φαίνεται η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα ανά μία ώρα, παρατηρείται ότι με τις μεθόδους on/off control και multi set-point on/off control είναι μεγάλη η απόκλιση των τιμών από τη συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα. Το ίδιο μπορει να συμπεράνει κανείς κοιτώντας και το Σχήμα 4.2.6.2, καθώς το ποσοστό επίτευξης των ορίων (SO=2±0.1mg/L) είναι 14% και 23% για τη μέθοδο on/off και για τη μέθοδο multi set-point on/off, αντίστοιχα. Η μέθοδος step control είναι αρκετά καλύτερη αφού, όπως δείχνουν και τα διαγράμματα στο Σχήμα 4.2.6.1, οι τιμές του SO δεν πέφτουν χαμηλότερα από 1.5 mg/L και δεν ξεπερνούν τα 2.5 mg/L. Το ποσοστό επίτευξης των ορίων διαλυμένου οξυγόνου για το σύνολο των αεριζόμενων διαμερισμάτων με τη μέθοδο αυτή είναι 48.7%, ενώ αν μελετηθεί χωριστά η $1^η$ δεξαμενή αερισμού, που είναι και πιο κρίσιμη ως προς τη ζήτηση οξυγόνου, το ποσοστό αυτό είναι ακόμα πιο ικανοποιητικό και φτάνει το 70%. Τέλος, με τη μέθοδο proportional control η προσέγγιση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στη συγκέντρωση ελέγχου φαίνεται από το διάγραμμα πολύ ικανοποιητική, και αυτό επιβεβαιώνεται και από το ποσοστό επιτυχίας ως προς την ικανοποίηση των ορίων (SO=2±0.1mg/L), το οποίο είναι της τάξεως του 85%. Συνεπώς η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, όπως δείχνουν τα υψηλά ποσοστά με τα οποία επιτυγχάνεται η συγκέντρωση ελέγχου για το διαλυμένο οξυγόνο, αλλά απαιτεί πιο εξελιγμένο εξοπλισμό σε σχέση με τις υπόλοιπες λόγω της τεχνολογίας ρυθμιστή στροφών ή συχνότητας (inverter) με την οποία λειτουργεί.

Η καταναλισκόμενη ενέργεια για τον αερισμό δεν διαφέρει πολύ από τη μία μέθοδο στην άλλη. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις step και proportional control η ενεργειακή κατανάλωση είναι περίπου 113.000 kWh, ενώ στις περιπτώσεις on/off και multi set-point on/off control η ενεργειακή κατανάλωση είναι μειωμένη κατά 1.5% και 1.9% αντίστοιχα, σε σχέση με αυτή την τιμή. Ο δείκτης ποιότητας εκροής EQI ειναι ίσος με 111.000 στην περίπτωση του step και του proportional control, ενώ στις περιπτώσεις on/off και multi set-point on/off control είναι μειωμένος κατά 1% . Οι εκπομπές N_2O για εφαρμογή της μεθόδου step control είναι κατά 2% λιγότερες σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, στις οποίες είναι περίπου ίδιες μεταξύ τους και ίσες με 590 kgN_2O/week για το άθροισμα των 4 αεριζόμενων διαμερισμάτων.

Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι 4 μέθοδοι μεταξύ τους ως προς την ποιότητα εκροής και την κατανάλωση ενέργειας είναι αμελητέες. Παράλληλα η διαφορά που παρουσιάζουν ως προς τη διατήρηση των επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου στα όρια της συγκέντρωσης ελέγχου είναι σημαντική. Ιδιαίτερα οι μέθοδοι on/off και multi set-point on/off control φάνηκε να έχουν μεγάλη αδυναμία ως προς την ικανοποίηση των επιτρεπόμενων ορίων για το διαλυμένο οξυγόνο.

Συνεπώς, μπορεί να είναι σε κάθε περίπτωση ικανοποιητική η ποιότητα εκροής, αλλά με τη μέθοδο proportional control, στην οποία σημειώνεται ποσοστό επιτυχίας 85%, δημιουργείται μεγαλύτερη αξιοπιστία, με υψηλότερους συντελεστές ασφαλείας και για τα σενάρια αιχμών, τα οποία θα εξεταστούν στα επόμενα κεφάλαια.

4.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΙΑΛΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΣΤΑ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ

4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκέντρωση ελέγχου για το διαλυμένο οξυγόνο καθορίζει τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου που πρέπει να υπάρχει στο σύστημα κάθε χρονική στιγμή ώστε να πραγματοποιούνται οι απαιτούμενες διεργασίες σε ικανοποιητικό βαθμό και να τηρούνται τα όρια στην έξοδο της εγκατάστασης. Δεν έχει συγκεκριμένη τιμή σε όλες τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και για όλα τα συστήματα αερισμού. Η τιμή της συγκέντρωσης ελέγχου (set point) προσαρμόζεται για κάθε σύστημα αερισμού σύμφωνα με τις παραμέτρους του εκάστοτε συστήματος αλλά και με τα μεγέθη αιχμής. Η τιμή της συγκέντρωσης ελέγχου που χρησιμοποιείται συνήθως για συνθήκες επαρκούς χρόνου παραμονής στερεών σε μια εγκατάσταση είναι (SO set-point=2mg/L) για κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα. Παρόλα αυτά είναι χρήσιμο να διερευνηθεί πώς η αλλαγή αυτής της τιμής μπορεί να επηρεάσει το σύστημα του αερισμού. Στην ενότητα αυτή προσομοιώνεται η λειτουργία της εγκατάστασης για διαφορετικές προκαθορισμένες τιμές της συγκέντρωσης ελέγχου (SO set-point) και εξετάζεται αν με αυτά τα εναλλακτικά σενάρια υπάρχει περιθώριο εξοικονόμησης ενέργειας για αερισμό και βελτίωσης της ποιότητας εκροής. Επιπροσθέτως, γίνεται η προσομοίωση των σεναρίων και για συνθήκες ανεπαρκούς χρόνου παραμονής στερεών (SRT=5d), στις οποίες τα όρια στην έξοδο είναι υψηλότερα.

Στο υποκεφάλαιο 4.3.2, για κάθε σενάριο που εφαρμόζεται, η συγκέντρωση ελέγχου για το διαλυμένο οξυγόνο είναι σταθερή σε όλα τα αεριζόμενα διαμερίσματα. Σκοπός αυτών των προσομοιώσεων είναι να εξεταστεί πόσο ευαίσθητο είναι το σύστημα στη μείωση ή την αύξηση της συγκέντρωσης ελέγχου,τόσο σε ευμενείς όσο και σε δυσμενείς συνθήκες.

Στο υποκεφάλαιο 4.3.3 για κάθε σενάριο, ορίζεται συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου μειούμενη από διαμέρισμα σε διαμέρισμα (στο 2^{o} διαμέρισμα είναι μικρότερη από αυτή στο 1^{ο} κ.ο.κ.). Επιλέγεται να εξεταστούν σενάρια με αυτό το χαρακτηριστικό, γιατί έχει παρατηρηθεί ότι η ζήτηση οξυγόνου στο σύστημα μειώνεται σε κάθε επόμενο αεριζόμενο διαμέρισμα. Αυτό συμβαίνει γιατί στα πρώτα διαμερίσματα που το οργανικό φορτίο είναι περισσότερο, καθώς δεν έχει απομακρυνθεί ακόμα αρκετό, χρειάζεται αντίστοιχα και περισσότερο οξυγόνο για να πραγματοποιηθούν οι διεργασίες απομάκρυνσης του φορτίου. Και σε αυτό το υποκεφάλαιο τα σενάρια ελέγχονται τόσο για ευμενείς όσο και για δυσμενείς συνθήκες.

Σημείωση:

Σε όλα τα σενάρια που προσομοιώνονται στο υποκεφάλαιο 4.3 η μέθοδος ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου που εφαρμόζεται είναι ο αναλογικός έλεγχος (proportional control). Ο έλεγχος διαλυμένου οξυγόνου, συνεπώς και η ρύθμιση του KLA στο σύστημα γίνεται με χρονικό βήμα 1min.

4.3.2 ΙΔΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΙΑΛΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΣΕ ΟΛΑ ΤΑ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ

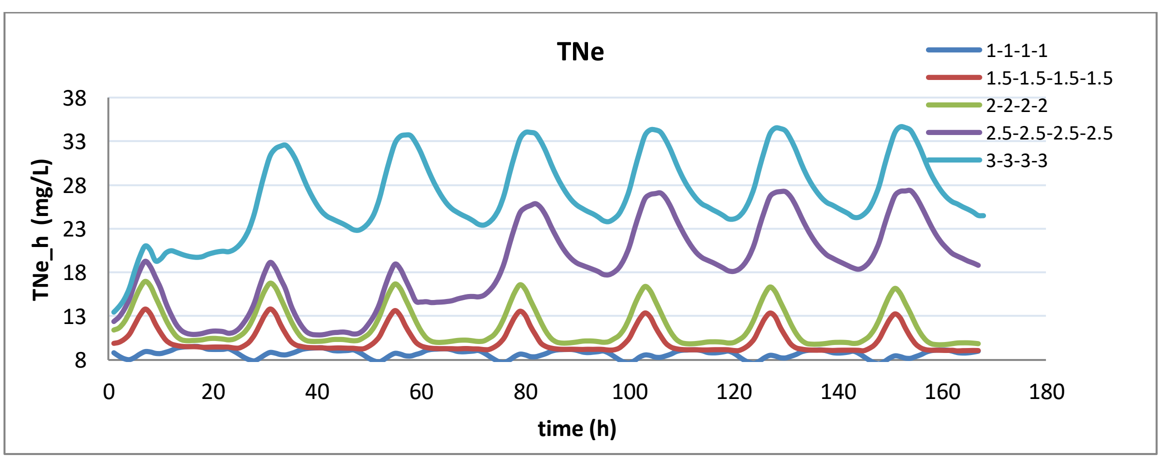
4.3.2.1 ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ SRT=10d

Η επιλογή της τιμής SO set-point=2mg/L για τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε όλα τα αεριζόμενα διαμερίσματα είναι αρκετά διαδεδομένη για συνθήκες επαρκούς χρόνου παραμονής στερεών σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Ωστόσο, θα ήταν ωφέλιμο να διαπιστωθεί πού εντοπίζονται οι αδυναμίες του συστήματος αερισμού στις περιπτώσεις που καθορίζεται μεγαλύτερη ή μικρότερη συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου. Ταυτόχρονα, θα διερευνηθεί αν υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του συστήματος αερισμού ως προς την ποιότητα εκροής ή την ενεργειακή κατανάλωση, σε ευμενείς αλλά και δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας. Τα σενάρια τα οποία εξετάζονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.2.1.1.

Πίνακας 4.3.2.1.1 Σενάρια με συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σταθερή σε όλα τα αεριζόμενα διαμερίσματα

Συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου (mg/L)	1^o αεριζόμενο διαμέρισμα	2^o αεριζόμενο διαμέρισμα	3^o αεριζόμενο διαμέρισμα	4^o αεριζόμενο διαμέρισμα
Σενάριο 1	1	1	1	1
Σενάριο 2	1.5	1.5	1.5	1.5
Σενάριο 3	2	2	2	2
Σενάριο 4	2.5	2.5	2.5	2.5
Σενάριο 5	3	3	3	3

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των παραπάνω προσομοιώσεων. Στο Σχήμα 4.3.2.1.1 φάινεται η συγκέντρωση του συνολικού αζώτου ατην έξοδο της εγκατάστασης, όπως προκύπτει από την εφαρμογή των 5 σεναρίων, για χρόνο παραμονής στερεών 10d. Στον Πίνακα 4.3.2.1.2 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου (KLA), του δείκτη μεταφοράς οξυγόνου σε πρότυπες συνθήκες (SOTR), του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI), της καταναλισκόμενης ενέργειας για αερισμό, καθώς επίσης και των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου (N_2O). Ακόμη, στον ίδιο Πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά για τα οποία ικανοποιούνται τα όρια ολικού αζώτου (TNe) στην έξοδο της εγκατάστασης, και η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου (NH) στην έξοδο της εγκατάστασης, η οποία πρέπει να είναι κάτω από 1mg/L.



Σχήμα 4.3.2.1.1 Συγκέντρωση συνολικού αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης (TNe), με μετρήσεις που λαμβάνονται σε ωριαία βάση για τα 5 σενάρια προσομοίωσης για χρόνο παραμονής στερεών 10d.

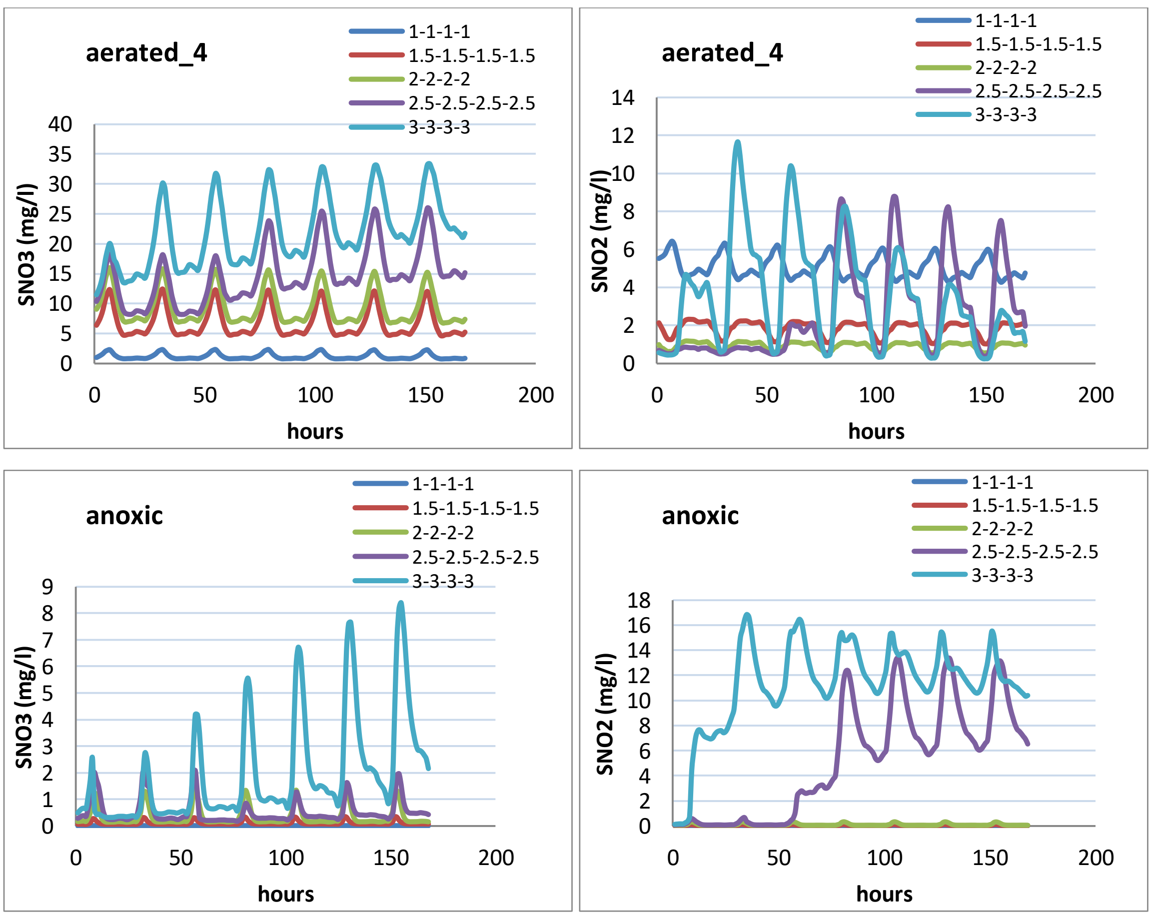
Πίνακας 4.3.2.1.2 Για κάθε σενάριο (α) ποσοστιαία μεταβολή των KLA, SOTR, EQI, καταναλισκόμενης ενέργειας αερισμού, N_2O σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, (β) ποσοστό ικανοποίησης ορίων TNe και (γ) συγκέντρωση εξόδου NH (mg/L)

% μεταβολή σε σχέση με το αρχικό σενάριο (σενάριο 3)	σενάριο 1	σενάριο 2	σενάριο 3	σενάριο 4	σενάριο 5
KLA	-17.3	-8.4	0.0	14.6	32.0
SOTR	-18.2	-8.9	0.0	15.7	34.0
EQI	-12.8	-6.6	0.0	26.9	60.0
ενέργεια αερισμού	-28.4	-15.0	0.0	24.4	56.1
N2O	154.0	24.4	0.0	968.3	1202.0
ποσοστό % ικανοποίησης επιτρεπόμενων ορίων εξόδου					
TNe	100	100	87.5	0	0
συγκέντρωση εξόδου					
NHe (mg/L)	0.12	0.03	0.03	0.02	0.02

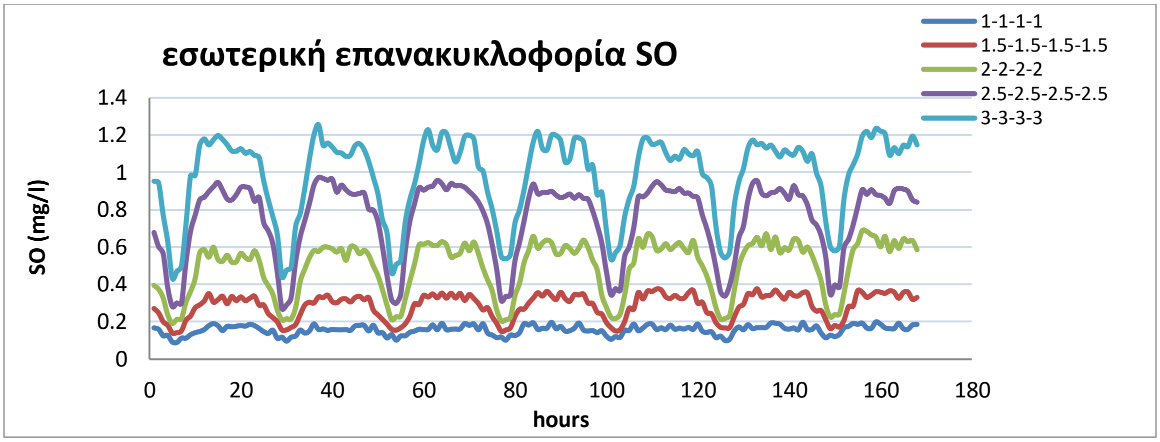
Για SRT=10d και SO set-point=2mg/L, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3.2.1.2, η τιμή του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο είναι 0.03 mg/L, δηλαδή πολύ χαμηλότερη από τα επιτρεπόμενα όρια (NHlim=1mg/L). Επομένως, υπάρχει περιθώριο για μείωση της συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου. Ακόμα και για μείωση της τιμής του SO set-point σε 1mg/L (Σενάριο 1), το αμμωνιακό άζωτο εξόδου είναι 0.12mg/L<NHlim. Το ίδιο ισχύει και για το συνολικό άζωτο εξόδου, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.3.2.1.1 . Η συγκέντρωσή του όχι απλά δεν αυξάνεται, με χαμηλότερο SO set-point, αλλα είναι ακόμα πιο χαμηλή. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό θα εξεταστεί στις επόμενες παραγράφους με διερεύνηση των επιμέρους στοιχείων από τα οποία καθορίζεται η τιμή του συνολικού αζώτου. Ο δείκτης EQI είναι επίσης μειωμένος στις περιπτώσεις με χαμηλά SO set-points. Τα παραπάνω δείχνουν πως για SRT=10d η ποιότητα εκροής βελτιώνεται όταν μειώνεται το SO set-point, ενώ ταυτόχρονα γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας για τον αερισμό αφού απαιτείται λιγότερο οξυγόνο σε αυτές τις συνθήκες. Ωστόσο, οι συνολικές εκπομπές N_2O στα σενάρια 1 και 2 αυξάνονται κατά 154% και 24% αντίστοιχα, σημειώνοντας μια περιβαλλοντική επιβάρυνση σε σύγκριση με το σενάριο 3.

Στα σενάρια 4 και 5, όπου εφαρμόζεται αύξηση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στα 2.5mg/L και 3mg/L, αντίστοιχα, ο δείκτης ποιότητας εκροής αυξάνεται ενώ τα όρια του συνολικού αζώτου στην έξοδο δεν ικανοποιούνται (TNe>TNlim=15mg/L). Ταυτόχρονα, παρατηρούνται αξιοσημείωτα μεγάλες εκπομπές υποξειδίου του αζώτου για τα σενάρια αυτά. Επομένως, η αύξηση του SO set-point, όχι μόνο αυξάνει τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος, αλλά διαταράσσει εντελώς την ποιότητα εκροής.

Ακολουθεί η περαιτέρω διερεύνηση, των σεναρίων με έμφαση στις διεργασίες της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης για να διαπιστωθεί πού έγκειται το πρόβλημα που δημιουργεί η αύξηση των συγκεντρώσεων ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου στην περίπτωση λειτουργίας με υψηλούς χρόνους παραμονής στερεών. Παρατίθενται τα διαγράμματα νιτρικών και νιτρωδών στο 4^{o} αεριζόμενο και στο ανοξικό διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα (Σχήμα 4.3.2.1.2) καθώς επίσης και η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου που επανακυκλοφορεί στο σύστημα του βιοαντιδραστήρα (Σχήμα 4.3.2.1.3).



Σχήμα 4.3.2.1.2 Συγκέντρωση νιτρικών (NO_3) και νιτρωδών (NO_2) στο ανοξικό και στο 4^{o} αεριζόμενο διαμέρισμα για τα 5 σενάρια προσομοίωσης για χρόνο παραμονής στερεών 10d.



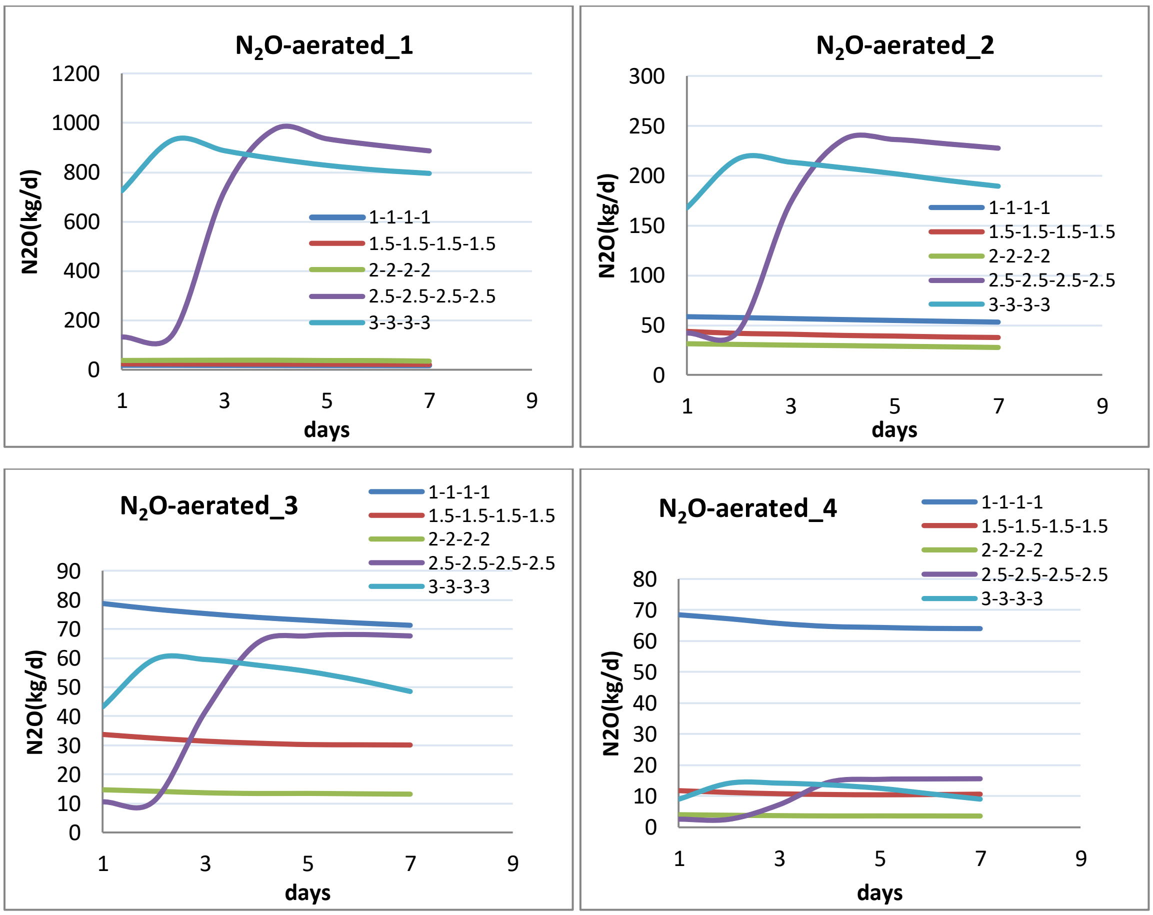
Σχήμα 4.3.2.1.3 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην εσωτερική επανακυκλοφορία (πριν την είσοδο στην ανοξική δεξαμενή), για χρόνο παραμονής στερεών 10d.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.3.2.1.2, η αύξηση του συνολικού αζώτου που παρατηρήθηκε στις περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου (Σενάρια 4 και 5), οφείλεται στην αύξηση των νιτρικών και των νιτρωδών στο σύστημα. Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα (Πίνακας 4.3.2.1.2), που σημαίνει ότι η νιτροποίηση πραγματοποιείται κανονικά στο σύστημα, το οποίο είναι λογικό, καθώς το οξυγόνο διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Στο 4^{ο} αερόβιο διαμέρισμα η συγκέντρωση των νιτρωδών έχει πέσει σε χαμηλότερα επίπεδα, καθώς κατά τη νιτροποίηση οξειδώνονται σε νιτρικά. Για τον ίδιο λόγο η συγκέντρωση των νιτρικών από το ανοξικό μέχρι το 4^{ο} αερόβιο διαμέρισμα φαίνεται να αυξάνεται. (Σχήμα 4.3.2.1.2). Παρόλα αυτά οι συγκεντρώσεις και των δύο αυτών στοιχείων για τα Σενάρια 4 και 5 είναι υψηλότερες με διαφορά από αυτές των υπόλοιπων σεναρίων.

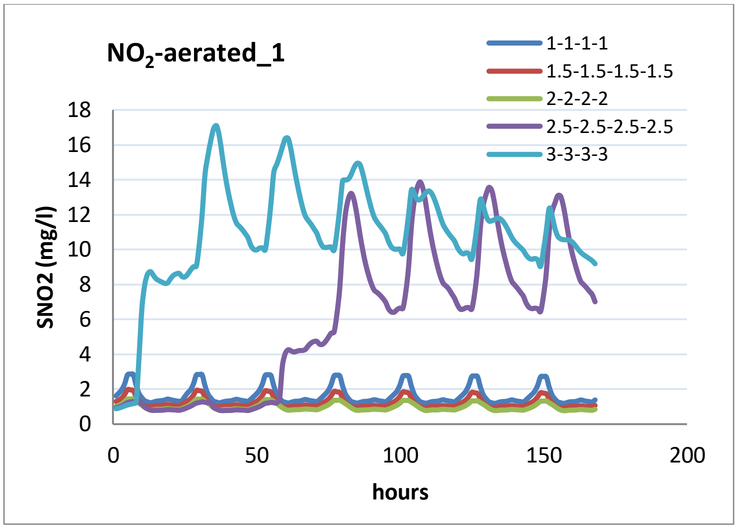
Η υψηλή συγκέντρωση NO_2 και NO_3, που παρατηρείται στο 4^{ο} αεριζόμενο και στο ανοξικό διαμέρισμα, οφείλεται στην αδυναμία απονιτροποίησης του συστήματος. Η αδυναμία αυτή προκύπτει λόγω της επανακυκλοφορίας διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα του βιοαντιδραστήρα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.3.2.1.3, που οδηγεί στη διατάραξη των ανοξικών συνθήκων που απαιτούνται για την απονιτροποίηση. Συγκεκριμένα αναχαιτίζεται το δεύτερο στάδιο της απονιτροποίησης (αναγωγή νιτρωδών σε μονοξείδιο του αζώτου), γι’ αυτό και παρατηρείται συσσώρευση νιτρωδών στο σύστημα.

Στα σενάρια μικρότερων συγκεντρώσεων ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου (Σενάρια 1 και 2), φάνηκε να μην παρουσιάζεται καποιο πρόβλημα ως προς την ποιότητα εκροής. Ωστόσο, στο Σχήμα 4.3.2.1.2 παρατηρείται οτι για την περίπτωση του 1^{ου} σεναρίου στο οποίο η συγκέντρωση ελέγχου είναι μόλις 1mg/L, αυξάνεται πολύ η συγκέντρωση νιτρωδών στο 4^{o} αεριζόμενο διαμέρισμα. Αυτό δυσχεραίνει την ποιότητα εκροής καθώς τα νιτρώδη είναι τοξικά.

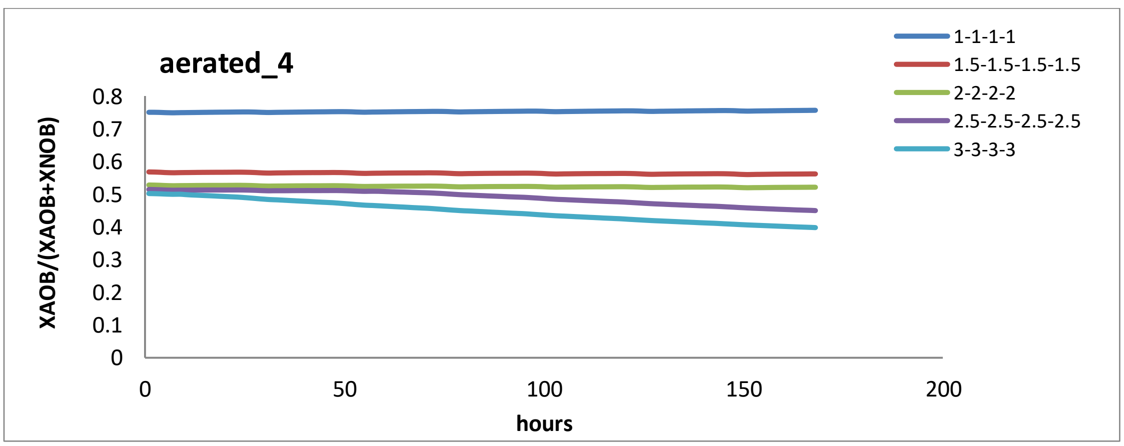
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εκπομπές N_2O σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα (Σχήμα 4.3.2.1.4), καθώς επίσης η συγκέντρωση των νιτρωδών στο 1^{o} αεριζόμενο διαμέρισμα (Σχήμα 4.3.2.1.5) και ο λόγος των X_{AOB} προς τα συνολικά αυτοτροφικά βακτήρια ($\frac{XAOB}{XAOB+XNOB}$) στο 4^{o} αεριζόμενο διαμέρισμα (Σχήμα 4.3.2.1.6).



Σχήμα 4.3.2.1.4 Εκπομπές N_2O (kg/d) στα 4 αεριζόμενα διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα για καθένα από τα 5 σενάρια, για χρόνο παραμονής στερεών 10d.



Σχήμα 4.3.2.1.5 Συγκέντρωση NO_2 στο 1° αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα για καθένα από τα 5 σενάρια, για χρόνο παραμονής στερεών 10d.



Σχήμα 4.3.2.1.6 Λόγος $X_{AOB}/(X_{AOB}+X_{NOB})$ στο 4° αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα για καθένα από τα 5 σενάρια, για χρόνο παραμονής στερεών 10d.

Η επανακυκλοφορία διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, η οποία προκύπτει από τον καθορισμό υψηλών συγκεντρώσεων ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου (Σενάρια 4 και 5) σε προσομοίωση με επαρκή χρόνο παραμονής στερεών (SRT=10d), δημιουργεί μεγάλο πρόβλημα τόσο στην ποιότητα εκροής της εγκατάστασης, όπως φάνηκε στο Σχήμα 4.3.2.1.1 όσο και στις εκπομπές N_2O όπως δείχνουν τα σχετικά διαγράμματα στο Σχήμα 4.3.2.1.4.

Λόγω της επανακυκλοφορίας διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, και της αδυναμίας πλήρους απονιτροποίησης που αυτό συνεπάγεται, παράγεται μεγάλη ποσότητα υποξειδίου του αζώτου καθώς τα NO_2 ανακυκλοφορούν από την ανοξική δεξαμενή στο 1^{o} αεριζόμενο διαμέρισμα (Σχήμα 4.3.2.1.5), και εκεί παράγεται και εκλύεται υποξείδιο του αζώτου.

Στα σενάρια 4 και 5 οι εκπομπές N_2O φάινεται να μειώνονται με την πάροδο του χρόνου (Σχήμα 4.3.2.1.4), ενώ στα υπόλοιπα σενάρια οι εκπομπές N_2O είναι μεν χαμηλότερες αλλά σταθερές στο χρόνο. Ενδεχομένως η προσομοίωση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα να έδειχνε μια διαρκή μειωτική τάση, αλλά στην παρούσα εργασία η προσομοίωση γίνεται για διάστημα 7 ημερών. Η μειωτική αυτή τάση αντανακλάται και στο λόγο $\frac{\mathrm{XAOB}}{\mathrm{XAOB+XNOB}}$ (Σχήμα 4.3.2.1.6) καθώς τα X_{AOB} είναι υπεύθυνα για την παραγωγή N_2O.

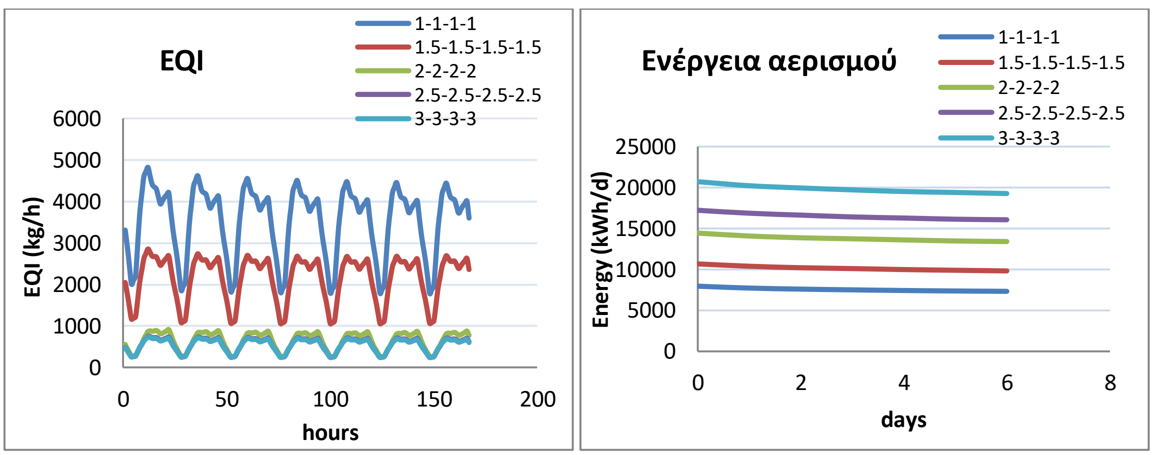
4.3.2.2 ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ SRT=5d

Σε συνέχεια του κεφαλαίου 4.3.2.1, στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα σενάρια που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4.3.2.1.1, αλλά για χρόνο παραμονής στερεών 5d. Είναι σημαντικό να διερευνηθεί πώς διαμορφώνονται οι απαιτήσεις οξυγόνου και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος ελέγχου του αερισμού στην περίπτωση που τα στερεά παραμένουν στο σύστημα για μικρότερο από το απαιτούμενο χρονικό διάστημα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των παραπάνω προσομοιώσεων. Στον Πίνακα 4.3.2.2.1 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου (KLA), του δείκτη μεταφοράς οξυγόνου σε πρότυπες συνθήκες (SOTR), του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI), της καταναλισκόμενης ενέργειας για αερισμό, καθώς επίσης και των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου (N_2O). Ακόμη, στον ίδιο Πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά στα οποία ικανοποιούνται τα όρια ολικού αζώτου (TNe) στην έξοδο της εγκατάστασης, και η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου (NH) στην έξοδο της εγκατάστασης, η οποία πρέπει να είναι κάτω από 1mg/L. Παρατίθενται ακόμη τα διαγράμματα του EQI και της συνολικής ενέργειας αερισμού (Σχήμα 4.3.2.2.1). Στον Πίνακα 4.3.2.2.2 φαίνονται οι συνολικές εκπομπές N_2O από όλα τα αεριζόμενα διαμερίσματα, ενώ στο Σχήμα 4.3.2.2.2 παρουσιάζονται οι εκπομπές N_2O σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα ξεχωριστά.

Πίνακας 4.3.2.2.1 Για καθένα από τα 5 σενάρια (α) ποσοστιαία μεταβολή των KLA, SOTR, EQI, καταναλισκόμενης ενέργειας αερισμού, N_2O σε σχέση με το αρχικό σενάριο, (β) ποσοστό ικανοποίησης ορίων TNe και (γ) συγκέντρωση εξόδου NH (mg/L)

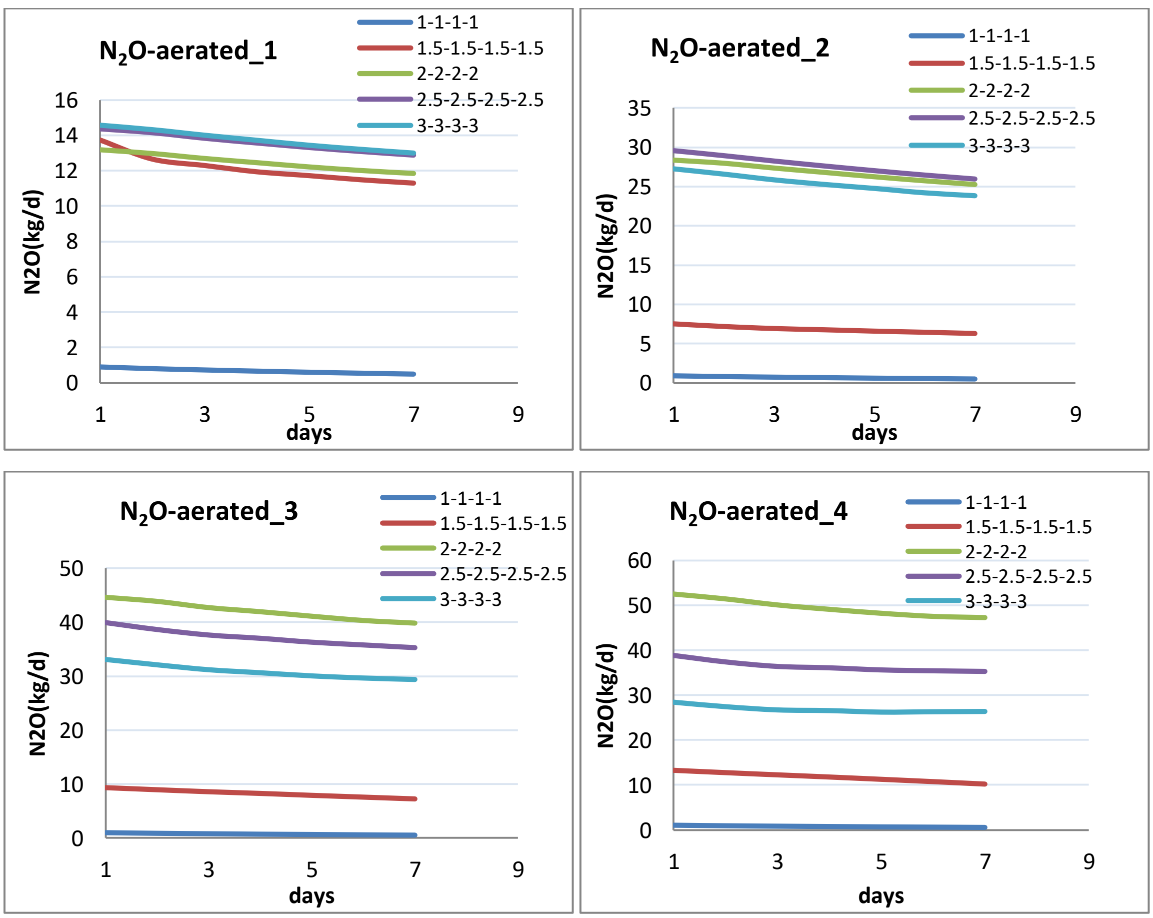
% μεταβολή σε σχέση με το αρχικό σενάριο (σενάριο 3)	σενάριο 1	σενάριο 2	σενάριο 3	σενάριο 4	σενάριο 5
KLA	-38.4	-21.6	0.0	10.4	21.6
SOTR	-37.7	-21.3	0.0	11.1	23.2
EQI	445.0	232.2	0.0	-13.9	-15.5
ενέργεια αερισμού	-45.4	-26.5	0.0	19.7	43.7
N2O	-97.8	-70.2	0.0	-12.1	-25.9
ποσοστό % ικανοποίησης επιτρεπόμενων ορίων εξόδου					
TNe	0	0	100	100	100
συγκέντρωση εξόδου					
NHe (mg/L)	45.46	24.82	1	0.09	0.04



Σχήμα 4.3.2.2.1 Δείκτης ποιότητας εκροής σε ωριαία βάση (αριστερά) και ενεργειακή κατανάλωση σε ημερήσια βάση (δεξιά) για καθένα από τα 5 σενάρια, για SRT=5d

Πίνακας 4.3.2.2.2 Συνολικές εκπομπές N_2O για κάθε σενάριο και ποσοστιαία μεταβολή των εκπομπών N_2O για κάθε σενάριο σε σχέση με το σενάριο αναφοράς (Σενάριο 3) για SRT=5d

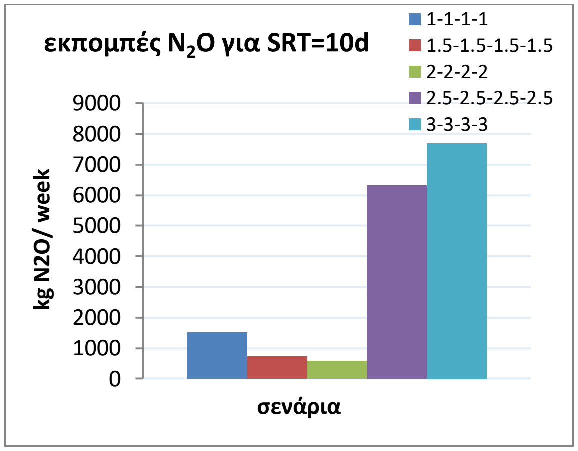
σενάρια	Συνολικές εκπομπές N_2O (kg/week)	% μεταβολη σε σχέση με το σενάριο αναφοράς
1	20	-97.8
2	272.9	-70.2
3	915.6	0
4	804.6	-12.1
5	678.1	-25.9

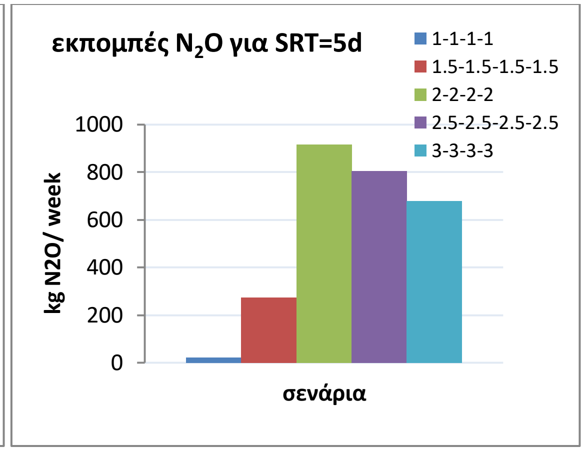


Σχήμα 4.3.2.2.2 Εκπομπές N_2O σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα, για καθένα από τα 5 σενάρια, για SRT=5d

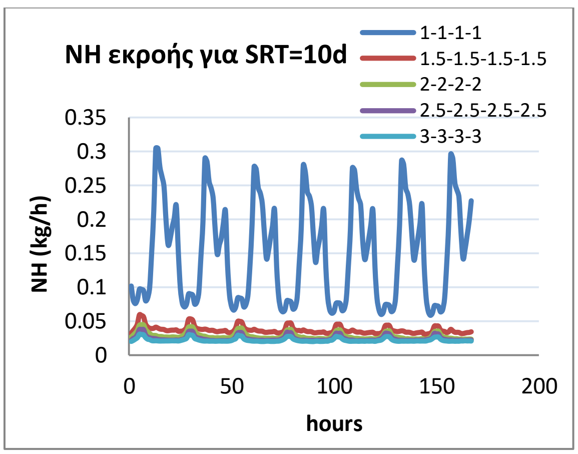
Όπως φαίνεται τόσο από τον Πίνακα 4.3.2.2.1 όσο και από το διάγραμμα του EQI στο Σχήμα 4.3.2.2.1. ο δείκτης EQI είναι κατά 445% και κατά 232% αυξημένος στα Σενάρια 1 και 2 για χρόνο παραμονής στερεών SRT=5d. Αυτό σημαίνει οτι η ποιότητα εκροής είναι κατά 4 και 2 φορές χαμηλότερη για καθένα από αυτά τα σενάρια, αντίστοιχα. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από το αμμωνιακό άζωτο εξόδου το οποίο είναι 45mg/L και 25mg/L , αντίστοιχα, τιμές που απέχουν πολύ από το επιτρεπόμενο όριο εξόδου (NHlim=1mg/L). Το ίδιο υψηλές είναι και οι τιμές του συνολικού αζώτου στην έξοδο και δεν ικανοποιούνται καθόλου τα όρια όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3.2.2.1. Αυτό συμβαίνει προφανώς γιατί σε συνθήκες αιχμής , η χαμηλότερη συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου δεν επαρκεί. Εφόσον το όριο αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο πρέπει να είναι χαμηλότερο από NHlim=1mg/L, παρατηρείται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.3.2.2.1 ότι για συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου ίση με 2mg/L, το όριο εξόδου για το αμμωνιακό άζωτο ικανοποιείται οριακά. Για το λόγο αυτό είναι σκόπιμο να εξεταστούν τα σενάρια 4 και 5 προκειμένου να μειωθεί αυτό το όριο και να δημιουργηθούν περιθώρια ασφαλείας. Για τα Σενάρια 4 και 5 η τιμή του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης είναι 0.09 και 0.04 mg/L, αντίστοιχα, άρα επιτυγχάνεται μια σημαντική βελτίωση. Ταυτόχρονα, ο δείκτης EQI είναι μειωμένος κατά 14% και 15% για καθεμία από αυτές τις περιπτώσεις, συγκριτικά με το σενάριο αναφοράς (σενάριο 3). Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών N_2O κατά 12.1% και 25.9%, αντίστοιχα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα οτι με τα σενάρια 4 και 5 βελτιώνεται η ποιότητα εκροής της εγκατάστασης σε σχέση με το σενάριο αναφοράς και μειώνονται οι εκπομπές N_2O κατά αξιοσημείωτα ποσοστά. Η ενεργειακή επιβάρυνση στο σύστημα αερισμού είναι κατά 19.7% και 43.7% αυξημένη για κάθε περίπτωση από τις παραπάνω και συνεπώς το αν θα εφαρμοστούν βελτιστοποιητικά σενάρια εξαρτάται από το περιθώριο ενεργειακής δαπάνης που υπάρχει στην εγκατάσταση.

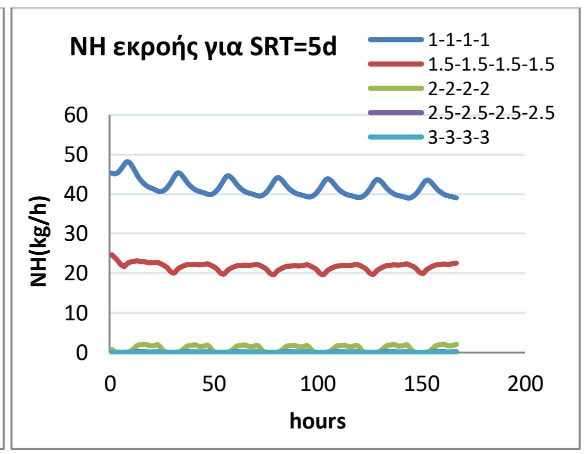
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συνολικές εκπομπές N_2O (Σχήμα 4.3.2.2.3) καθώς και η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου (NH) εκροής (Σχήμα 4.3.2.2.4) σε συνθήκες επαρκούς χρόνου παραμονής στερεών (SRT=10d) στα αριστερά και σε συνθήκες χαμηλού χρόνου παραμονής στερεών (SRT=5d) στα δεξιά, για καθένα από τα 5 σενάρια που προσομοιώθηκαν.





Σχήμα 4.3.2.2.3 Συνολικές επομπές N_2O όλων των διαμερισμάτων του βιολογικού αντιδραστήρα, για καθένα από τα 5 σενάρια, για SRT=10d (αριστερά) και SRT=5d (δεξιά)





Σχήμα 4.3.2.2.4 Συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου εκροής, για καθένα από τα 5 σενάρια, για SRT=10d (αριστερά) και SRT=5d (δεξιά)

Για SRT=5d οι εκπομπές N_2O στο 1^o σενάριο είναι πολύ χαμηλές αφού πρακτικά δεν γίνεται νιτροποίηση. Στο 2^o σενάριο οι εκπομπές αυξάνονται και η αύξηση αυτή συνεχίζεται και για το σενάριο αναφοράς (SO set-point=2mg/L), γεγονός που σχετίζεται με τη μερική νιτροποίηση. Στη συνέχεια, για μεγαλύτερες τιμές της συγκέντρωσης ελέγχου παρατηρείται πτωτική τάση των εκπομπών N_2O. Στο Σχήμα 4.3.2.2.4 φαίνεται πως για SRT=5d το αμμωνιακό άζωτο εξόδου μειώνεται αισθητά (μερική νιτροποίηση) για μείωση της συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου από 1 σε 1.5mg/L και στη συνέχεια από 1.5 σε 2mg/L. Για SRT=10d το προφίλ των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου αλλάζει εντελώς. Οι εκπομπές είναι γενικά μεγαλύτερες, με τις χαμηλότερες να εμφανίζονται τώρα στο σενάριο αναφοράς (SOsetpoint=2mg/L), αντίστροφα δηλαδη από αυτο που παρατηρήθηκε για SRT=5d.

Συμπερασματικά, όταν μια εγκατάσταση δουλεύει σε επαρκή χρόνο παραμονής στερεών (10d) φαίνεται να είναι επωφελής, κυρίως ως προς την ενεργειακή κατανάλωση και δευτερευόντως ως προς την ποιότητα της τελικής εκροής, η επιλογή χαμηλότερων συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου ακόμα και στα πρώτα διαμερίσματα. Βέβαια, η επιλογή αυτή έχει περιθώριο μεταξύ 1.5mg/L και 2mg/L, γιατί σε συγκεντρώσεις ελέγχου γύρω στο 1mg/L παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις νιτρωδών, τα οποία είναι τοξικά.

Αντίθετα, σε συνθήκες κινητικής πίεσης του συστήματος (μικροί χρόνοι παραμονής στερεών), αυτή η επιλογή δεν προτείνεται. Στις περιπτώσεις αυτές προκειμένου να ευνοηθούν οι ρυθμοί των απαιτούμενων βιοχημικών διεργασιών, προτείνεται η επιλογή συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου τουλάχιστον 2mg/L. Η τελική επιλογή σε συνθήκες πίεσης του συστήματος εξαρτάται και από την οικονομικά αποδεκτή αύξηση του ενεργειακού κόστους (δεδομένου οτι η αύξηση της συγκέντρωσης ελέγχου από 2mg/L σε 2.5mg/L επιφέρει αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης της τάξεως του 20%).

4.3.3 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

4.3.3.1 ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ SRT=10d

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν με εφαρμογή σεναρίων διαφορετικής συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα. Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου 4.3 η απαίτηση του βιολογικού αντιδραστήρα για οξυγόνο διαφέρει από διαμέρισμα σε διαμέρισμα και έχει μειωτική τάση. Συνεπώς για όλα τα σενάρια που επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν, η τιμή της συγκέντρωσης ελέγχου σε κάθε διαμέρισμα είναι μικρότερη ή ίση της συγκέντρωσης ελέγχου του προηγούμενου διαμερίσματος. Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.3.1.1. Τα σενάρια αυτά συγκρίνονται με το σενάριο αναφοράς στο οποίο η συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου είναι ίση με 2mg/L.

Πίνακας 4.3.3.1.1 Σενάρια προσομοίωσης με διαφορετική συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα

σενάρια	SO set-point (mg/L) 1^{o} αεριζόμενο	SO set-point (mg/L) 2^{o} αεριζόμενο	SO set-point (mg/L) 3^{o} αεριζόμενο	SO set-point (mg/L) 4^{o} αεριζόμενο
1	2	1.8	1.6	1.4
2	2	1.8	1.4	1.2
3	2	1.8	1.2	1
4	2.5	2	2	2
5	2.5	2	1	1
6	2.5	2	1.5	1
7	3	2	2	2
8	3	2	1.5	1.5
9	3	2	1	1
10	3	2	1.5	1

Στον Πίνακα 4.3.3.1.2 παρουσιάζονται: η ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου (KLA), του δείκτη μεταφοράς οξυγόνου σε πρότυπες συνθήκες (SOTR), του δείκτη ποιότητας εκροής (EQI), της ενέργειας που καταναλώνεται για αερισμό (aeration Energy) και των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου (N_2O) . Ακόμη, σημειώνεται το ποσοστό με το οποίο επιτυγχάνονται τα όρια για το συνολικό άζωτο στην έξοδο της εγκατάστασης (TNlim=15mg/L) καθώς επίσης και η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο η οποία πρέπει να είναι χαμηλότερη από NHlim=1mg/L.

Πίνακας 4.3.3.1.2 Για καθένα από τα 10 σενάρια (α) ποσοστιαία μεταβολή των KLA, SOTR, EQI, καταναλισκόμενης ενέργειας αερισμού, N_2O σε σχέση με το αρχικό σενάριο, (β) ποσοστό ικανοποίησης ορίων TNe και (γ) συγκέντρωση εξόδου NH (mg/L)

Αριθμός σεναρίου	αναφοράς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Συγκεντρώσεις ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου	2-2-2-2	2-1.8-1.6-1.4	2-1.8-1.4-1.2	2-1.8-1.2-1	2.5-2-2-2	2.5-2-1-1	2.5-2-1.5-1	3-2-2-2	3-2-1.5-1.5	3-2-1-1	3-2-1.5-1
%μεταβολή σε σχέση με το αρχικό σενάριο											
KLA	0	-4.2	-5.5	-6.7	3.2	-2.8	-1.2	7.0	4.1	1.4	2.8
SOTR	0	-3.8	-4.9	-5.9	4.0	-1.1	0.3	8.8	6.3	4.1	5.4
EQI	0	-4.8	-6.8	-8.9	1.1	-8.7	-6.5	1.9	-2.2	-8.2	-5.9
ενέργεια αερισμού	0	-6.4	-8.0	-9.5	7.5	-0.2	1.9	17.4	13.4	10.4	12.2
N2O	0	-2.2	5.5	17.1	14.2	4.4	-9.2	29.3	-15.0	-4.1	-15.5
ποσοστό επιτυχίας ορίων (%)											
TNe	87.5	100	100	100	84.4	100	100	83.3	92.7	100	100
συγκέντρωση εξόδου											
NH(mg/L)	0.026	0.026	0.030	0.035	0.025	0.032	0.029	0.024	0.024	0.031	0.027

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3.3.1.2, τα όρια συνολικού αζώτου στην έξοδο ικανοποιούνται σε πολύ μεγάλο βαθμό για όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν. Ακόμα και στο δυσμενέστερο από αυτά, τα όρια επιτυγχάνονται σε ποσοστό 83.3%. Το αμμωνιακό άζωτο είναι πολύ χαμηλότερο από 1mg/L στην έξοδο. Εφόσον σε επαρκή χρόνο παραμονής στερεών (SRT=10d) ικανοποιούνται σε κάθε περίπτωση τα όρια στην έξοδο, αξίζει να εξεταστούν τα περιθώρια βελτίωσης του συστήματος.

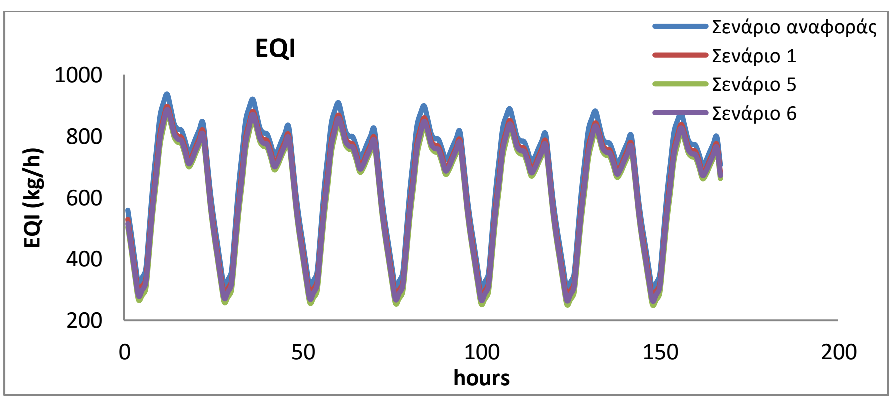
Στα 3 πρώτα σενάρια με μειούμενο SO set-point στα 4 διαμερίσματα (2-1.8-1.6-1.4), (2-1.8-1.4-1.2), (2-1.8-1.2-1), επιτυγχάνεται μείωση της ενεργειακής απαίτησης για οξυγόνο κατά 6.7%, 8% και 9.5% αντίστοιχα. Η ποιότητα εκροής βελτιώνεται, σύμφωνα με το δείκτη EQI, ο οποίος μειώνεται κατά 4.8%, 6.8% και 8.9% για καθένα από τα 3 σενάρια. Οι εκπομπές N_2O είναι αυξημένες στα Σενάρια 2 και 3 κατά 5.5% και 17.1%, ενώ στο 3^{o} σενάριο μειώνονται κατά 2.2%. Η επιλογή της βέλτιστης λύσης εξαρτάται από το κριτήριο βάσει του οποίου ελέγχεται το σύστημα αερισμού. Αν κρίνεται αναγκαίο οι εκπομπές N_2O να περιοριστούν, επιλέγεται το 1^{o} εκ των 3 εναλλακτικών σεναρίων. Αν η βελτιστοποίηση γίνεται ως προς την ενεργειακή κατανάλωση και το κόστος λειτουργίας του συστήματος αερισμού, τότε επιλέγεται το 3^{o} εκ των 3 εναλλακτικών σεναρίων. Το 1^{o} σενάριο, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.3.3.1.2, είναι βέλτιστο ως προς κάθε παράμετρο.

Τα σενάρια 4 και 7 δεν ωφελεί να αναλυθούν εκτενέστερα. Εφόσον δεν δημιουργείται πρόβλημα στην εκροή ώστε να απαιτηθεί αυξημένη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, τα σενάρια στα οποία αυξάνεται η συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου στο 1ο διαμέρισμα δεν προσφέρουν κάποια βελτίωση στο σύστημα. Στα σενάρια αυτά, οχι μόνο αυξάνεται η ενεργειακή κατανάλωση, αλλά ταυτόχρονα αυξάνονται και οι εκπομπές N_2O και διαταράσσεται η ποιότητα εκροής.

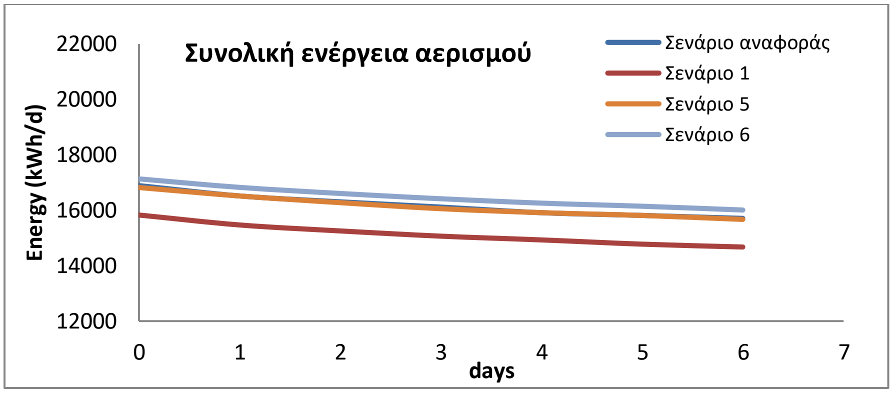
Στα σενάρια 8, 9 και 10 η συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου είναι 3 mg/L στο 1ο αεριζόμενο διαμέρισμα, 2 mg/L στο 2ο διαμέρισμα και κάτω από 2 mg/L στο 3ο και 4ο διαμέρισμα. Σε καθένα από αυτά τα σενάρια η ποιότητα εκροής βελτιώνεται κατά 2.2%, 5.9%, 8.2% σύμφωνα με το δείκτη ποιότητας εκροής (EQI), ενώ η ενεργειακή απαίτηση για να συμβεί αυτό αυξάνεται κατά 13.4%, 10.4% και 12.2%. Σε καθεμία από τις περιπτώσεις αυτές οι εκπομπές N_2O μειώνονται κατά 15%, 15.5% και 4% αντίστοιχα.

Στο σενάριο 6, όπου οι συγκεντρώσεις ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου είναι (2.5,2,1.5,1), επιτυγχάνεται μείωση του EQI κατά 6.5% με αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά 1.8%, ενώ παρατηρείται μείωση των εκπομπών N_2O κατά 9.2%.

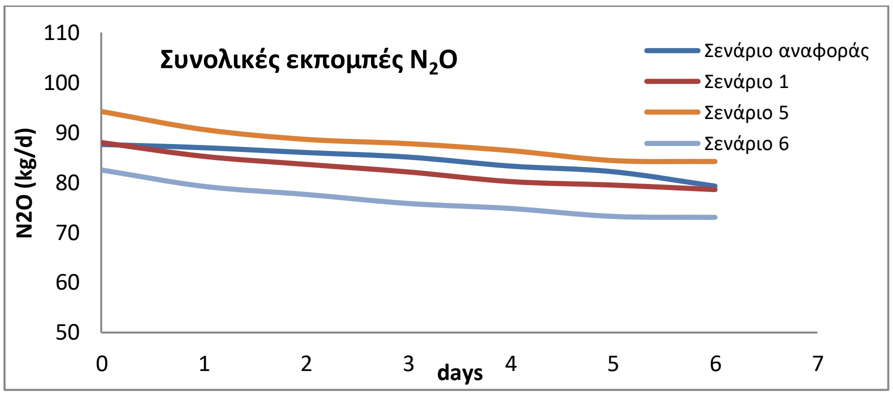
Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 4.3.3.1.1, Σχήμα 4.3.3.1.2 και Σχήμα 4.3.3.1.3) φαίνονται ο δείκτης ποιότητας εκροής EQI, η κατανάλωση ενέργειας για αερισμό και οι εκπομπές N_2O για 3 επικρατέστερα σενάρια: σενάριο 1 (βέλτιστο ως προς κάθε παράμετρο), σενάριο 5 (σημαντική βελτίωση της ποιότητας εκροής) και σενάριο 6 (μειωμένες εκπομπές N_2O) τα οποία συγκρίνονται με το σενάριο αναφοράς.



Σχήμα 4.3.3.1.1 Δείκτης ποιότητας εκροής EQI υπολογισμένος σε ωριαία βάση, για SRT=10d.



Σχήμα 4.3.3.1.2 Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια για αερισμό των 4 αεριζόμενων διαμερισμάτων του βιολογικού αντιδραστήρα, για SRT=10d.



Σχήμα4.3.3.1.3 Συνολικές εκπομπές N_2O των 4 αεριζόμενων διαμερισμάτων του βιολογικού αντιδραστήρα, για SRT=10d.

Συμπερασματικά, σε συνθήκες επαρκούς χρόνου παραμονής στερεών στο σύστημα (SRT=10d), το σενάριο 1 φαίνεται από τον Πίνακα 4.3.3.1.2 να είναι βέλτιστο ως προς όλες τις παραμέτρους. Υπάρχουν όμως και άλλα σενάρια (π.χ. τα σενάρια 5 και 6) με τα οποία φαίνεται να μπορεί να σημειωθεί μεγάλη ποιοτική βελτίωση στο σύστημα με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.

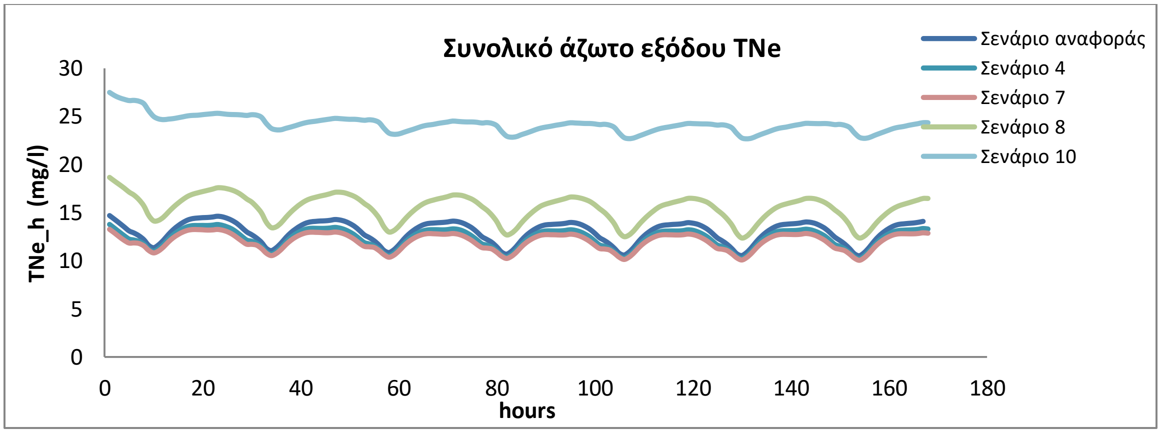
4.3.3.2 ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ SRT=5d

Στο υποκεφάλαιο αυτό εξετάζονται τα σενάρια του υποκεφαλαίου 4.3.3.1 (Πίνακας 4.3.3.1.1), αλλά για συνθήκες χαμηλών χρόνων παραμονής στερεών (SRT=5d). Για συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου ίση με 2mg/L σε όλα τα αεριζόμενα διαμερίσματα και για SRT=5d, η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο είναι ίση με 1mg/L. Καθώς η τιμή αυτή είναι οριακά αποδεκτή, μελετώνται εναλλακτικά σενάρια με συγκεντρώσεις ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου που θα μπορούσαν να βελτιώσουν τις συνθήκες εξόδου της εγκατάστασης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 4.3.3.2.1 με τα ακόλουθα στοιχεία: ποσοστιαία μεταβολή του KLA, του SOTR, του EQI, της ενέργειας για αερισμό και των εκπομπών N_2O κάθε σεναρίου σε σχέση με το αρχικό σενάριο. Στον πίνακα φαίνεται επίσης το ποσοστό επίτευξης των ορίων εξόδου για το συνολικό άζωτο, και η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης για κάθε σενάριο. Παρουσιάζεται επίσης το διάγραμμα συγκέντρωσης συνολικού αζώτου (TNe) στην έξοδο της εγκατάστασης. (Σχήμα 4.3.3.2.1)

Πίνακας 4.3.3.2.1 Για καθένα από τα 10 σενάρια (α) ποσοστιαία μεταβολή των KLA, SOTR, EQI, καταναλισκόμενης ενέργειας αερισμού, N_2O σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, (β) ποσοστό ικανοποίησης ορίων TNe και (γ) συγκέντρωση εξόδου NH (mg/L)

Αριθμός σεναρίου	αναφοράς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Συγκεντρώσεις ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου	2-2-2-2	2-1.8-1.6-1.4	2-1.8-1.4-1.2	2-1.8-1.2-1	2.5-2-2-2	2.5-2-1-1	2.5-2-1.5-1	3-2-2-2	3-2-1.5-1.5	3-2-1-1	3-2-1.5-1
%μεταβολή σε σχέση με το αρχικό σενάριο											
KLA	0	-11.0	-17.9	-24.3	3.6	-19.9	-12.6	7.6	1.9	-14.1	-7.0
SOTR	0	-10.4	-16.7	-22.6	4.3	-17.5	-10.5	9.3	3.9	-11.1	-4.2
EQI	0	113.1	210.0	305.5	-6.1	288.9	177.9	-9.1	27.7	256.4	148.6
ενέργεια αερισμού	0	-12.7	-19.2	-25.1	8.0	-16.0	-9.0	17.9	10.8	-4.5	2.4
N2O	0	-38.6	-68.2	-80.0	0.8	-78.9	-60.9	0.5	1.1	-76.5	-51.5
ποσοστό επιτυχίας ορίων %											
TNe	100	0	0	0	100	0	0	100	39.583333	0	0
συγκέντρωση εξόδου											
NH (mg/L)	1.00	14.18	22.92	31.56	0.46	30.00	19.95	0.30	5.58	27.07	17.40



Σχήμα 4.3.3.2.1 Συγκέντρωση συνολικού αζώτου εξόδου για καθένα από τα πιθανά βελτιστοποιητικά σενάρια για SRT=5d

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3.3.2.1, στα σενάρια 4 και 7 στα οποία αυξάνεται η συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου του $1^{ου}$ διαμερίσματος από 2mg/L σε 2.5mg/L και σε 3mg/L επιτυγχάνεται μείωση από 1mg/L σε 0.46mg/L και σε 0.29 mg/L αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο, αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι για μικρούς χρόνους παραμονής στερεών που οι συνθήκες εξόδου δεν είναι ικανοποιητικές, η αύξηση της συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου κατά 0.5 mg/L στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα, είναι αρκετή ώστε να μειώσει κατά περίπου 50% το αμμωνιακό άζωτο εξόδου. Με την παρέμβαση αυτή, το συνολικό KLA ($week^{-1}$) αυξάνεται κατά 3.6% και η ενέργεια που καταναλώνεται για αερισμό αυξάνεται κατά 8%. Παράλληλα, μειώνεται ο δείκτης ποιότητας εκροής EQI κατά 6.2% ενώ οι εκπομπές N_2O αυξάνονται κατά 0.8%. Τα TNe μειώνονται ακόμα περισσότερο, αν και δεν ήταν αναγκαίο γιατί ήταν ήδη χαμηλότερα από τα επιτρεπόμενα όρια.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.3.3.2.1, στο σενάριο 8, η δοκιμή να αυξηθεί η συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου στο $1^{ο}$ διαμέρισμα κατά 1mg/L και να μειωθεί κατά 0.5 mg/L σε καθένα από τα δύο τελευταία αεριζόμενα διαμερίσματα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του NH εξόδου σε 5.6 mg/L. Ταυτόχρονα αυξάνεται το KLA κατά 2%, η ενέργεια για αερισμό κατά 10% αλλά και ο δείκτης EQI κατά 28%, ενώ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.3.2.1 είναι αισθητή και η αύξηση του συνολικού αζώτου. Επομένως, η εναλλακτική αυτή ρύθμιση της συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου ανά διαμέρισμα δεν είχε αποτέλεσμα στη βελτίωση της ποιότητας εκροής.

Τελικά ο μόνος τρόπος για να αντιμετωπιστούν οι δυσμενείς συνθήκες μικρών χρόνων παραμονής στερεών, σε αυτά τα πλαίσια ρύθμισης του KLA, είναι να καθοριστεί μεγαλύτερη συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα.

4.4 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ KLA ΜΕΣΩ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΜΜΩΝΙΑΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ

4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο, στην προσπάθεια να βελτιστοποιηθεί η ρύθμιση της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου (KLA) σύμφωνα με τις ανάγκες του συστήματος, εισάγεται στο μοντέλο ο έλεγχος της συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου. Στα κεφάλαια 4.2. και 4.3. εξετάστηκε η ρύθμιση του KLA βάσει της συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου, ενώ στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η εφαρμογή συγκεντρώσεων ελέγχου για το διαλυμένο οξυγόνο σε συνδυασμό όμως με κριτήρια ελέγχου συγκέντρωσης για το αμμωνιακό άζωτο.

Η ανάγκη για ανάπτυξη αυτής της μορφής ελέγχου προέκυψε γιατί το πρώτο κριτήριο με το οποίο αξιολογείται η απόδοση ενός συστήματος αερισμού είναι η ποιότητα εκροής. Αν δεν ικανοποιούνται τα όρια που έχουν τεθεί για την εκροή, δεν έχει σημασία η οποιαδήποτε προσπάθεια για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ή των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Στα προηγούμενα κεφάλαια το διαλυμένο οξυγόνο ρυθμίζεται βάσει μιας προκαθορισμένης συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου και στη συνέχεια ελέγχεται αν η συγκέντρωση αυτή επαρκεί για τη διατήρηση ικανοποιητικής ποιότητας εκροής. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα αναπτυχθεί η αντίστροφη διαδικασία ελέγχου, δηλαδή θα ελέγχεται η τιμή του αμμωνιακού αζώτου και πόσο απέχει από το επιτρεπόμενο όριο και με βάση αυτό θα ρυθμίζεται το KLA είτε άμεσα, είτε έμμεσα με τον καθορισμό μιας συγκέντρωσης ελέγχου για το διαλυμένο οξυγόνο.

Αναλυτικότερη περιγραφή των διαδικασιών για τον έλεγχο του αμμωνιακού αζώτου θα γίνει σε καθένα από τα υποκεφάλαια 4.4.2 και 4.4.3 Οι προσομοιώσεις στο κεφάλαιο 4.4 γίνονται με χρήση της μεθόδου αναλογικού ελέγχου (proportional control), για ρύθμιση του KLA ανά χρονικό βήμα 1min. Τα σενάρια που θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου εξετάζονται για χαμηλές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών (SRT=5d). Επιλέγεται η προσομοίωση να γίνει υπό δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας γιατί σε αυτές τις συνθήκες η ποιότητα εκροής είναι χαμηλή και είναι κρίσιμη η εξασφάλιση μιας συγκέντρωσης χαμηλότερης από την επιτρεπόμενη.

4.4.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΑΜΜΩΝΙΑΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΟ 1^{O} ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

Στο υποκεφάλαιο αυτό μελετάται η ενσωμάτωση του ελέγχου του αμμωνιακού αζώτου στη διαδικασία ελέγχου της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου, στην είσοδο του βιολογικού αντιδραστήρα. Συγκεκριμένα, ελέγχεται αν η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στο 1^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα είναι χαμηλότερη ή υψηλότερη από μία προκαθορισμένη συγκέντρωση (SNHset). Αν είναι χαμηλότερη, τότε ορίζεται συγκέντρωση ελέγχου για το διαλυμένο οξυγόνο (SO set-point) ίση με 2mg/L τόσο για το 1^{ο} όσο και για τα υπόλοιπα 3 αεριζόμενα διαμερίσματα. Αν είναι υψηλότερη, τότε ορίζεται συγκέντρωση ελέγχου για το διαλυμένο οξυγόνο ίση με 3mg/L, στο 1^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα και 2mg/L στα 3 επόμενα αεριζόμενα διαμερίσματα, αφού στην περίπτωση αυτή αναμένεται να απαιτηθεί περισσότερο οξυγόνο. Ο έλεγχος αυτός συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο του αερισμού για να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τη ρύθμιση της συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου. Η επιλογή της συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου γίνεται σύμφωνα με τα φορτία αμμωνιακού αζώτου που εισέρχονται στο βιολογικό αντιδραστήρα, καθώς αποτελούν καθοριστικό παράγοντα ζήτησης οξυγόνου για το σύστημα.

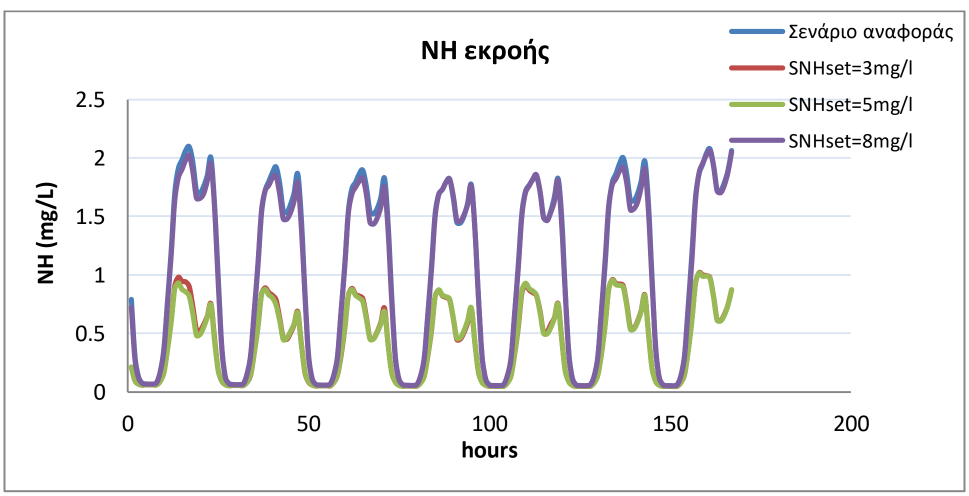
Με βάση τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν 3 προσομοιώσεις με διαφορετικές συγκεντρώσεις ελέγχου του αμμωνιακού αζώτου στην 1^{η} αεριζόμενη δεξαμενή. Τα σενάρια που εφαρμόστηκαν ήταν (α) SNHset=3mg/L, (β) SNHset=5mg/L και (γ) SNHset=8mg/L. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μέθοδος αναλογικού ελέγχου (proportional control) και ο χρόνος παραμονής στερεών για τον οποίο εξετάστηκαν ήταν 5 ημέρες. Τα παραπάνω σενάρια παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου και συγκρίνονται με το σενάριο αναφοράς, στο οποίο εφαρμόζεται συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου ίση με 2mg/L σε όλα τα αεριζόμενα διαμερίσματα, ανεξάρτητα από τη συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου.

Στον Πίνακα 4.4.2.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του KLA, του SOTR, του δείκτη ποιότητας εκροής EQI, της ενέργειας που καταναλώνεται για αερισμό καθώς επίσης και των εκπομπών N_2O για κάθε σενάριο σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Επίσης φαίνονται τα ποσοστά με τα οποία επιτυγχάνονται τα όρια στην έξοδο και η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο.

Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου που φαίνεται στον πίνακα προκύπτει από εκτέλεση της προσομοίωσης με σταθερά φορτία εισόδου. Για να είναι σαφέστερη η εικόνα της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου και να εξεταστεί ο κίνδυνος σε καταστάσεις αιχμής, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.2.1 η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης για δυναμική φόρτιση για καθένα από τα 3 προσομοιωμένα σενάρια καθώς επίσης και για το σενάριο αναφοράς.

Πίνακας 4.4.2.1 Για καθένα από τα 3 σενάρια (α) ποσοστιαία μεταβολή των KLA, SOTR, EQI, καταναλισκόμενης ενέργειας για αερισμό , N_2O σε σχέση με το αρχικό σενάριο, (β) ποσοστό ικανοποίησης ορίων TNe και (γ) συγκέντρωση εξόδου NH (mg/L)

Σενάρια	Σενάριο αναφοράς	SNHset=3 mg/l	SNHset=5 mg/l	SNHset=8 mg/l
% μεταβολή σε σχέση με το Σενάριο αναφοράς				
KLA	0	7.5	7.4	0.0
SOTR	0	1.2	1.2	0.0
EQI	0	-9.0	-9.1	-0.3
aeration Energy	0	8.5	8.4	0.1
N2O	0	0.5	0.7	0.0
ποσοστό επιτυχίας ορίων %				
TNe	100	100	100	100
συγκέντρωση εξόδου				
NH (mg/L)	1.004	0.306	0.306	0.922



Σχήμα 4.4.2.1 Συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης για καθένα από τα σενάρια (α), (β) και (γ) και για το σενάριο αναφοράς, για SRT=5d

Με τα σενάρια (α) και (β) αυξάνεται η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα, όταν το αμμωνιακό άζωτο είναι υψηλό στην είσοδο του βιοαντιδραστήρα και αυτό οδηγεί στο επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης (Σχήμα 4.4.2.1) και σε γενικότερη βελτίωση της ποιότητας εκροής (Πίνακας 4.4.2.1). Συγκεκριμένα, ο δείκτης ποιότητας εκροής EQI και στα 2 αυτά σενάρια είναι μειωμένος κατά 9% ενώ η ενεργειακή κατανάλωση για τον αερισμό του συστήματος είναι αυξημένη κατά 8.5%. Στο σενάριο (γ), εφόσον δεν παρουσιάζονται συχνά συγκεντρώσεις άνω των 8mg/L, δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου είναι περίπου ίδιες για όλα τα σενάρια.

Συμπερασματικά, με την εφαρμογή αυτής της μεθόδου ελέγχου του αμμωνιακού αζώτου στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα του βιοαντιδραστήρα, το αμμωνιακό άζωτο εξόδου είναι χαμηλότερο από το μέγιστο όριο (NHlim=1mg/L) ακόμα και σε καταστάσεις αιχμής (Σχήμα 4.4.2.1). Αυτό βέβαια προϋποθέτει την αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων αερισμού (αύξηση της τάξης του 8%) και την οριακή αύξηση των εκπομπών του υποξειδίου του αζώτου. Κατά συνέπεια η υιοθέτηση αυτής της πρακτικής ελέγχου του συστήματος αερισμού είναι ιδιαιτέρως ενδιαφέρουσα για την ικανοποίηση ωριαίων φορτίσεων αιχμής ή όταν είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση των συγκεντρώσεων αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο μιας ΕΕΛ.

4.4.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΑΜΜΩΝΙΑΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΟ $1^{Ο}$ ΚΑΙ ΣΤΟ $4^{Ο}$ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ

Στο υποκεφάλαιο αυτό, όπως και στο 4.4.2, εξετάζεται ένας τρόπος ρύθμισης του αερισμού που συνδυάζει τον έλεγχο αμμωνιακού αζώτου με τον έλεγχο διαλυμένου οξυγόνου με σκοπό την ακριβέστερη προσέγγιση των αναγκών του συστήματος. Στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα ελέγχεται αν η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου που εισέρχεται στο βιολογικό αντιδραστήρα ξεπερνάει ή όχι μια συγκέντρωση ελέγχου (SNHset) που έχει προκαθοριστεί στο σύστημα. Στην περίπτωση που η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου ξεπερνάει το SNHset (SNH>SNHset), τότε η συγκέντρωση ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου καθορίζεται στα 3mg/L. Αν (SNH<SNHset), τότε η συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου ρυθμίζεται στα 2mg/L. Με αυτό τον τρόπο ρυθμίζονται τα επίπεδα αερισμού στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα. Στα υπόλοιπα διαμερίσματα ο έλεγχος της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου KLA γίνεται σύμφωνα με τον έλεγχο του αμμωνιακού αζώτου στο $5^{ο}$ αερόβιο διαμέρισμα του βιολογικού αντιδραστήρα (δεξαμενή απαερίωσης). Συγκεκριμένα,

ελέγχεται αν η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου (NH) στο σημείο αυτό, που είναι πρακτικά και η συγκέντρωση που έχει το NH στην έξοδο της εγκατάστασης, είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο (NHlim=1mg/L) και αναλόγως ρυθμίζεται η παροχέτευση οξυγόνου στο σύστημα. Αν η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου είναι μικρότερη από NHlim (NH<NHlim), τότε η ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου μειώνεται, καθώς δεν απαιτείται επιπλέον οξυγόνο για την απομάκρυνση του φορτίου αζώτου. Αν η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου είναι μεγαλύτερη από NHlim (NH>NHlim), τότε το KLA αυξάνεται καθώς είναι αναγκαία η διοχέτευση περισσότερου οξυγόνου για να απομακρυνθεί το αμμωνιακό άζωτο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μεταβολή της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου είναι η μέθοδος αναλογικού ελέγχου (proportional control), ενώ το χρονικό βήμα μεταβολής της ταχύτητας KLA είναι 1min.

Στην προσομοίωση που έγινε για έλεγχο του συστήματος αερισμού σύμφωνα με τον παραπάνω τρόπο, ορίστηκε SNHset=3mg/L και SNHlim=0.9mg/L αντί για 1mg/L που είναι το επιτρεπόμενο όριο, προκειμένου να ληφθεί περιθώριο ασφαλείας. Επιπλέον, για τον έλεγχο του SNH βάσει του SNHlim καθορίστηκε επιτρεπόμενο σφάλμα (υποκεφάλαιο 4.2.3) ίσο με 0.1mg/L. Η προσομοίωση έγινε για μικρό χρόνο παραμονής στερεών (SRT=5d).

Στη συνέχεια το παραπάνω σενάριο συγκρίθηκε (α) με το σενάριο αναφοράς στο οποίο ορίζεται συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου ίση με 2mg/L σε όλα τα διαμερίσματα του βιολογικού αντιδραστήρα και (β) με το σενάριο που εφαρμόστηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο (4.4.2) και στο οποίο γίνεται έλεγχος αμμωνιακού αζώτου στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα με προκαθορισμένη συγκέντρωση ελέγχου SNHset=3mg/L, και στα υπόλοιπα αεριζόμενα διαμερίσματα ορίζεται συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου ίση με 2mg/L.

Τα σενάρια παρουσιάζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4.4.3.1)

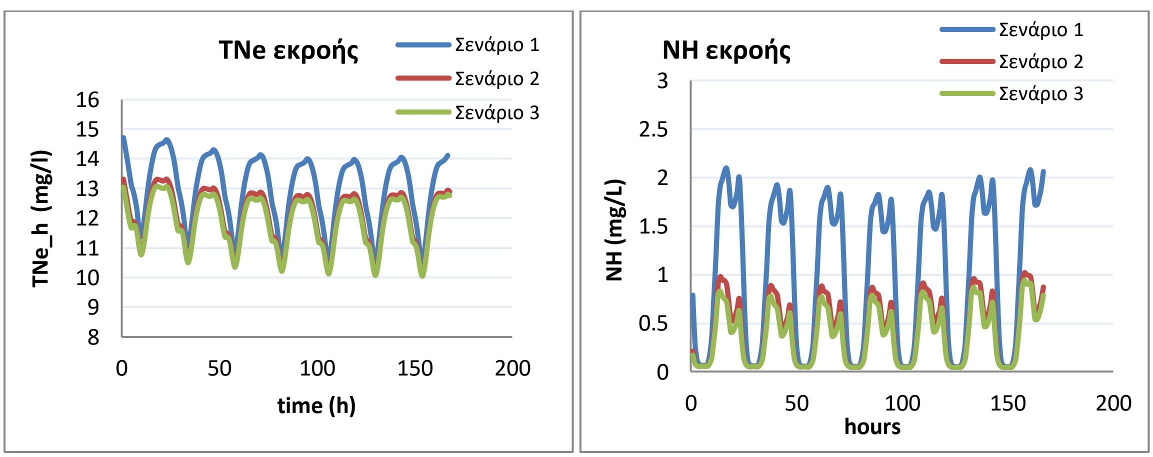
Πίνακας 4.4.3.1 Παρουσίαση σεναρίων ελέγχου του συστήματος αερισμού με βάση τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου και τη συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου

	1^o αεριζόμενο	2^o αεριζόμενο	3^o αεριζόμενο	4^o αεριζόμενο
Σενάριο 1 (αναφοράς)	SOsetpoint =2mg/L	SO set point =2mg/L	SO set point =2mg/L	SO set point =2mg/L
Σενάριο 2	SNHset: SO set-point= 2mg/L η 3mg/	SO set point =2mg/L	SO set point =2mg/L	SO set point =2mg/L
Σενάριο 3	SNHset: SO set-point= 2mg/L η 3mg/	SNHlim: καθορισμός του KLA βάσει του SNH	SNHlim: καθορισμός του KLA βάσει του SNH	SNHlim: καθορισμός του KLA βάσει του SNH

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των 3 σεναρίων. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 4.4.3.2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του KLA, του SOTR, του δείκτη ποιότητας εκροής EQI, της ενέργειας που καταναλώνεται για αερισμό καθώς επίσης και των εκπομπών N_2O για κάθε σενάριο σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Επίσης φαίνονται τα ποσοστά με τα οποία επιτυγχάνονται τα όρια στην έξοδο και η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζωτου στην έξοδο. Παρατίθεται ακόμη το διάγραμμα της συγκέντρωσης αμμωνιακού αλλά και συνολικού αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης για χρονικό διάστημα μίας εβδομάδας (Σχήμα 4.4.3.1).

Πίνακας 4.4.3.2 Για καθένα από τα 3 σενάρια (α) ποσοστιαία μεταβολή των KLA, SOTR, EQI, καταναλισκόμενης ενέργειας για αερισμό, N_2O σε σχέση με το αρχικό σενάριο, (β) ποσοστό ικανοποίησης ορίων TNe και (γ) συγκέντρωση εξόδου NH (mg/L)

σενάρια	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
% μεταβολή σε σχέση με το σενάριο αναφοράς			
KLA	0	7.5	7.7
SOTR	0	1.2	1.4
EQI	0	-9	-10
aeration Energy	0	8.5	8.8
N2O	0	0.5	0.8
ποσοστό επιτυχίας ορίων %			
TNe	100	100	100
συγκέντρωση εξόδου			
NH (mg/L)	1	0.3	0.25



Σχήμα 4.4.3.1 Συγκέντρωση αμμωνιακού(αριστερά) και συνολικού (δεξιά) αζώτου στην έξοδο της εγκατάστασης για καθένα από τα 3 σενάρια για χρόνο παραμονής στερεών SRT=5d

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.4.3.2, το σενάριο 3 δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση σε σχέση με το σενάριο 2 το οποίο αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 4.4.2. Στα 3 τελευταία αεριζόμενα διαμερίσματα η ρύθμιση του KLA βάσει της συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου εξόδου, έναντι της εφαρμογής προκαθορισμένης συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου, δεν οδήγησε σε σημαντικές διαφορές στην απόδοση του αερισμού. Παρόλα αυτά, είναι αξιοσημείωτη η κατά 10% βελτιωμένη ποιότητα εκροής που παρουσιάζει το $3^{ο}$ σενάριο σε σχέση με το $1^{ο}$ αν και συνεπάγεται μια αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά 8.8%. Οι συγκεντρώσεις εξόδου τόσο για το συνολικό άζωτο όσο και για το αμμωνιακό άζωτο είναι κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια τα οποία είναι 15mg/L και 1mg/L, αντίστοιχα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.4.3.1.

Συμπερασματικά, ο έλεγχος του αερισμού βάσει του αμμωνιακού αζώτου, μπορεί να ωφελήσει την ποιότητα εκροής όταν η εγκατάσταση βρίσκεται σε κατάσταση αιχμής, καθώς γίνεται πιο στοχευμένα η παροχέτευση οξυγόνου και εξασφαλίζονται με ακρίβεια οι επιθυμητές τιμές εκροής του αμμωνιακού αζώτου κάθε χρονική στιγμή. Πρακτικά, ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου ελέγχου του συστήματος αερισμού είναι ίδια με αυτά της μεθόδου ελέγχου μόνο με βάση τη συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων ελέγχου του συστήματος αερισμού σε μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων μέσω μαθηματικής προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε, μετά από τροποποίηση, μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης της λειτουργίας ΕΕΛ που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Προσομοιώθηκαν σενάρια για διαφορετικές μεθόδους ρύθμισης της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου, για διαφορετικές συγκεντρώσεις ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου και για διαφορετικές παραμέτρους ελέγχου (διαλυμένο οξυγόνο και αμμωνιακό άζωτο). Στις ενότητες που ακολουθούν συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

- Η επίδραση του χρονικού βήματος με το οποίο ρυθμίζεται η ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου είναι σημαντική. Για χρονικό βήμα ρύθμισης του KLA ίσο με 5min η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου αδυνατεί να προσεγγίσει την επιθυμητή συγκέντρωση ελέγχου. Οι μεγάλες αποκλίσεις οδηγούν σε έλλειψη διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, με αποτέλεσμα την αδυναμία επίτευξης πλήρους νιτροποίησης. Συγκεκριμένα, αναχαιτίζεται το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης (οξείδωση νιτρωδών NO_2 σε νιτρικά NO_3) για το οποίο είναι υπεύθυνα τα βακτήρια X_{NOB}. Αυτό αντανακλάται και στο λόγο των X_{AOB} προς το σύνολο των νιτροποιητικών βακτηρίων $\frac{XAOB}{XAOB+XNOB}$ ο οποίος είναι μεγαλύτερος για χρονικό βήμα 5min σε σχέση με μικρότερα χρονικά βήματα, γεγονός που σχετίζεται με τη συσσώρευση νιτρωδών στο σύστημα ενεργού ιλύος και συνεπώς την αύξηση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου, για την περίπτωση που το χρονικό βήμα ρύθμισης του KLA είναι 5min.

- Η επιλογή χρονικού βήματος ρύθμισης του KLA ίσου με 1sec δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα ως προς την επίτευξη της επιθυμητής συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, όμως πρακτικά είναι ένα μη επιτεύξιμο σενάριο. Γι’ αυτό προτείνεται το χρονικό βήμα 1min, το οποίο δίνει μικρές αποκλίσεις για εφαρμογή των μεθόδων βηματικού και αναλογικού ελέγχου.

- Κατά τον έλεγχο της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, είναι σημαντικό να καθορίζεται ένα περιθώριο επιτρεπόμενου σφάλματος της τάξεως του 0.1mg/L, για να αποφευχθούν οι απότομες μεταβολές στη ρύθμιση του KLA και οι έντονες διακυμάνσεις στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου.

- Η μέθοδος της διακοπτόμενης λειτουργίας (on/off control), ακόμα και για ρύθμιση του KLA κάθε 1min, δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την προσέγγιση της επιθυμητής συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου. Παρόλα αυτά με εφαρμογή πολλαπλών συγκεντρώσεων ελέγχου, αντί για μία, στη μέθοδο αυτή, το ποσοστό ικανοποίησης των ορίων διαλυμένου οξυγόνου (SO set-point = 2±0.1mg/L) αυξάνεται από 14% σε 23,5%, το οποίο ωστόσο παραμένει ένα αρκετά χαμηλό ποσοστό. Στην εφαρμογή της μεθόδου διακοπτόμενης λειτουργίας με πολλαπλές συγκεντρώσεις ελέγχου (multi set-point on/off control) καθοριστικό ρόλο για την αποδοτικότητα παίζει και η επιλογή των τιμών για τις συγκεντρώσεις ελέγχου.

- Η αποδοτικότητα της μεθόδου βηματικού ελέγχου (step control) εξαρτάται από την ελάχιστη ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου που μπορεί να αναπτυχθεί στο σύστημα (KLAmin). Αυτό καθορίζεται από τον τύπο των αεριστήρων, αν δηλαδή θα είναι 1 ή 2 ταχυτήτων. Για αεριστήρα 1 ταχύτητας το ποσοστό ικανοποίησης των ορίων είναι περίπου 50% ενώ για αεριστήρα 2 ταχυτήτων το ποσοστό αυτό αυξάνεται στο 70%. Αεριστήρες με περισσότερες ταχύτητες δίνουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα αλλά δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμοι.

- Συγκρίνοντας τις μεθόδους (α) διακοπτόμενης λειτουργίας, (β) βηματικού ελέγχου και (γ) αναλογικού ελέγχου, η τελευταία έχει πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία ως προς τη διατήρηση της συγκέντρωσης ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου στα επιβαλλόμενα όρια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με την υιοθέτηση της μεθόδου αναλογικού ελέγχου επιτυγχάνεται η επιθυμητή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σε ποσοστό της τάξης του 85%.

- Με τη λειτουργία ενός συστήματος ενεργού ιλύος σε ικανοποιητικές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών (10d), είναι δυνατός ο καθορισμός συγκεντρώσεων ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου χαμηλότερων από 2mg/L. Συγκεκριμένα μπορεί να εφαρμοστεί συγκέντρωση ελέγχου ίση με 1.5mg/L σε κάθε αεριζόμενο διαμέρισμα ενός βιοαντιδραστήρα. Με τον καθορισμό αυτής της συγκέντρωσης ελέγχου, όχι μόνο μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση κατά

15%, αλλά βελτιώνεται και η ποιότητα εκροής κατά περίπου 7% σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Η απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου γίνεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Σημειώνεται μικρή μείωση στη συγκέντρωση νιτρικών και αύξηση στη συγκέντρωση νιτρωδών, που επιβεβαιώνουν μια μικρή διατάραξη στο $2^{ο}$ στάδιο της νιτροποίησης, η οποία όμως δεν οδηγεί σε επικίνδυνη αύξηση των νιτρωδών. Παρόλα αυτά, με εφαρμογή συγκέντρωσης ελέγχου 1.5mg/L οι εκπομπές N_2O αυξάνονται κατά σχεδόν 25%, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την αξιολόγηση του σεναρίου. Για εφαρμογή μικρότερης συγκέντρωσης ελέγχου (1mg/L) οι εκπομπές N_2O είναι 1.5 φορά περισσότερες και επιπλέον είναι αυξημένη η συγκέντρωση των νιτρωδών. Με βάση τα ανωτέρω, ο καθορισμός συγκεντρώσεων ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου μικρότερων από 1.5mg/L δεν προτείνεται για λειτουργία του συστήματος ενεργού ιλύος σε υψηλές τιμές του χρόνου παραμονής στερεών (10d).

- Η εφαρμογή συγκεντρώσεων ελέγχου μεγαλύτερων των 2mg/L για χρόνο παραμονής στερεών της τάξης των 10d, όχι μόνο δεν φαίνεται να προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα, αλλά μπορεί κάτω από προϋποθέσεις να οδηγήσει σε επιδείνωση της τελικής εκροής, διαταράσσοντας την ισορροπία του συστήματος. Με τη λειτουργία του συστήματος σε αυτές τις συνθήκες αναμένεται αύξηση των συγκεντρώσεων των νιτρωδών και των νιτρικών στην τελική εκροή καθώς και των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου. Βασική αιτία αποτελεί η αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου που μεταφέρεται μέσω της εσωτερικής ανακυκλοφορίας και της ανακυκλοφορίας της ιλύος στην ανοξική δεξαμενή, γεγονός που έχει ως συνέπεια τη μερική αναχαίτιση της απονιτροποίησης και την επανακυκλοφορία νιτρωδών στο σύστημα. Η παρουσία νιτρωδών, λόγω αυτοτροφικής απονιτροποίησης, μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή αυξημένων εκπομπών N_2O. Κάτω από αυτές τις συνθήκες αυξάνονται οι εκπομπές N_2O στο πρώτο κυρίως διαμέρισμα κατά το πρώτο διάστημα. Η αύξηση αυτή εξαρτάται από την ημερήσια διακύμανση του εισερχόμενου φορτίου αζώτου. Σταδιακά η αύξηση σταματά και ακολουθεί μείωση η οποία συνοδεύεται από μία αντίστοιχη μείωση του λόγου $\frac{XAOB}{XAOB+XNOB}$.

- Αντίθετα, κατά τη λειτουργία ενός συστήματος ενεργού ιλύος σε συνθήκες κινητικής πίεσης (χαμηλοί χρόνοι παραμονής στερεών), η επιλογή συγκεντρώσεων ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου χαμηλότερων από 2mg/L δεν είναι επιθυμητή, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε κακή ποιότητα εκροής και τιμές εξόδου για το αμμωνιακό άζωτο πολύ υψηλότερες από τις επιτρεπόμενες.

- Σε συνθήκες χαμηλών χρόνων παραμονής στερεών με την επιλογή συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου μεγαλύτερων από 2mg/L μπορεί να επιτευχθεί αξιόλογη βελτίωση της τελικής εκροής και μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, με αύξηση ωστόσο της ενεργειακής κατανάλωσης της τάξης του 20%.

- Αναφορικά με την επιλογή διαφορετικών συγκεντρώσεων ελέγχου σε καθένα από τα αεριζόμενα διαμερίσματα ενός βιοαντιδραστήρα προέκυψαν τα εξής:
    - Για συγκέντρωση ελέγχου ίση με 2mg/L, 1.8mg/L, 1.6mg/L και 1.4mg/L σε καθένα από τα αεριζόμενα διαμερίσματα, αντίστοιχα, και για χρόνο παραμονής στερεών SRT=10d παρουσιάζεται βελτίωση σε σχέση με το σενάριο αναφοράς ως προς κάθε παράμετρο (ποιότητα εκροής, κατανάλωση ενέργειας, εκπομπές υποξειδίου του αζώτου).
    - Για SRT=10d, στο σενάριο που εφαρμόζονται συγκεντρώσεις ελέγχου 2.5mg/L, 2mg/L, 1.5mg/L και 1mg/L η ποιότητα εκροής σε σχέση με το σενάριο αναφοράς βελτιώνεται κατά 6.5% και οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου μειώνονται κατά 9.2% με ταυτόχρονη οριακή αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά λιγότερο από 2%.
    - Για SRT=5d οι συγκεντρώσεις ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου δεν επιδέχονται κάποια μείωση ακόμα και στα τελευταία διαμερίσματα του βιοαντιδραστήρα, γιατί έτσι δεν είναι δυνατή η επίτευξη των επιθυμητών ορίων στην έξοδο της εγκατάστασης. Ακόμα και στην περίπτωση που η συγκέντρωση ελέγχου είναι σταθερά ίση με 2mg/L σε όλα τα διαμερίσματα, είναι οριακά αποδεκτή η ποιότητα εκροής. Ωστόσο, με μια αύξηση κατά 0.5mg/L του διαλυμένου οξυγόνου στο 1^{ο} αεριζόμενο διαμέρισμα, το αμμωνιακό άζωτο εξόδου μειώνεται κατά 50% και ο δείκτης ποιότητας εκροής EQI κατά 6.2%, δημιουργώντας έτσι ένα περιθώριο ασφαλείας για την εκροή.

- Η λειτουργία του συστήματος αερισμού με έλεγχο της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου στο πρώτο αεριζόμενο διαμέρισμα μπορεί να συμβάλλει στη βελτίωση της τελικής εκροής. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ελέγχεται η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στο πρώτο αεριζόμενο διαμέρισμα και όταν αυτή ξεπεράσει κάποια τιμή ελέγχου (προτεινόμενη τιμή 3mg/L) αυξάνεται η συγκέντρωση ελέγχου διαλυμένου οξυγόνου στο διαμέρισμα αυτό από 2mg/L σε 3mg/L. Με εφαρμογή της μεθόδου αυτής μπορεί να επιτευχθεί μείωση του δείκτη ποιότητας εκροής κατά 9% ακόμα και κατά τις ώρες εισροής των φορτίων αιχμής, με παράλληλη αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά 8.5%. Επισημαίνεται οτι με την απλή αύξηση της συγκέντρωσης ελέγχου του διαλυμένου οξυγόνου από 2mg/L σε 3mg/L η αντίστοιχη αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης ήταν μεγαλύτερη από 17%. Αυτό σημαίνει ότι με τον έλεγχο του αμμωνιακού αζώτου στο $1^{ο}$ αεριζόμενο διαμέρισμα η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αυξάνεται μόνο όταν αυτό απαιτείται βάσει του αμμωνιακού αζώτου και έτσι η παροχέτευση οξυγόνου προσαρμόζεται καλύτερα στις ανάγκες του συστήματος.

- Εάν ο έλεγχος του συστήματος αερισμού επεκταθεί και στα υπόλοιπα αεριζόμενα διαμερίσματα, το όφελος είναι οριακό, γεγονός που δεδομένης της μικρότερης πολυπλοκότητας του συστήματος ελέγχου και της αναγκαιότητας του πρόσθετου εξοπλισμού, αναδεικνύει τη λύση ελέγχου της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο πρώτο αεριζόμενο διαμέρισμα βάσει της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου ως πολύ ελκυστική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. *Ανδρεαδάκης Α., Νουτσόπουλος Κ.. Περιγραφή Μοντέλου IAWQ, Σημειώσεις για το μάθημα: Προχωρημένες Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ*
2. *Ευάγγελος Δημητρίου,2017, Ανάπτυξη μοντέλου εκτίμησης εκπομπών υποξειδίου του αζώτου, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών πόρων και Περιβάλλοντος*
3. *Βασίλειος Σαραντόπουλος, 2015, Ανάπτυξη και εφαρμογή ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης λειτουργίας εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, Διπλωματική Εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.*
4. *Σημειώσεις για το μάθημα: Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας και Διάθεσης Αστικών Αποβλήτων, 9^{ου} εξαμήνου Σχολής Πολιτικών Μηχανικών*
5. *Π. Μελίδης, Σημειώσεις με τίτλο: Βασικό πλαίσιο λειτουργίας ΜΕΥΑ, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Διαχείρισης και Τεχνολογίας Υγρών Αποβλήτων*

ΑΓΓΛΙΚΗ

ΑΡΘΡΑ / ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. *Koumaki E., Noutsopoulos C., Sarantopoulos V., Antoniou K., Malamis S., 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. and Krieg G. (2017)*

   C-FOOT CTRL-tool: Development of an integrated tool for the assessment of the greenhouse gas emissions in wastewater treatment plants, CEST 2017
2. *I. Aymerich , L. Rieger, R. Sobhani , D. Rosso, Ll. Corominas, The difference between energy consumption and energy cost: Modelling energy tariff structures for water resource recovery facilities, Water Research 8I, 2015, 113-123*
3. *M. Vaccari, P. Foladori, S. Nembrini and F. Vitali, Benchmarking of energy consumption in municipal wastewater treatment plants-a survey of over 200 plants in Italy, Water Science & Technology 77.9, 2018, 2242-2252*

4. *F.J. Fernández, M.C. Castro, M.A. Rodrigo, P. Cañizares ,Reduction of aeration costs by tuning a multi-set point on/off controller: A case study, Control Engineering Practice 19, (2011), 1231-1237*

5. *Changqing Liu, Shuai Li, Feng Zhang, The oxygen transfer efficiency and economic cost analysis of aeration system in municipal wastewater treatment plant, Energy Procedia 5, (2011), 2437-2443*

6. *Diksha Gupta, Santosh Kumar Singh, Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A Case Study of Noida, Journal of Water Sustainability, Volume 2, Issue 2, June 2012, 131–139*

7. *Theoni Maria Massara, Simos Malamis, Albert Guisasola, Juan Antonio Baeza, Constantinos Noutsopoulos, Evina Katsou, A review of nitrous oxide (N_2O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water, Science of the Total Environment 596-597, (2017), 106-123*

8. *Mathieu Poquet, A contribution to analysis and modeling of NO and N_2O emissions during nitritation, Automatic Control Engineering. INSA Toulouse, 2015*

ΒΙΒΛΙΑ / ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΑ

1. *J. Alex, L. Benedetti, J. Copp, K.V. Gernaey, U. Jeppsson, I. Nopens, M.-N. Pons, L. Rieger, C. Rosen, J.P. Steyer, P. Vanrolleghem, S. Winkler, 2008, Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1)*

2. *Mogens Henze, Mark C.M. van Loosdrecht, George A. Ekama, Damir Brdjanovic, 2008, Biological Wastewater Treatment (Principles, Modelling and Design)*

3. *GPS-X VERSION 2.4 Technical Reference, Hydromantis, Inc.*